

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 813 938**

51 Int. Cl.:

H01L 31/0328 (2006.01)

H01L 31/0725 (2012.01)

H01L 31/028 (2006.01)

H01L 29/861 (2006.01)

H01L 29/88 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **14.08.2012 PCT/GB2012/051982**

87 Fecha y número de publicación internacional: **07.03.2013 WO13030531**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.08.2012 E 12753571 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **03.06.2020 EP 2745330**

54 Título: **Dispositivo fotovoltaico**

30 Prioridad:

29.08.2011 US 201161528650 P

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

25.03.2021

73 Titular/es:

**IQE PLC. (100.0%)
Pascal Close St Mellons
Cardiff CF3 0LW, GB**

72 Inventor/es:

**JOHNSON, ANDREW;
NELSON, ANDREW WILLIAM y
HARPER, ROBERT CAMERON**

74 Agente/Representante:

SUGRAÑES MOLINÉ, Pedro

ES 2 813 938 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 fotovoltaico

5 La presente invención se refiere a dispositivos fotovoltaicos, incluyendo celdas solares.

Antecedentes de la invención

10 Un tipo conocido de dispositivo fotovoltaico tiene dos o más celdas conectadas en serie formadas por una estructura de capa vertical de materiales semiconductores, conteniendo cada celda una unión p-n de un ancho de banda diferente, uniones que se utilizan para absorber diferentes partes del espectro de la luz que cae sobre el dispositivo (Celda en tándem). La mayoría de los dispositivos fotovoltaicos de unión múltiple que se utilizan actualmente se fabrican en un sustrato de germanio.

15 La figura 1 muestra la estructura típica de la celda inferior en dicho dispositivo. Se proporciona un sustrato 1 de germanio (Ge) de tipo p y la primera unión p-n 2 del dispositivo se fabrica haciendo crecer una capa 3 de un material semiconductor III-V sobre el sustrato de germanio, encontrándose los dos en la interfaz 8. Esta capa 3 se denomina, en la técnica, capa de nucleación. A las temperaturas elevadas utilizadas durante el procesamiento, los átomos del Grupo V de la capa de nucleación 3 se difunden a través de la interfaz hacia el sustrato de germanio creando la unión p-n 2 en un punto debajo de la superficie del germanio. La unión se forma porque los átomos del Grupo V actúan como un dopante de tipo n en el germanio y, por lo tanto, cuando se han difundido en suficiente concentración, se forma una región 4 de tipo n. (El otro borde de la región 4 de tipo n es, por supuesto, la interfaz 8 entre los materiales del Grupo III-V y del Grupo IV). La capa 3 del Grupo III-V se proporciona de tipo n para que haya un contacto de baja resistencia entre esta y la región 4 de tipo n del Grupo IV. El control de la profundidad de la difusión de los átomos del Grupo V es importante para definir la calidad de la unión p-n, siendo preferible con una unión menos profunda. La difusión está controlada por la temperatura y la duración del crecimiento y el recocido (y cualquier otro procesamiento) de la capa de nucleación 3 de cualquier otra capa semiconductor 5. Las capas adicionales 5 de semiconductor se proporcionan para formar una o más uniones p-n adicionales para absorber diferentes partes del espectro. Los documentos US 6.380.601 y US 2002/0040727 dan ejemplos de celdas solares de unión múltiple que tienen una celda inferior similar a la figura 1.

20 Un artículo *Si como barrera de difusión en heterouniones de Ge/GaAs* por S. Strite, M.S. Unlu, K. Adomi y H. Morkoç (Appl. Phys Lett. 56 (17)) se publicó en 1990. Los autores de este documento estaban interesados en los fototransistores y las estructuras dopadas de modulación basadas en agujeros, y el documento mismo discutió su investigación de un diodo formado por una capa epitaxial de arseniuro de galio cubierto de germanio. Se dice que este diodo básico sufre una descomposición asistida por microplasma causada por una mala uniformidad de la muestra causada, se sugiere, por vacantes en el GaAs (causadas a su vez por la difusión de Ga y As hacia el Ge). Para evitar esto, se proporcionó una capa intermedia de silicio pseudomórfico de 10 Å de espesor. (El germanio era de tipo p, dopado con Ga a una concentración de $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Los GaAs en la unión estaban más ligeramente dopados, a una concentración de $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, con silicio). En particular, puede controlarse a una profundidad predeterminada.

40 El documento WO 2010/102345 divulga un dispositivo de unión múltiple que tiene un sustrato inactivo, una subcelda de germanio de silicio, una capa de transición, una segunda subcelda de germanio de silicio, una capa de transición, una barrera de difusión y subceldas del Grupo III-V. El documento US2008/0257405 divulga un dispositivo de unión múltiple que tiene un sustrato de germanio superpuesto por una subcelda de arseniuro de indio y galio. Se forma una capa emisora en el sustrato por difusión de depósitos en el sustrato de germanio formando así una capa de germanio de tipo n.

El documento WO87/02183 discute espesores de capas de bloqueo de difusión.

50 Las celdas solares se utilizan para generar energía eléctrica, preferiblemente de la luz solar. Se pueden usar directamente irradiadas por el sol o con concentradores que recogen la luz solar sobre la celda en una concentración más alta, lo que mejora su eficiencia.

Sumario de la invención

55 De acuerdo con la presente invención, se proporciona un material semiconductor que comprende:

una capa de material semiconductor del Grupo IV, no siendo el material silicio,
una capa de material semiconductor del Grupo III-V formado por al menos un tipo de átomos del Grupo III y al menos un tipo de átomos del Grupo V, y que tiene una interfaz con la capa semiconductor del Grupo IV, estando la capa de material semiconductor del grupo IV con coincidencia reticular con la capa de material semiconductor del Grupo III-V,
una capa de silicio en la interfaz entre la capa semiconductor III-V y la capa semiconductor del Grupo IV, o bien en la capa semiconductor del Grupo IV o en la capa semiconductor III-V, espaciada de la interfaz para controlar la difusión de los átomos del Grupo V en la capa semiconductor del Grupo IV,
60 una región dopada del Grupo V de tipo n en la capa semiconductor del Grupo IV que tiene un borde con la interfaz y que está dopada por átomos del Grupo V que se han difundido desde la capa de material semiconductor del
65

Grupo III-V a través de la capa de silicio.

- La capa de silicio actúa para controlar la difusión de los átomos del Grupo V en la capa del Grupo IV (reduciéndola) y, por lo tanto, controla el dopaje de la capa del Grupo IV en términos de su profundidad y concentración. Cambiar aún más el espesor de la capa de Si permite cambiar el dopaje para diferentes requisitos. De esta forma, el dopaje de la capa del Grupo IV se puede controlar según se desee.
- Esa parte de la región dopada del Grupo V de tipo n en la capa semiconductor del Grupo IV que está a un lado particular de la capa de silicio puede doparse por átomos del Grupo V de al menos uno de los tipos de aquellos que forman esa parte del semiconductor del Grupo III-V que está en el lado opuesto de la capa de silicio.
- Al menos algunos de los átomos del Grupo V que dopan esa parte de la capa semiconductor del Grupo IV que está en un lado particular de la capa de silicio pueden ser de esa parte de la capa del Grupo III-V que está en el lado opuesto de la capa de silicio.
- La región dopada del Grupo V de tipo n en la capa semiconductor del Grupo IV puede ser dopada por átomos del Grupo V de al menos uno de los tipos de aquellos que forman una región de la capa semiconductor del Grupo III-V que bordea la interfaz.
- La región dopada del Grupo V en la capa semiconductor puede proporcionar una unión p-n con una región de tipo p en la capa del Grupo IV.
- El material del Grupo III-V en la interfaz puede ser de tipo n.
- La capa de material del Grupo III-V puede ser de tipo n.
- Como alternativa, la región dopada del Grupo V en la capa del Grupo IV y la capa del Grupo III-V pueden formar un diodo de túnel en la interfaz. El material del Grupo III-V en la interfaz puede ser dopado en p.
- La capa de material semiconductor del Grupo IV puede ser germanio, o puede ser silicio-germanio, o puede ser silicio-germanio-estaño.
- El material del Grupo III-V puede comprender átomos del Grupo III que son uno o más de Al, Ga, In y puede comprender átomos del Grupo V que son uno o más de P, As, Sb, Bi. El material del Grupo III-V puede comprender un material seleccionado del grupo que consiste en InGaAsP, AlGaAs, AlGaAsP, GaAs, GaAsP, AlAs, InGaP, InGaAs, AlInGaAs, AlInGaP.
- La capa del Grupo IV puede comprender una capa semiconductor epitaxial del Grupo IV entre la capa de silicio y la capa semiconductor III-V.
- La capa semiconductor del Grupo III-V puede comprender una capa semiconductor epitaxial del Grupo III-V entre la capa de silicio y la capa semiconductor del Grupo IV.
- La capa semiconductor del Grupo IV puede comprender una capa de sustrato y una capa epitaxial desarrollada sobre la capa de sustrato.
- Preferentemente, la capa de silicio tiene un espesor menor o igual a 7,5 Å o puede tener menos o igual a 3 capas atómicas. El silicio puede tener menos de o igual a 1 capa atómica, o puede tener menos de 1 capa atómica.
- La concentración del dopaje de la capa semiconductor del Grupo III-V que bordea la interfaz puede ser mayor que 1×10^{17} átomos por cm^3 , o puede ser mayor que 1×10^{18} átomos por cm^3 , o puede estar entre 1×10^{18} y 5×10^{18} átomos por cm^3 .
- La concentración de los átomos del Grupo V del dopaje de la región dopada del Grupo V de tipo n en la capa semiconductor del Grupo IV puede ser mayor que 1×10^{17} átomos por cm^3 , o puede ser mayor que 1×10^{18} átomos por cm^3 , o puede ser mayor que 6×10^{18} átomos por cm^3 .
- La concentración de dopaje de la capa del Grupo IV no dopada por los átomos del Grupo V puede ser inferior a 4×10^{18} átomos por cm^3 , o puede estar entre 5×10^{16} y 2×10^{18} átomos por cm^3 , o puede estar entre 1×10^{17} y 1×10^{18} átomos por cm^3 .
- El material semiconductor puede comprender una segunda capa de material semiconductor del Grupo III-V que tiene una interfaz con la capa semiconductor del Grupo IV en el lado opuesto de la capa del Grupo IV a la interfaz con la primera capa del Grupo III-V y puede comprender una segunda capa de silicio en la interfaz entre la segunda capa semiconductor III-V y la capa del Grupo IV.
- La presente invención también proporciona un dispositivo fotovoltaico que comprende una celda absorbente de luz

