

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 421 940**

51 Int. Cl.:

H01L 31/072 (2012.01)

H01L 31/18 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **20.07.2010** **E 10737848 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **01.05.2013** **EP 2457262**

54 Título: **Célula fotovoltaica con una eficiencia de conversión elevada**

30 Prioridad:

21.07.2009 IT MI20091285

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
06.09.2013

73 Titular/es:

**CESI CENTRO ELETTRONICO
SPERIMENTALE ITALIANO GIACINTO MOTTA
S.P.A. (100.0%)
Via Rubattino, 54
20134 Milano, IT**

72 Inventor/es:

**GORI, GABRIELE y
CAMPESATO, ROBERTA**

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 421 940 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

Célula fotovoltaica con una eficiencia de conversión elevada

La presente invención se refiere en general al sector de las células fotovoltaicas, y en particular a las células fotovoltaicas para las radiaciones solares (células solares).

5 Las células solares son dispositivos electrónicos capaces de convertir la energía electromagnética -como la radiación solar, en electricidad.

Tales dispositivos electrónicos fundamentalmente comprenden materiales semiconductores, que están caracterizados por estructuras cristalinas sólidas que tienen bandas de energía prohibidas ("bandas prohibidas") ubicadas entre las bandas de valencia y las bandas de conducción. Una banda prohibida define un intervalo de energía que normalmente prohibida para los electrones libres. Sin embargo, cuando la radiación solar incide en un material de dicho tipo en una célula solar, los electrones que ocupan bandas de energía más bajas pueden ser excitados hasta el punto de dar un salto energético y superar la banda prohibida, alcanzando bandas de energía más altas. Por ejemplo, cuando los electrones en las capas de valencia de un semiconductor absorben suficiente energía de los fotones de la radiación solar incidente, tales electrones pueden superar la banda prohibida y alcanzar la banda de conducción.

Al alcanzar las bandas de energía más altas, tales electrones dejan posiciones vacías en las bandas de energía más bajas; tales posiciones vacías, que se definen en la jerga con el término "huecos", pueden desplazarse de átomo a átomo en la red cristalina. Los huecos actúan así como portadores de carga, del mismo modo que los electrones libres en la banda de conducción, y contribuyen a la conductividad del cristal.

20 En otras palabras, cada fotón absorbido por el semiconductor origina un par hueco-electrón correspondiente. El conjunto de pares electrón-hueco formados por la absorción de los fotones origina la denominada fotocorriente de la célula solar. Los huecos y los electrones generados de este modo pueden recombinarse unos con otros, restando su contribución al mantenimiento de la fotocorriente. Para evitar (o al menos para reducir tanto como sea posible) este fenómeno para aumentar la eficiencia de la célula solar, se genera un campo eléctrico local dentro del material semiconductor. De este modo, los huecos y los electrones generados después de la absorción de los fotones son acelerados por el campo eléctrico local en sentidos opuestos, y por tanto la probabilidad de que se recombinen antes de alcanzar los terminales de la célula solar disminuye drásticamente. En particular, tal campo eléctrico es generado mediante la generación de una región de carga espacial, como la región de depleción obtenible mediante la generación de una unión pn entre un par de materiales semiconductores con dopajes opuestos.

30 Las células solares, generalmente utilizadas para aplicaciones espaciales y terrestres, pueden ser del tipo de unión pn o np simple, o células solares de unión simple, o pueden ser del tipo de más de una unión pn o np, o células solares multi-unión.

Las células solares de unión simple están constituidas sustancialmente por la presencia de una única unión pn o np. Inversamente, las células solares multi-unión están implementadas al apilar varias uniones pn o np, actualmente desde dos a cinco uniones. Las diferentes uniones están hechas de diferentes materiales semiconductores, y están eléctricamente conectadas unas a otras en serie por medio de diodos túnel interpuestos entre cada par de uniones adyacentes.

40 Cada una de las diferentes uniones superpuestas forma una denominada célula elemental, y las varias células elementales son capaces de convertir singularmente las varias porciones del espectro de la radiación solar incidente de un modo más eficiente en comparación con el modo que se obtiene con una única unión.

Las células multi-unión tienen la ventaja de ser capaces de proporcionar un mayor voltaje de salida con relación a las células de unión simple, siendo el voltaje global igual a la suma de los voltajes de las células elementales simples (menos una pequeña caída de voltaje en los diodos túnel que conectan las células en serie).

45 Para su fabricación, las diferentes capas de material destinadas a formar las diferentes uniones se obtiene típicamente por medio de la técnica de crecimiento epitaxial a través de deposición (por ejemplo, mediante la técnica de Deposición Química Metal Orgánica en fase Vapor, o MOCVD según sus siglas en inglés) sobre sustratos comerciales de germanio (Ge) o silicio (Si) o arseniuro de galio (GaAs).