que comprende el material semiconductor de la invención.

5 El dispositivo fotovoltaico puede comprender una pluralidad de celdas absorbentes de luz, una o más de las cuales comprende un material semiconductor de la invención. Una de la pluralidad de celdas puede tener un ancho de banda diferente de otra de las celdas de la pluralidad. La(s) celda(s) absorbente(s) de luz pueden ser un diodo p-n absorbente de luz. El dispositivo fotovoltaico puede ser una celda solar.

La presente invención proporciona además un método para fabricar un material semiconductor que comprende:

10 proporcionar una capa de material semiconductor del Grupo IV, no siendo el material silicio,
proporcionar una capa de material semiconductor del Grupo III-V formado por al menos un tipo de átomos del Grupo III y al menos un tipo de átomos del Grupo V, y que tiene una interfaz con la capa semiconductor del Grupo IV, estando la capa de material semiconductor del grupo IV con coincidencia reticular con la capa de material semiconductor del Grupo III-V,
15 proporcionar una capa de silicio en la interfaz entre la capa semiconductor III-V, o en la capa semiconductor del Grupo IV o en la capa semiconductor III-V, espaciada de la interfaz,
difundir átomos del Grupo V desde la capa de material del Grupo III-V a través de la capa de silicio para dopar el material del Grupo IV para formar una región dopada del Grupo V de tipo n en la capa semiconductor del Grupo IV que tiene un borde con la interfaz.

20 La difusión de los átomos del Grupo V puede formar una unión p-n en la capa del Grupo IV.

La difusión de los átomos del Grupo V puede estar en una región de la capa del Grupo IV que ya era de tipo n para formar una región de dopaje de tipo n que tiene una mayor concentración en dopantes de tipo n.

25 La capa del Grupo III-V puede crecer directamente en la capa del Grupo IV o en la capa de silicio.

Los materiales de acuerdo con la invención o hechos por el método de la invención pueden usarse para generar energía a partir de la luz solar al:

30 proporcionar una celda solar formada por esos materiales, e irradiar la celda solar con luz solar. Eso puede comprender la etapa de concentrar la luz solar que irradia la celda solar.

35 **Breve descripción de las figuras**

Ahora se describirán en detalle ejemplos de la invención haciendo referencia a los dibujos adjuntos, de los cuales:

- la figura 1 es una sección transversal de las capas semiconductoras de la celda inferior de una celda fotovoltaica de unión múltiple conocida,
- la figura 2 es una sección transversal de las capas semiconductoras de la celda inferior de un primer ejemplo de un dispositivo fotovoltaico de unión múltiple de acuerdo con la invención,
- la figura 3 es una sección transversal de las capas semiconductoras de la celda inferior de un segundo ejemplo de un dispositivo fotovoltaico de unión múltiple de acuerdo con la invención,
- la figura 4 es una sección transversal de las capas semiconductoras de la celda inferior de un tercer ejemplo de un dispositivo fotovoltaico de unión múltiple de acuerdo con la invención,
- la figura 5 es una sección transversal de las capas semiconductoras de la celda inferior de un cuarto ejemplo de un dispositivo fotovoltaico de unión múltiple de acuerdo con la invención,
- la figura 6 es una sección transversal de las capas semiconductoras de la celda inferior de un quinto ejemplo de un dispositivo fotovoltaico de unión múltiple de acuerdo con la invención,
- la figura 7 es una sección transversal de las capas de semiconductores de la celda inferior de un sexto ejemplo de un dispositivo fotovoltaico de unión múltiple de acuerdo con la invención,
- la figura 8 es un gráfico de espectrómetro de masas de iones secundario que compara estructuras de capas semiconductoras con y sin la capa de silicio de la invención,
- la figura 9 es otro ejemplo de un dispositivo que usa la invención,
- las figuras 9A y 9B muestran ejemplos del uso de la invención en una celda del dispositivo de la figura 9,
- las figuras 10A a 10D ilustran un método para formar un ejemplo de la invención que implica la transferencia de una capa de SiGe entre sustratos,
- la figura 11 es otro ejemplo de un dispositivo que usa la invención,
- las figuras 11A a 11D muestran ejemplos del uso de la invención, y
- la figura 12 es un ejemplo de un diodo de túnel que usa la invención,

la figura 13 es un gráfico que muestra el ancho de banda y el parámetro reticular de la aleación SiGeSn, mostrando que puede tener coincidencia reticular con GaAs y Ge y los anchos de banda resultantes.

Descripción detallada

5 La figura 2 ilustra un primer ejemplo de un dispositivo fotovoltaico de acuerdo con la invención. Esto muestra una sección transversal de las capas de la celda inferior con, si hubiese, otras capas semiconductoras 5 que forman una o más uniones p-n adicionales que se indican mediante líneas discontinuas. En general, la estructura es similar a la que se muestra en la figura 1. Un sustrato semiconductor 1 del grupo IV de tipo p, por ejemplo germanio, se proporciona, junto con una capa 3 de semiconductor de tipo n III-V cultivado en esta, los dos nuevamente encontrándose en la interfaz 8. También nuevamente, los átomos del Grupo V de la capa 3 III-V se difunden en la
10 capa del Grupo IV formando una región 4 de tipo n adyacente a la interfaz 8, que proporciona una unión p-n 2 donde esa región se encuentra con la parte restante de tipo p del material del Grupo IV. Sin embargo, primero se proporciona una capa delgada de silicio 6 entre la capa 3 y el sustrato 1 del Grupo IV. (Las posibilidades para el material semiconductor particular del Grupo IV se analizan más adelante, pero el material no es silicio en sí mismo. Las posibilidades para el material del Grupo III-V también se analizan más adelante).

15 La figura 3 muestra un segundo ejemplo, que es similar al primero, excepto que una capa 7 de semiconductor epitaxial del Grupo IV (que no sea el silicio mismo) se cultiva primero en la capa 6 de Si antes de que la capa de nucleación 3 del material III-V crezca en esta. En general, esta capa 7 podría doparse inicialmente, a medida que crece, ya sea tipo p o n.

20 En ambos ejemplos, la capa de silicio 6 actúa para controlar la difusión de los átomos del Grupo V desde la capa 3 al material del Grupo IV. El silicio actúa como una barrera para la difusión del Grupo V y, por lo tanto, bajo el mismo conjunto de condiciones de procesamiento utilizadas para formar el dispositivo, la unión p-n 2 es menos profunda, es decir, la posición de la unión p-n está más cerca de la interfaz 8 entre el semiconductor del Grupo IV y la capa de nucleación. La barrera no es total; reduce, en lugar de eliminar por completo, la difusión del Grupo V en el material del
25 Grupo IV que está en el lado opuesto de la barrera de Si del material III-V que es la fuente de los átomos del Grupo V. El ajuste del espesor de la barrera se puede utilizar para controlar la profundidad de la unión p-n 2.

30 En ambos ejemplos, el espesor preferido de la barrera 6 es de 3 mono capas (7,5 Å) de silicio o menos. De hecho, puede ser menos de una sola mono capa completa. Las 3 mono capas son el espesor máximo preferido para la capa de silicio porque la capa de silicio está tensada (porque está tratando de igualar el parámetro reticular del semiconductor del Grupo IV). Por encima de ese espesor crítico, se forman dislocaciones en el silicio para aliviar la tensión, y esas dislocaciones serían desventajosas para el rendimiento del dispositivo. El rango de hasta 3 monocapas también produce las profundidades de unión preferidas en dispositivos fotovoltaicos.

35 En el segundo ejemplo (figura 3), el espesor de la epicapa 7 del Grupo IV no debe exceder preferiblemente la distancia por encima de la cual los átomos del Grupo V se difunden a través del material de ese material semiconductor del Grupo IV durante el procesamiento del dispositivo, ya que más allá de esa distancia, la cantidad de átomos del Grupo V que atraviesan la barrera de Si será mínima. Habitualmente, esa distancia es de hasta 1 µm, dependiendo de las especies del Grupo V que se utilizan y las temperaturas de las etapas del procesamiento del dispositivo.
40

(Un punto a tener en cuenta sobre el ejemplo de la figura 3 es que, en general, la unión p-n 2 está en el otro lado de la barrera de silicio 6 de la capa III-V, la invención generalmente incluye el caso en el que la barrera 6 limita la difusión de los átomos del Grupo V pero no suficientes pasan a través de la barrera para convertir el material del Grupo IV a
45 tipo n, estando la unión p-n en o alrededor*, de la barrera (*una unión p-n, por supuesto, que tiene una extensión mayor que las pocas mono capas de la barrera.)

50 Las figuras 4 y 5 muestran unos ejemplos tercero y cuarto que tienen las mismas capas respectivamente que los ejemplos primero y segundo (figuras 2 y 3), pero se proporciona primero una capa epitaxial 10 de semiconductor del Grupo IV de tipo p antes de que crezcan la capa de silicio 6 y la capa III-V 3. En este ejemplo particular, la epicapa 10 crece sobre el sustrato 1, pero es posible tener capas intermedias. Tener la capa 10 como una epicapa también ayuda a controlar con precisión el espesor y el perfil de dopaje de la unión en el material semiconductor del Grupo IV. Preferiblemente, la capa 10 es lo suficientemente gruesa como para que la unión p-n 2 se forme en esta epicapa 10 del Grupo IV, tal y como se muestra, en lugar de en el sustrato 1 (o en una capa intermedia de material del Grupo IV),
55 pero estos últimos no están excluidos. Sin embargo, debe tenerse en cuenta también que el sustrato 1 no necesita ser material del Grupo IV, ya que la epicapa 10 del Grupo IV se puede hacer crecer en otros materiales.

60 Las figuras 6 y 7 muestran unos ejemplos quinto y sexto que tienen las mismas capas respectivamente que los ejemplos primero y tercero (figuras 2 y 4), pero una capa epitaxial 9 de material semiconductor de tipo n III-V se proporciona primero en la(s) capa(s) del Grupo IV antes de que crezcan la capa de silicio 6 y la capa principal 3 III-V. De nuevo, la capa de silicio actúa como una barrera para controlar la difusión de los átomos del Grupo V desde la capa 3 al material del Grupo IV en el otro lado de la barrera 6. El material del Grupo IV también está dopado por átomos del Grupo V que se difunden desde la capa 9. Para que la presencia de la barrera de Si marque una diferencia

significativa en el nivel de dopaje en la capa del Grupo IV respecto a la capa del grupo III-V en el otro lado de la barrera, esta epicapa 9 III-V debería ser más delgada que la distancia a la que los átomos del Grupo V de la capa 3 se difundirán a través de la capa 9 bajo las condiciones de procesamiento del dispositivo.

- 5 Un ejemplo del material semiconductor del Grupo IV que solía ser el material en el que se forma la unión p-n es el germanio. También los sustratos de germanio están fácilmente disponibles. Las orientaciones preferidas para germanio como sustrato están ligeramente desalineadas de (100) y (111). (Los sustratos desalineados de planos cristalinos exactos son conocidos generalmente en la técnica).
- 10 También se pueden utilizar semiconductores del grupo IV que no sean germanio, tales como silicio-germanio y silicio-germanio-estaño. SiGe y SiGeSn, no están disponibles como sustrato básico, pero se pueden hacer crecer con coincidencia reticular junto con GaAs. Tal SiGe o SiGeSn también se puede eliminar de su sustrato original de GaAs y unirse a un sustrato más barato antes de su uso en la invención. A continuación se describen ejemplos de este proceso. $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ con una composición con x de al menos 0,04, y tal vez $x = 0,06$ o más, puede usarse, pero
- 15 preferiblemente x está en el rango de $0,01 \leq x \leq 0,03$. El desajuste reticular correspondiente del $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ con GaAs será de aproximadamente 0,04 % por cada cambio de 0,01 en x lejos de la condición reticular en aproximadamente $x = 0,018$. La figura 13 es un gráfico que muestra el ancho de banda y el parámetro reticular de la aleación SiGeSn, mostrando que puede tener coincidencia reticular con GaAs con un rango de ancho de banda para el SiGeSn de 0,66-
- 20 1,1eV. También muestra que SiGeSn se puede combinar con Ge y, dado que el parámetro reticular de Ge es bastante cercano al de GaAs, el rango de ancho de banda sobre el que SiGeSn puede tener coincidencia reticular con Ge es similar al dado anteriormente para SiGeSn con coincidencia reticular con GaAs. SiGeSn tiene coincidencia reticular con GaAs donde la relación de Si con Sn es aproximadamente 4:1. Donde, por ejemplo, la proporción de Si es del 2 % y la de Sn es del 0,5 %, esto proporciona un ancho de banda más grande que SiGe en coincidencia reticular correspondiente con GaAs, donde la proporción de Si es 8 % y la de Sn es 2 %, el ancho de banda es más amplio, y
- 25 donde las proporciones son mucho mayores, el ancho de banda puede extenderse aún más, por ejemplo, en el límite de 80 % de Si y 20 % de Sn, el ancho de banda de ese material es de alrededor de 1,1eV.

Como se conoce en la técnica, la capa de nucleación 3 puede estar hecha de varios materiales III-V, como InGaAs, InGaP. Otros materiales son InGaAsP, AlGaAs, AlGaAsP, GaAs, GaAsP, AlAs, InGaP, InGaAs, AlInGaAs, AlInGaP, etc. También incluyen aquellos que incluyen Sb (o posiblemente Bi) como, o uno de, los átomos del Grupo V del material. Como se sabe en la técnica, la mayoría de estos materiales se pueden hacer crecer con coincidencia reticular, o casi, con al menos uno de germanio, silicio o silicio-germanio, silicio-germanio-estaño.

30

Muchos de estos materiales contienen As y/o P para los átomos del Grupo V. Se observa aquí que tanto As como P se difunden del material del Grupo III-V al material del Grupo IV, con, para Ge al menos para el material del Grupo IV, As que se difunde más y más rápido que P.

35

Cuando hay más de una capa epitaxial III-V (por ejemplo, los ejemplos de las figuras 6 y 7 tienen capas epitaxiales 3 y 9), se prefiere que estas capas tengan la misma composición en términos de los átomos del Grupo III y V que forman el material básico pero también en dopaje proporcionado durante la deposición. Sin embargo, las diferencias son posibles y eso puede ser útil para controlar el perfil de dopaje en la región del Grupo IV. De hecho, las diferencias dentro de una capa tampoco están excluidas.

40

De manera similar, cuando hay más de una capa epitaxial del Grupo IV (por ejemplo, el ejemplo de 5), se prefiere que estas capas tengan la misma composición en términos de los átomos del Grupo IV que constituyen el material básico, pero también en el dopaje proporcionado antes de la difusión del Grupo V discutida anteriormente, por ejemplo, durante la deposición del material del Grupo IV. Sin embargo, las diferencias son posibles. De hecho, las diferencias en la composición y/o dopaje dentro de una capa tampoco están excluidas.

45

Sin embargo, como se hace frecuentemente en la técnica para capas epitaxiales, incluso cuando la epicapa y el sustrato son el mismo material básico, se prefiere que la epicapa del grupo IV y el sustrato (figuras 4, 5 y 7) tengan diferente dopaje.

50

Como se anunció anteriormente con los ejemplos de SiGe y SiGeSn hechos crecer en GaAs, los materiales para la capa 10 del Grupo IV pueden hacerse crecer en sustratos de materiales que no sean del Grupo IV.

55

Algunas concentraciones de dopaje que se pueden usar, o se prefieren, son como sigue. Para la capa III-V en la interfaz con la capa del Grupo IV, la concentración de dopaje normalmente sería mayor que 1×10^{17} átomos por cm^3 ; más preferiblemente sería mayor que 1×10^{18} átomos por cm^3 , y aún más preferiblemente estaría entre 1×10^{18} átomos por cm^3 y 5×10^{18} átomos por cm^3 . El número de átomos difusos del Grupo V que forman el dopaje en el material del Grupo IV normalmente sería mayor que 1×10^{17} átomos por cm^3 ; preferiblemente sería mayor que 1×10^{18} átomos por cm^3 y puede ser mayor que 6×10^{18} átomos por cm^3 . Para el resto de la capa del Grupo IV (no difundida significativamente por los átomos del Grupo V), la concentración de dopaje normalmente sería inferior a 4×10^{18} átomos por cm^3 ; preferiblemente estaría entre 5×10^{16} átomos por cm^3 y 2×10^{18} átomos por cm^3 y más preferiblemente estaría entre 1×10^{17} átomos por cm^3 y 1×10^{18} átomos por cm^3 .

60

65

La capa de silicio 6 y otras capas se pueden hacer crecer usando técnicas convencionales. Algunos métodos posibles son los siguientes.