50 Durante los últimos años, los rendimientos de las células solares basadas en compuestos de elementos de los grupos III y V de la tabla periódica de elementos, es decir, en los componentes III-V, y en particular de células solares de GaAs, han crecido de manera continua, gracias al progreso de tecnologías que permiten desarrollar nuevos materiales para fabricar células de tres, cuatro, y también cinco uniones. El documento US 2009/155952 A describe un dispositivo fotovoltaico monolítico.

55 El coste de una célula solar multi-unión es mayor que el coste de una de unión simple, y su eficiencia es muy superior (en un estado de iluminación a 25° en atmósfera exterior a la tierra, la eficiencia es aproximadamente igual al 28% para una célula de unión triple, en comparación con el 20% de la de unión simple); por este motivo,

especialmente para aplicaciones aeroespaciales, el mercado está orientado al uso de estos nuevos dispositivos más eficientes. Por ejemplo, los grandes satélites de telecomunicaciones actuales requieren el uso de células solares de triple unión. Estas células tienen, por otro lado, un uso en aplicaciones terrestres, como los sistemas de concentración óptica.

5 Como se ha mencionado ya con anterioridad, la eficiencia de una célula solar depende estrictamente del fenómeno de la recombinación de los pares hueco-electrón fotogenerados. Los pares hueco-electrón generados fuera de la región de depleción no están sujetos a la acción de ningún campo eléctrico, y por tanto tienen una elevada probabilidad de recombinarse, restando sus contribuciones de la corriente generada.

10 Para mejorar la eficiencia de la célula solar, una solución conocida en la técnica consiste en aumentar la profundidad de la región de depleción (y, por tanto, aumentar la porción de material semiconductor que está sujeto al campo eléctrico) mediante la inserción de una porción de un material semiconductor intrínseco (es decir, que no está dopado) entre la porción con dopaje n y la región con dopaje p. Esta solución generalmente aumenta la eficiencia de la célula solar, hasta que el grosor de la región de depleción alcanza un valor tal que limita el voltaje de salida. Más allá de este valor, la eficiencia del dispositivo comienza a disminuir.

15 De acuerdo con otra solución conocida, las porciones de material semiconductor de la célula solar que no pertenecen a la capa de depleción pueden estar sujetas a campos eléctricos locales obtenidos por medio del uso de gradientes de dopado adecuados. Particularmente, en "Semiconductors y Semimetals, Vol. II", de Harold J. Hovel, la porción de semiconductor del tipo p está dopada de acuerdo con un gradiente de dopado lineal. Gracias a la presencia del gradiente de dopado lineal, la porción de material semiconductor del tipo p está sujeta a un campo
20 eléctrico constante capaz de acelerar los pares de hueco-electrón que se generan dentro de la misma.

En vista de lo anterior, el solicitante ha observado que la solución conocida actualmente en la técnica con relación a la implementación de células fotovoltaicas, y en particular la implementación de células solares, se puede mejorar desde el punto de vista de la eficiencia.

25 En las reivindicaciones independientes se indican diferentes aspectos de la solución de acuerdo con una realización de la presente invención.

Un aspecto de la presente invención se relaciona con una célula fotovoltaica monolítica. Tal célula comprende al menos una unión; dicha al menos una unión incluye una base formada por un material semiconductor dopado epitaxialmente de un primer tipo de conductividad y un emisor formado por un material semiconductor dopado de un
30 segundo tipo de conductividad opuesta a la primera. El emisor está apilado sobre la base de acuerdo con una primera dirección, y la base de al menos una de dicha al menos una unión tiene un gradiente decreciente de concentración de dopante a lo largo de dicha primera dirección. Dicha base comprende una primera porción lejos del emisor, una segunda porción próxima al emisor, y una tercera porción entre la primera porción y la segunda porción. En la primera porción, el gradiente decreciente de concentración de dopante tiene una pendiente cuyo valor medio varía sustancialmente desde $-9 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}/\mu\text{m}$ hasta $-4 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}/\mu\text{m}$. En la segunda porción, dicho gradiente
35 decreciente de concentración de dopante presenta una pendiente cuyo valor medio sustancialmente varía desde $-3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}/\mu\text{m}$ hasta $-9 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}/\mu\text{m}$. En la tercera porción, dicho gradiente decreciente de concentración de dopante presenta una pendiente cuyo valor medio sustancialmente varía desde $-2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}/\mu\text{m}$ hasta $-5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}/\mu\text{m}$.

Otro aspecto de la presente invención se refiere a un método correspondiente para fabricar una célula fotovoltaica.