5 La capa de silicio puede, por ejemplo, hacerse crecer en un reactor MOCVD convencional que también se usa para proporcionar la epitaxia de las capas III-V (dicha herramienta se usa convencionalmente para la epitaxia III-V de dispositivos fotovoltaicos de unión múltiple). Esto es particularmente adecuado para, aunque sin limitarse a, el primer ejemplo (figura 2) ya que el sustrato de germanio (tomando eso como un ejemplo del material semiconductor del Grupo IV) se puede colocar directamente en el reactor MOCVD, que luego se usa para hacer crecer las capas de silicio y III-V a su vez. El silicio se usa como fuente de dopante en dichos reactores y, por lo tanto, está disponible para depositar el silicio directamente sobre el sustrato de germanio antes de la capa de nucleación III-V.

15 La capa de silicio 6 también se puede cultivar epitaxialmente en una herramienta de deposición de CVD utilizada para el crecimiento de germanio, silicio y silicio-germanio o silicio-germanio-estaño. Esto es particularmente adecuado para, aunque sin limitación, el segundo ejemplo (figura 3) ya que el sustrato de germanio, etc. se puede colocar primero en la herramienta y luego las capas epitaxiales de silicio y Ge 6 y 7 crecen a su vez. La pieza de trabajo puede luego transferirse a un reactor MOCVD (preferiblemente usando una disposición de herramienta de agrupación para que la capa epitaxial de germanio 7 permanezca limpia) para depositar la capa 3 III-V.

20 MBE también se puede utilizar para la deposición de materiales III-V o de silicio.

La figura 8 es un gráfico de un espectrómetro de masas de iones secundario que compara muestras de dispositivos de celdas en tándem de múltiples uniones que tienen una unión InGaAs/Ge para la celda inferior (a) con y (b) sin la capa de silicio de la invención directamente en la interfaz. El eje vertical es la concentración de átomos As en el Ge en átomos/cm³ y el eje horizontal es la profundidad en la capa de Ge en micras. El gráfico muestra claramente que con la capa de silicio, el dopante As difundido en la capa InGaAs se limita a una profundidad de 1 μm en la capa Ge ((a)), mientras que en el control sin una capa de Si, pero por lo demás con las mismas condiciones de proceso, los átomos de As han penetrado a aproximadamente 4 μm((b)). Además, la concentración de átomos de As es menor en la muestra con la capa de Si. Estas observaciones demuestran que la capa de Si actúa como una barrera para la difusión del As. Se obtienen resultados similares con materiales semiconductores III-V que tienen diferentes átomos del Grupo V.

35 Las muestras de estructura fotovoltaica de triple unión que tienen una capa de silicio de acuerdo con la invención también se han medido para proporcionar un aumento útil en la salida de energía máxima cuando se irradia con 1 sol en comparación con las que no tienen, y también en la tensión de circuito abierto (V_{oc}).

40 La figura 9 muestra otro ejemplo de una celda solar de unión múltiple, que hace uso de la invención, esta vez ilustrando todas las celdas. La figura muestra la disposición en tándem de las celdas del dispositivo (cada una de las cuales está compuesta por varias capas semiconductoras, pero estas no se muestran en detalle). Este dispositivo comienza con un sustrato de GaAs 91 en el que crece una celda SiGe 92 de acuerdo con la invención (que comprende una capa de SiGe que tiene la unión p-n, una capa de barrera de difusión de Si y una capa III-V sobre (por ejemplo, GaInP) la que proporciona el dopaje, ninguna de las cuales se muestra en detalle en la figura dentro de la celda 92). Por encima de eso se proporcionan una celda GaAs 94 y una celda InGaP 96. Los diodos de túnel 93 y 95 respectivamente entre las celdas SiGe y GaAs y entre las celdas GaAs e InGaP reducen la resistencia entre las celdas. Finalmente, una capa de ventana 97 protege el dispositivo pero permite que entre la luz y que las líneas de contacto de metal 99 recojan la corriente producida por el dispositivo. Finalmente, un revestimiento antirreflectante 98 cubre la ventana.

50 La figura 9A muestra un ejemplo de la celda inferior 92 y el sustrato 91 de la figura 9 con más detalle (aunque, por supuesto, el uso de este ejemplo no se limita al ejemplo particular de la figura 9). Esto tiene la estructura del ejemplo de la figura 4 siendo el sustrato 1 GaAs. Sobre eso se hace crecer una epicapa 10 de SiGe de tipo p en gran medida (o exactamente) con coincidencia reticular correspondiente al GaAs. Sobre eso crece la barrera de difusión de Si 6 y sobre eso una capa de nucleación 3 III-V, de nuevo en gran medida (o exactamente) con coincidencia reticular con el SiGe. Los átomos del Grupo V se difunden de la capa 3, en las condiciones de la deposición de la capa 3 y de las etapas de procesamiento posteriores, controlados por la barrera 6, en el SiGe, dopándolo para formar la región 4 de tipo n al lado de la interfaz 8 y, por lo tanto, la unión p-n 2 en la capa SiGe 10. En un ejemplo similar a este, la capa 10 de SiGe está hecha en su lugar de SiGeSn.

55 En este dispositivo, el dopaje del SiGe (o SiGeSn) con átomos del Grupo V del sustrato 1 de GaAs es un problema potencial: el dopaje excesivo del SiGe de tipo p a tipo n por átomos As para formar otra unión p-n en el SiGe cerca de la interfaz entre el SiGe 10 y el sustrato 1.

60 Esto puede abordarse de dos maneras. En primer lugar, se puede proporcionar otra barrera de Si 14 en esa interfaz para reducir la difusión a un nivel en el que el SiGe permanezca de tipo p. (Un espesor de 7,5Å, o 3 capas atómicas, es para la barrera de Si 6 y 14 es lo preferido. Este límite es como los ejemplos anteriores previos porque el Si se está haciendo crecer hasta el parámetro reticular del sustrato de GaAs, que es muy similar al de Ge).

65 Otra forma es evitar el problema transfiriendo el SiGe a un sustrato diferente antes de llevar a cabo las etapas de procesamiento posteriores. Esta transferencia se describe a continuación y en nuestra solicitud de patente internacional publicada como WO2010094919 publicada el 26 de agosto de 2010.

Para esto, la capa de SiGe 10 puede hacerse crecer (figura 10A) en el sustrato 1 de GaAs usando un proceso de epitaxia, con coincidencia reticular, utilizando una mezcla de gases de un precursor que contiene germanio (por ejemplo, GeH₄, GeCl₄, etc.) y un precursor que contiene silicio (por ejemplo, SiH₄, SiH₂Cl₂, SiHCl₃, disilano, etc) con un gas portador (p. ej. H₂). Las capas 10 de SiGe se pueden dopar in situ con dopantes de tipo p, utilizando fuentes de dopaje gaseosas o sólidas que incluyen, aunque sin limitarse a, diborano. La capa 10 se puede hacer crecer, por ejemplo, a presión atmosférica o presión reducida en el rango de 1 ~ 1000 Torr, y temperatura 350 °C ~ 800 °C. Se puede utilizar una variedad de sustratos de GaAs, incluido el tipo p, tipo n y semi-aislante, y las obleas pueden limpiarse ex situ o en la cámara de proceso antes de la epitaxia. Las propiedades de cristalinidad de la capa SiGe 10 pueden medirse usando técnicas de difracción de rayos X, por ejemplo, para verificar la correspondencia reticular, y los espesores de las capas se pueden monitorear típicamente usando elipsometría espectroscópica de ángulo variable, aunque hay otras técnicas disponibles.

En este proceso, el cambio en la composición del material entre el sustrato de GaAs y la capa SiGe 10 proporciona una heterointerfaz que actúa como una buena parada de ataque químico, permitiendo que el sustrato de GaAs se elimine de manera conveniente y precisa para dejar una superficie lisa de la capa SiGe 10. Parte del sustrato de GaAs puede eliminarse por medios mecánicos si esto proporciona un proceso de fabricación más rápido, conveniente o rentable. Por ejemplo, si el sustrato de GaAs es de 500 µm de espesor, alrededor de 400 µm pueden eliminarse mediante molienda desde la cual el material de GaAs puede recuperarse y reutilizarse más fácilmente, y los 100 µm finales pueden eliminarse mediante ataque químico húmedo selectivo.

La estructura de la celda fotovoltaica resultante del uso de este método puede ser más ligera porque se ha eliminado el espesor del sustrato, lo cual puede ser importante particularmente en aplicaciones basadas en el espacio. Una base alternativa que tiene flexibilidad favorable, comportamiento térmico u otras propiedades mecánicas o eléctricas deseables se puede proporcionar ventajosamente. El reemplazo del sustrato por un disipador térmico puede resultar en una conducción térmica más eficiente lejos del dispositivo porque el sustrato ya no actúa para reducir el flujo de calor. El disipador térmico u otra capa de base metálica puede actuar directamente como un electrodo conductor en la parte inferior del dispositivo.

Una técnica particular se ilustra en las figuras 10A - 10D. Comenzando con un sustrato 1 de GaAs, una capa 10 de SiGe se hace crecer epitaxialmente como se describió previamente, y como se muestra en la figura 10A. Luego se utiliza una técnica de transferencia de capa para eliminar todo menos una capa delgada del sustrato de GaAs. La transferencia de capa se puede lograr utilizando una técnica de exfoliación patentada como Smart Cut (RTM) o similar, en la que se forma un plano de corte 12 en el sustrato de GaAs justo debajo de la capa 10 de SiGe. El plano de corte 12 puede formarse utilizando técnicas de implante de haz de iones para depositar átomos de hidrógeno o helio a una profundidad precisa determinada por la energía de la partícula del haz, por ejemplo a profundidades de hasta aproximadamente 1,5 µm, haciendo la técnica práctica en el contexto actual si el espesor de la capa de SiGe es aproximadamente de este espesor.

Luego se une una base alternativa 13 a la capa de SiGe 10. Como se muestra en la figura 10B, la base alternativa puede ser una oblea de silicio oxidado de modo que la capa de SiGe esté unida a una capa de SiO₂, aunque pueden usarse otras bases tales como la capa de disipador térmico metálico discutida anteriormente. Algunas otras bases que se pueden usar son bases metálicas, de vidrio y semiconductoras, que pueden comprender ya dos o más capas seleccionadas de materiales de metal, aislantes y semiconductores, y pueden incluir elementos activos como una o más uniones fotovoltaicas. La mayor parte del sustrato de GaAs se separa de la estructura, y se elimina la fina capa restante de GaAs, por ejemplo por ataque químico húmedo selectivo, para dejar la capa 10 de SiGe en una base alternativa tal como la oblea de silicio oxidado discutida, y como se muestra en la figura 10C. Las capas posteriores del dispositivo se forman como se muestra en la figura 10D, por ejemplo, la barrera de Si 6 y la capa III-V 3 y las capas 5 posteriores.

Una variación de la técnica descrita es formar el plano de corte justo encima de la interfaz con el sustrato, dentro de la capa inferior de SiGe. Después de la transferencia de capa, el SiGe transferido ya está expuesto para cualquier preparación adicional necesaria. El SiGe residual que queda en el sustrato de GaAs se puede eliminar, al menos parcialmente usando un ataque químico húmedo selectivo para SiGe e ineficaz en GaAs, para dejar una oblea de sustrato de GaAs reutilizable.

Se puede contemplar una amplia variedad de bases alternativas diferentes para la estructura de la figura 10D, incluidas bases metálicas, de vidrio y semiconductoras, que pueden comprender ya dos o más capas seleccionadas de materiales de metal, semiconductores y aislantes, y pueden incluir elementos activos como una o más uniones fotovoltaicas. La formación inicial de la capa de SiGe en un sustrato de GaAs proporciona una parada de ataque químico ideal para la eliminación precisa de los GaAs restantes después de la escisión o exfoliación.

La figura 11 muestra otro ejemplo de una celda solar de unión múltiple, que hace uso de la invención. Esto muestra un dispositivo de celdas solares de cinco celdas, de nuevo con todas las celdas conectadas en tándem. Estas son, en orden desde el sustrato, una celda Ge 111, otra celda Ge 112, una celda GaInAs 113, una celda AlGaInAs 114 y una celda AlGaInP 115 (cubierta por una capa de contacto fuertemente de tipo n 116 y líneas de metal 117). En este dispositivo, la invención se usa para formar la celda Ge 112; esta tiene una interfaz con el material III-V de la celda

113 anterior, que proporciona el dopante del Grupo V de modo que la barrera de difusión de Si 6 se proporciona en la interfaz entre las celdas 112 y 113.

5 La figura 11A muestra un ejemplo de las celdas inferiores 111, 112 de la figura 11 con más detalle, aunque, por supuesto, su uso no se limita al ejemplo particular de la figura 11.

10 La celda más inferior 111 tiene un sustrato 1 del Grupo IV de tipo p (por ejemplo, Ge) en el que se hace crecer una epicapa del Grupo IV de tipo n (por ejemplo, Ge) para formar la primera unión p-n. Para proporcionar un contacto de baja resistencia a la siguiente celda 112, las capas 16 de un diodo de túnel se depositan a continuación. Por encima de eso, se forma la epicapa 10 de material del Grupo IV de tipo p (por ejemplo, Ge) seguida de una barrera de difusión de silicio 6 y una epicapa 3 del Grupo III-V para formar de la manera de los ejemplos anteriores una unión p-n 2 entre el material de tipo n 4 de la epicapa 10 dopado por átomos del Grupo V difundido a través de la barrera 6 desde la epicapa 3 y el resto de la capa 10 del Grupo IV, formando así la celda 112.

15 La figura 11B muestra otro ejemplo que es similar al de la figura 11A. Sin embargo, en este ejemplo, la primera celda no incluye el sustrato, sino que está hecha de una epicapa adicional 17 del Grupo IV que es de tipo p hecha crecer en el sustrato 1 (generalmente con coincidencia reticular emparejada con el sustrato) con la capa 15 del Grupo IV de tipo n hecha crecer encima para formar la unión p-n de la primera celda.

20 En un ejemplo particular del ejemplo de la figura 11B, el material del sustrato es GaAs (como se marca en la figura 11B (y en la figura 11C)). Las capas del Grupo IV son entonces preferiblemente las que se pueden hacer crecer, generalmente con coincidencia reticular, de lo cual SiGe y SiGeSn son ejemplos. SiGe proporciona un ancho de banda de 0,66eV cuando hay coincidencia reticular con GaAs y SiGeSn proporciona un ancho de banda mayor que eso, hasta ~ 1,1eV. Si se desean dos anchos de banda de más de 0,66eV, mientras se mantiene la coincidencia reticular con GaAs, entonces la celda más inferior 111 y la siguiente celda 112 pueden estar hechas de SiGeSn pero con diferentes composiciones entre sí para proporcionar los anchos de banda deseados.

30 La figura 11C muestra otro ejemplo que es similar al de la figura 11B, pero en este ejemplo se proporciona una barrera de difusión de Si adicional 14 (como la del ejemplo de la figura 9B) para evitar la formación de una unión p-n no deseada en la capa de material 17 del Grupo IV cuando el sustrato es un material III-V (por ejemplo, GaAs).

35 La figura 11D muestra otro ejemplo de una celda solar de unión múltiple. Al igual que con los ejemplos de las figuras 11B y 11C, se proporciona una primera celda de SiGe o SiGeSn sobre un sustrato de GaAs y, por encima, se proporciona una segunda celda de SiGeSn. En este ejemplo, se proporcionan otras tres celdas, también en tándem: una tercera celda de GaAs por encima de la segunda celda, una cuarta celda de InGaP sobre la tercera celda y una quinta celda de AlGaAs o AlInGaP sobre la cuarta celda. Todas las celdas tienen coincidencia reticular con el sustrato de GaAs. (Aunque AlGaAs no tiene exactamente el mismo parámetro reticular que GaAs, es casi lo suficientemente igual como para tener aún coincidencia reticular, solo con una pequeña tensión donde la capa de AlGaAs está por debajo del espesor crítico donde ocurrirían dislocaciones de alivio de tensión. Esto se aplica en todo su rango de composición de la proporción de aluminio a galio. En este ejemplo, los otros materiales tienen composiciones que tienen exactamente coincidencia reticular con GaAs, composiciones que se usan con preferencia). Un ejemplo de los anchos de banda de las celdas está en orden desde la primera celda hasta la última: 0,7eV, 1,0eV, 1,4eV, 1,8eV 2,0eV.

45 Por lo tanto, cada celda absorbe una parte diferente del espectro de la luz que cae sobre el dispositivo. El dispositivo puede estar provisto, si se desea, de las barreras de Si, diodos de túnel, capas de ventanas, etc. mencionados en los otros ejemplos. Además, el sustrato se puede eliminar como se describe con referencia a las figuras 10A a 10D. Además, los materiales de las celdas se pueden cultivar no en GaAs en sí, sino en otro sustrato con coincidencia reticular con GaAs. Se pueden usar otras capas entre las celdas absorbentes de luz, por ejemplo, diodos de túnel, y estos tienen preferiblemente coincidencia reticular con las celdas y también preferiblemente con el sustrato.

50 La figura 12 muestra las capas de un ejemplo de otro aspecto de la invención. Aquí, la barrera de difusión de Si 6 entre capas 3' del Grupo IV 10' y del Grupo III-V controla la difusión de los átomos del Grupo V a través de la barrera hacia el material del Grupo IV que ya es de tipo n, estando la región difusa 4' producida, por lo tanto, altamente n-dopada. En este ejemplo, las capas 3' y 4' forman un diodo de túnel 16.

60 El ejemplo que se muestra en la figura 12 muestra el diodo de túnel en combinación con una fotocelda del Grupo IV (por lo que este ejemplo será de utilidad en dispositivos fotovoltaicos en tándem). Se proporciona un sustrato 1 del Grupo IV de tipo p sobre el que se hace crecer una epicapa del Grupo IV de tipo n 10', unión que proporciona la celda fotovoltaica. Por encima de eso se proporciona una delgada barrera de difusión de Si 6 y además de eso una capa altamente dopada 3' de material del Grupo III-V, cuyos átomos del Grupo V se difunden a través de la barrera para formar la región n ++ altamente dopada 4'. Por encima de eso pueden crecer otras capas 5, por ejemplo, otras celdas fotovoltaicas, por ejemplo en materiales III-V. La región 4' del grupo IV n ++ altamente dopada y la capa 3' p ++ III-V altamente dopada forman un diodo de túnel de baja resistencia. 16, lo que permite que la corriente fotoeléctrica producida por la unión p-n entre las capas 1 y 10' se conduzca a las capas superiores sin pérdida resistiva excesiva.

Al igual que con los ejemplos anteriores, la barrera de silicio no necesita estar exactamente en la interfaz entre los materiales del Grupo IV y del Grupo III-V, sino que puede estar a una distancia hacia un lado donde aún puede influir en la difusión de los átomos del Grupo V.

- 5 En los ejemplos anteriores, las subceldas pueden crecer alternativamente en orden inverso en un sustrato de GaAs (o un sustrato de coincidencia reticular con GaAs u otro sustrato apropiado para el parámetro reticular de la estructura) comenzando con las celdas de ancho de banda más anchas y luego seguido de las celdas de ancho de banda más pequeñas en orden que terminan por ejemplo con la celda SiGe/SiGeSn. Se proporciona una capa de sacrificio entre la celda de espacio más ancho y el sustrato que permite que las celdas se retiren y se transfieran a un mango adecuado o disipador térmico, invertido para que la celda de ancho de banda más estrecha esté al lado del sustrato y la celda de ancho de banda más ancha reciba primero la luz incidente.
- 10

- Los dispositivos que usan estos materiales, típicamente celdas solares, generalmente se fabrican proporcionando primero un material semiconductor que tenga las capas necesarias, o al menos algunas de ellas. Por lo general, el material se fabrica de manera uniforme sobre una oblea semiconductor completa. El material se procesa luego con técnicas litográficas para formar dispositivos y conexiones individuales. La fabricación del material a menudo la lleva a cabo un fabricante diferente al que realiza las etapas litográficas y de embalaje.
- 15

REIVINDICACIONES

1. Un material semiconductor que comprende:

5 una capa de material semiconductor del Grupo IV (1,4,7,10), no siendo el material silicio,
una capa de material semiconductor del Grupo III-V (3,9) formado por al menos un tipo de átomos del Grupo III y
al menos un tipo de átomos del Grupo V, y que tiene una interfaz (8) con la capa semiconductor del Grupo IV,
estando la capa de material semiconductor del grupo IV con coincidencia reticular con la capa de material
semiconductor del Grupo III-V;
10 una capa de silicio (6) en la interfaz entre la capa semiconductor III-V y la capa semiconductor del Grupo IV, o
bien en la capa semiconductor del Grupo IV o en la capa semiconductor III-V, espaciada de la interfaz para
controlar la difusión de los átomos del Grupo V en la capa semiconductor del Grupo IV,
una región dopada (4) del Grupo V de tipo n en la capa semiconductor del Grupo IV que tiene un borde con la
interfaz y que está dopada por átomos del Grupo V que se han difundido desde la capa de material semiconductor
15 del Grupo III-V a través de la capa de silicio.

2. Un material semiconductor según la reivindicación 1, en donde la región dopada del Grupo V en la capa
semiconductora del Grupo IV proporciona una unión p-n (2) con una región de tipo p en la capa del Grupo IV.

20 3. Un material semiconductor según la reivindicación 1, en donde la región dopada del Grupo V en la capa del Grupo
IV y la capa del Grupo III-V forman un diodo de túnel en la interfaz.

4. Un material semiconductor según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la capa de material
semiconductor del Grupo IV es germanio.

25 5. Un material semiconductor según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en donde la capa de material
semiconductor del Grupo IV es silicio-germanio, o es silicio-germanio-estaño.

30 6. Un material semiconductor según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el material del Grupo III-
V comprende átomos del Grupo III que son uno o más de Al, Ga, In y comprende los átomos del Grupo V que son uno
o más de P, As, Sb, Bi.

35 7. Un material semiconductor según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la capa del Grupo IV (10)
comprende una capa semiconductor epitaxial del Grupo IV (7) entre la capa de silicio (6) y la capa semiconductor
III-V (3).

8. Un material semiconductor según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la capa semiconductor
del Grupo IV comprende una capa de sustrato (1) y una capa epitaxial (10) desarrollada sobre la capa de sustrato.

40 9. Un material semiconductor según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la capa de silicio (6) tiene
un espesor menor o igual a 7,5 Å.

45 10. Un material semiconductor según cualquiera de las reivindicaciones anteriores que comprende una segunda capa
de material semiconductor del Grupo III-V (1) que tiene una interfaz con la capa semiconductor del Grupo IV (10) en
el lado opuesto de la capa del Grupo IV a la interfaz (8) con la primera capa del Grupo III-V (3) y que comprende una
segunda capa de silicio (14) en la interfaz entre la segunda capa semiconductor III-V y la capa del Grupo IV.

50 11. Un dispositivo fotovoltaico que comprende una celda de absorción de luz que comprende un material
semiconductor según cualquier reivindicación anterior.

12. Un método para hacer un material semiconductor que comprende:

55 proporcionar una capa de material semiconductor del Grupo IV (1,4,7,10), no siendo el material silicio,
proporcionar una capa de material semiconductor del Grupo III-V (3,9) formado por al menos un tipo de átomos
del Grupo III y al menos un tipo de átomos del Grupo V, y que tiene una interfaz (8) con la capa semiconductor
del Grupo IV, estando la capa de material semiconductor del grupo IV con coincidencia reticular con la capa de
material semiconductor del Grupo III-V,
proporcionar una capa de silicio (6) en la interfaz entre la capa semiconductor III-V, o en la capa semiconductor
del Grupo IV o en la capa semiconductor III-V, espaciada de la interfaz,
60 difundir átomos del Grupo V desde la capa de material del Grupo III-V a través de la capa de silicio para dopar el
material del Grupo IV para formar una región dopada del Grupo V de tipo n en la capa semiconductor del Grupo
IV que tiene un borde con la interfaz.

65 13. Un método según la reivindicación 12, en donde la difusión de los átomos del Grupo V forma una unión p-n (2) en
la capa del Grupo IV.

14. Un método según la reivindicación 12, en donde la difusión de los átomos del Grupo V está en una región de la capa del Grupo IV que ya era de tipo n para formar una región de dopaje de tipo n que tiene una mayor concentración en dopantes de tipo n.

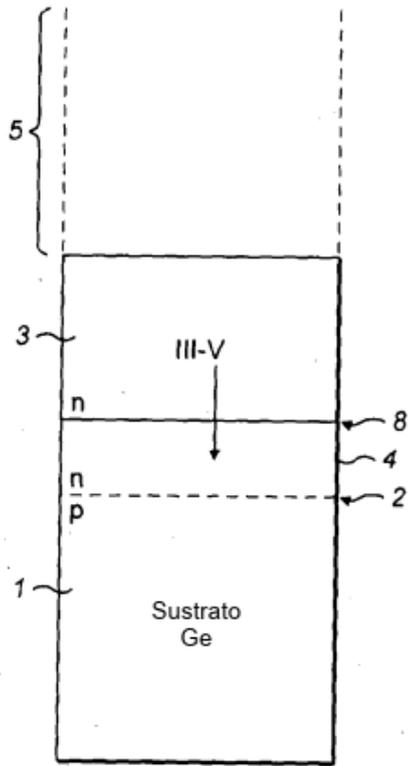


FIG. 1

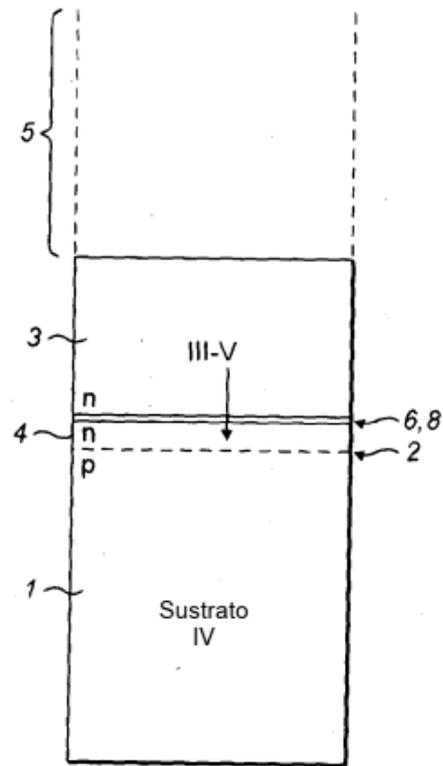


FIG. 2

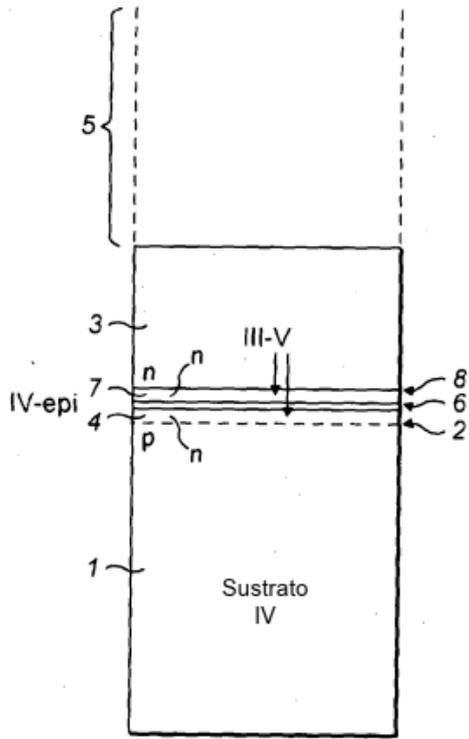


FIG. 3

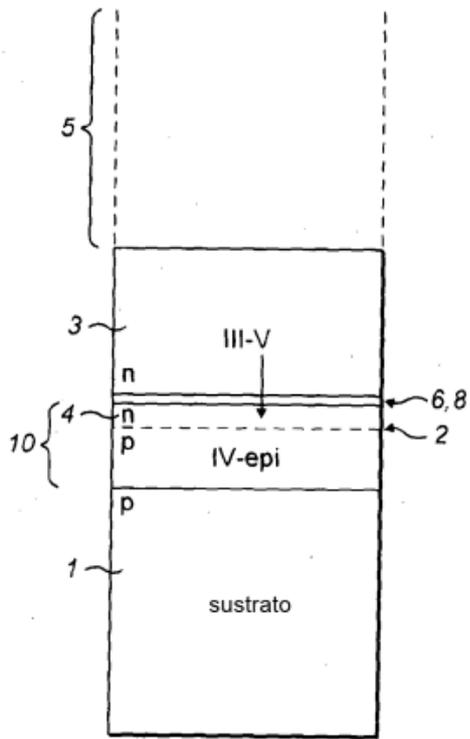
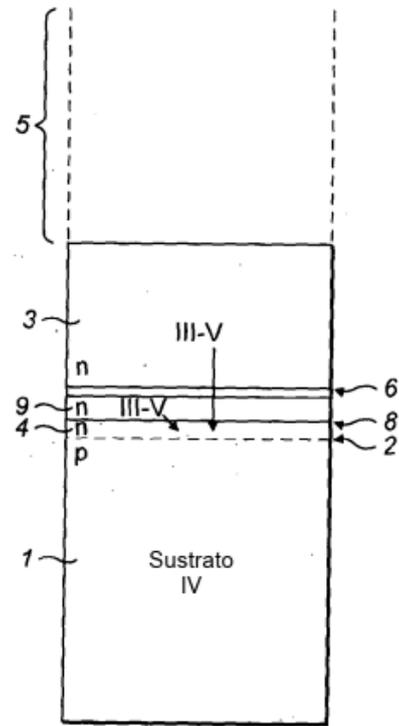
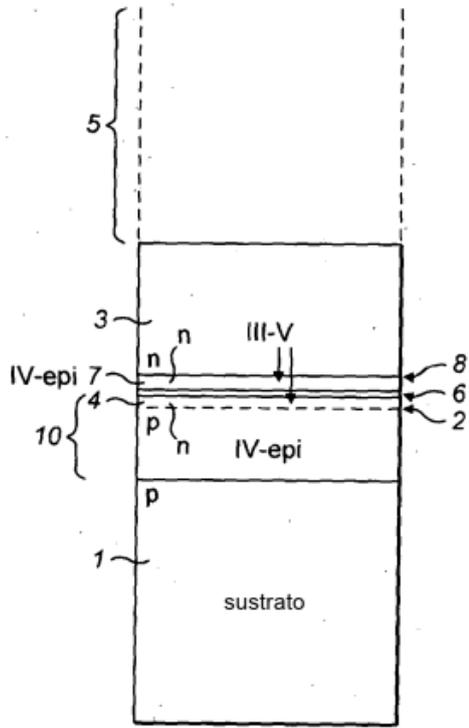


FIG. 4



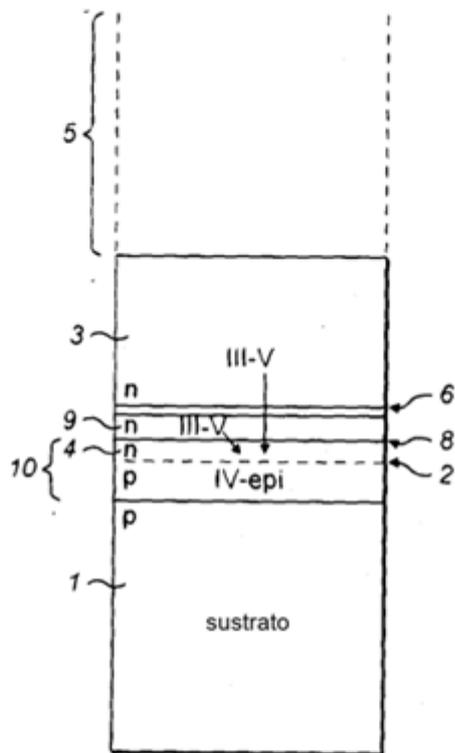


FIG. 7

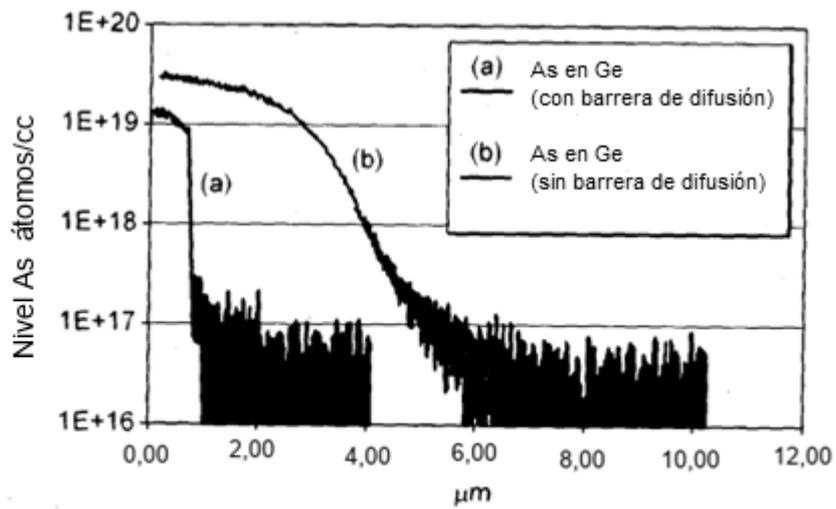


FIG. 8

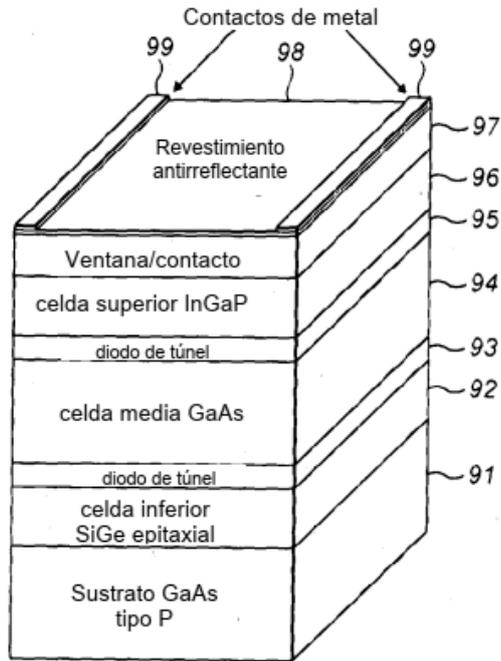


FIG. 9

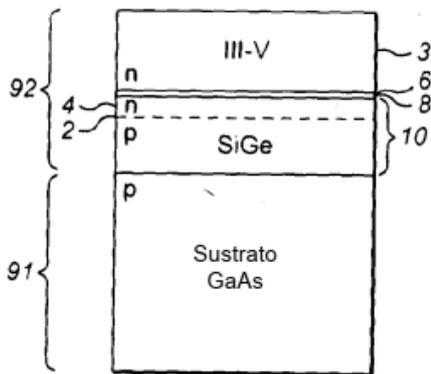


FIG. 9A

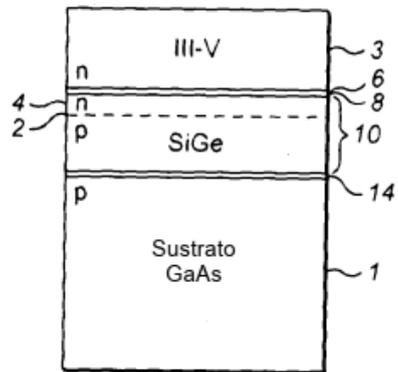


FIG. 9B

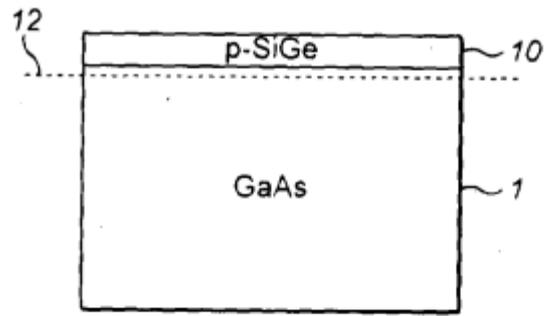


FIG. 10A

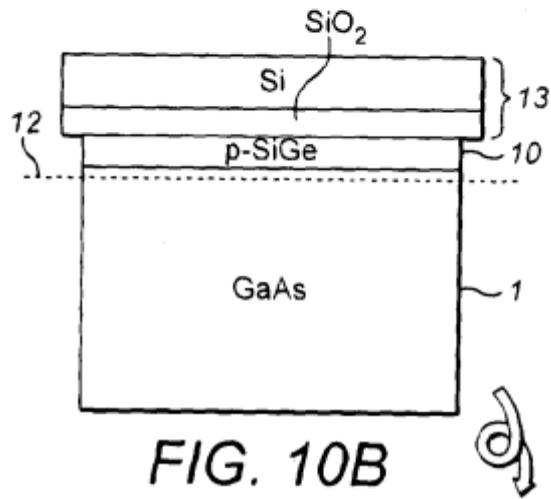


FIG. 10B

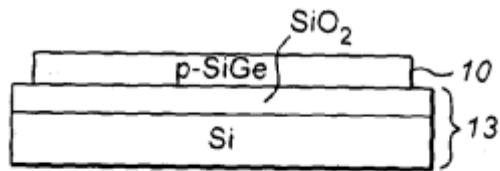


FIG. 10C

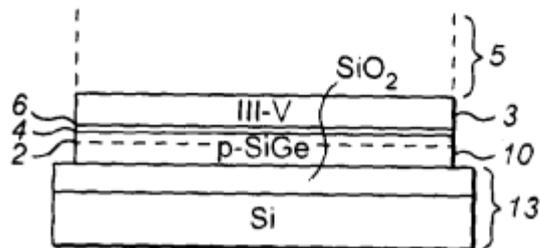


FIG. 10D

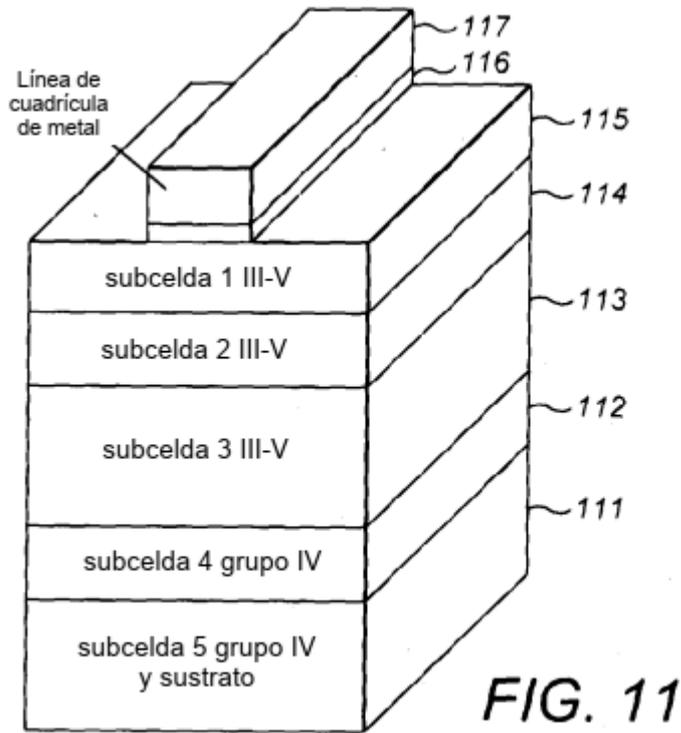


FIG. 11

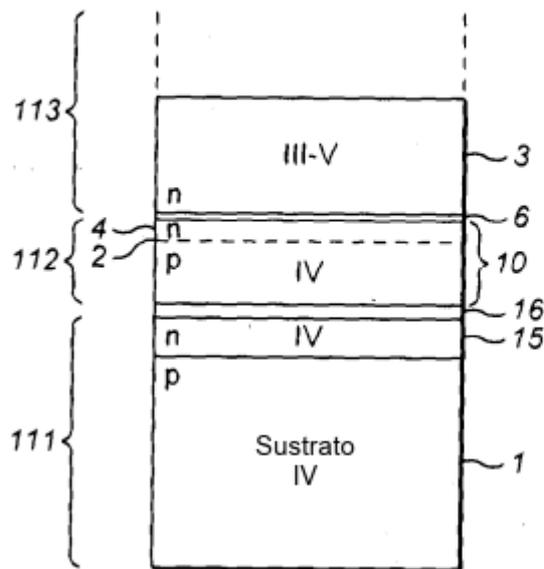


FIG. 11A

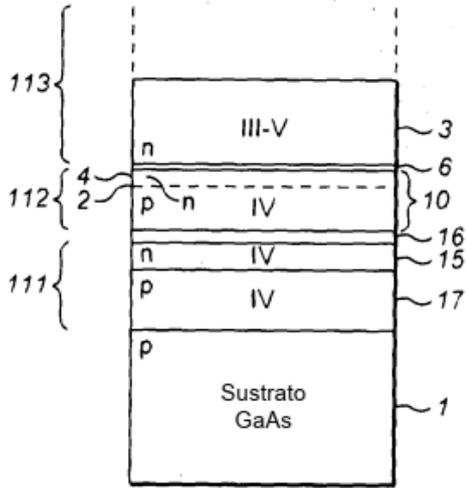


FIG. 11B

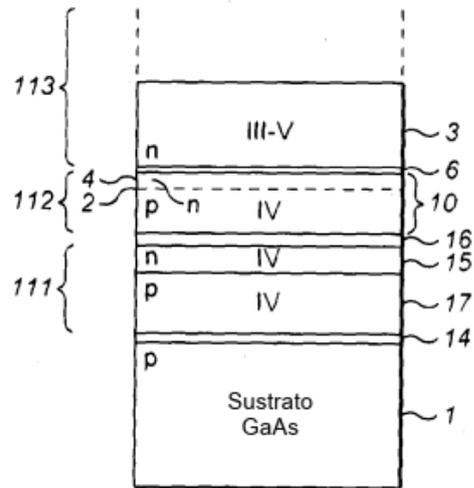


FIG. 11C

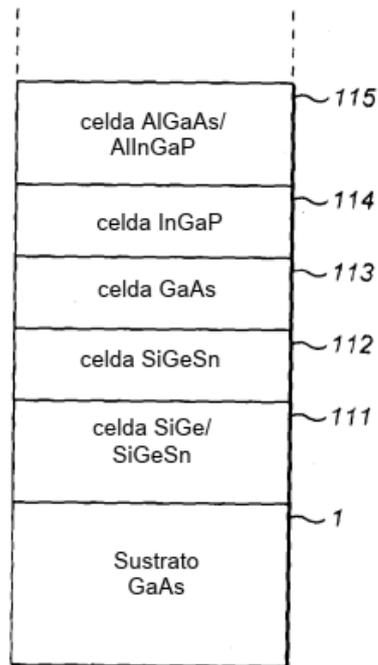


FIG. 11D

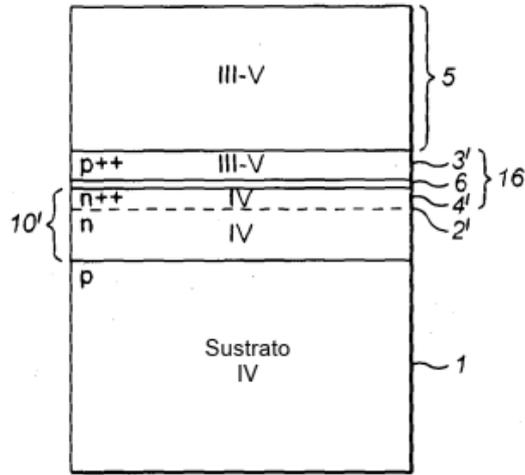


FIG. 12

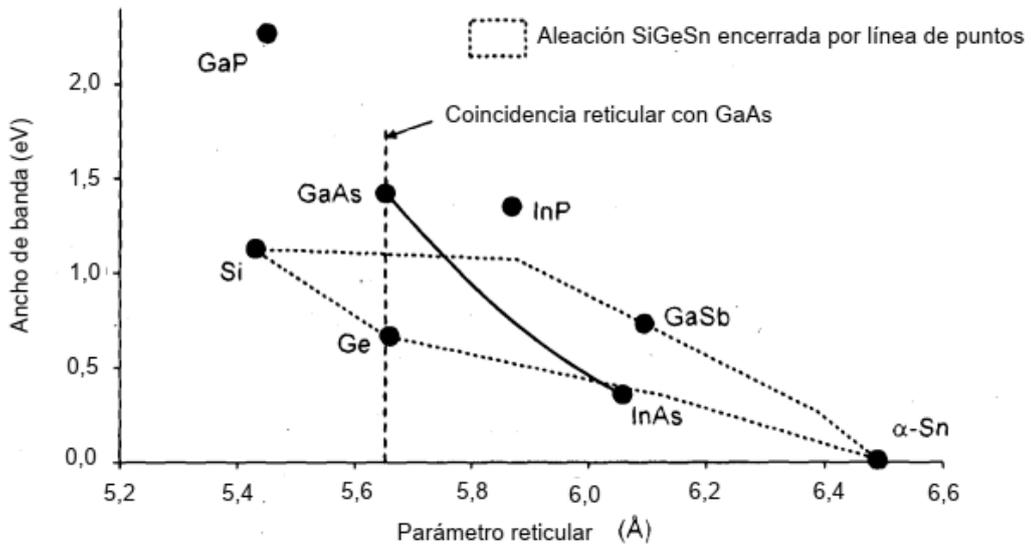


FIG. 13