40 Las reivindicaciones dependientes describen realizaciones ventajosas.

La solución de acuerdo con una o más realizaciones de la invención, así como otras características y ventajas de la misma, se comprenderán más claramente haciendo referencia a la siguiente descripción detallada, que debe ser leída en conjunto con los dibujos adjuntos. A este respecto, se indica expresamente que las figuras no están
45 necesariamente a escala y que, a no ser que se indique lo contrario, están pensadas simplemente para ser conceptualmente ilustrativas de las estructuras y procedimientos descritos. En particular:

La Figura 1 muestra esquemáticamente una vista en sección vertical de una célula fotovoltaica monolítica;

La Figura 2 ilustra los perfiles de dopado de una unión de la célula de la Figura 1 y el campo eléctrico correspondiente de acuerdo con una primera solución conocida en la técnica;

50 La Figura 3 ilustra los perfiles de dopado de una unión de la célula de la Figura 1 y el campo eléctrico correspondiente de acuerdo con una segunda solución conocida en la técnica;

La Figura 4 ilustra los perfiles de dopado de una unión de la célula de la Figura 1 de acuerdo con una realización de la presente invención, y

La Figura 5 ilustra los perfiles de dopado de una unión de la célula de la Figura 1 y el campo eléctrico correspondiente de acuerdo con una realización de la presente invención.

- Haciendo referencia a los dibujos, en particular a la Figura 1, se muestra esquemáticamente una sección vertical de una célula fotovoltaica monolítica, en particular, aunque no limitativamente, una célula solar, donde se pueden aplicar los conceptos de acuerdo con una realización de la presente invención. La célula fotovoltaica, que se identifica globalmente con la referencia 100, es una célula multi-unión que tiene tres uniones, y comprende una
- 5 primera célula elemental que se indica en la figura con la referencia 105a y que se denota célula "inferior", y una segunda célula elemental que se indica en la figura con la referencia 105b y que se denota célula "intermedia", y una tercera célula elemental, que se indica en la figura con la referencia 105c y se denota célula "superior". La célula superior 105c está ubicada encima de la célula intermedia 105b, que a su vez está ubicada encima de la célula inferior 105a.
- 10 Las tres células elementales están conectadas eléctricamente unas con otras en serie, con diodos túnel interpuestos; en particular, la célula inferior 105a está eléctricamente conectada a la célula intermedia 105b por medio de un primer diodo túnel, que se identifica en la figura mediante la referencia 108, mientras que la célula intermedia 105b está eléctricamente conectada con la célula 105c superior por medio de un segundo diodo túnel, que se identifica en la figura con la referencia 110.
- 15 La célula inferior 105a comprende una primera capa 112 de un material semiconductor (denotada "base") de un primer tipo de conductividad, por ejemplo del tipo p, y una segunda capa 114 de material semiconductor (denotada "emisor") de la conductividad opuesta, por ejemplo del tipo n. La base 112 y el emisor 114 están directamente ubicados en contacto uno con otro, con el objeto de formar una unión pn. Otro material 116 semiconductor, denotado como "capa de ventana", está preferiblemente formado encima del emisor 114.
- 20 El diodo túnel 180 está formado encima de la capa 116 de ventana.
- Entre el diodo túnel 108 y la célula intermedia 105b se dispone preferiblemente una capa 118 de barrera para reducir el efecto de recombinación superficial de los portadores de carga fotogenerados en la capa 120, aumentando así la eficiencia de reconversión de la célula 100 fotovoltaica.
- 25 La célula intermedia 105b, formada encima de la capa 118 de barrera, comprende una primera capa 120 de semiconductor (base) del primer tipo de conductividad, por ejemplo del tipo p; encima de la base 120, se forma una segunda capa 122 que se denota "capa de separación" y que está constituida por un material semiconductor intencionadamente no dopado. La célula 105b intermedia comprende además una tercera capa 124 de material semiconductor (emisor) ubicada encima de la capa 122 de separación. El emisor 124 comprende un material semiconductor del tipo de conductividad opuesto al de la base 120, por ejemplo del tipo n. Del mismo modo que para
- 30 la célula 105a interior, preferiblemente se forma una capa 126 de ventana encima del emisor 124 de la célula 105b intermedia.
- El diodo túnel 110 se forma encima de la capa 126 de ventana. Se dispone preferiblemente otra capa 128 de barrera entre el diodo túnel 110 y la célula superior 105c.
- 35 La célula superior 105c, formada encima de la capa 128 de barrera, comprende una primera capa 130 de material semiconductor (base) del primer tipo de conductividad, por ejemplo del tipo p; una capa 132 de separación constituida por un material semiconductor intencionadamente no dopado se forma encima de la base 130. Una tercera capa 134 de material semiconductor (emisor) del tipo de conductividad opuesto al de la base 130, por ejemplo del tipo n, se forma encima de la capa 132 de separación. Una capa 136 de ventana se forma preferiblemente encima del emisor 134.
- 40 Una primera capa 138 de material conductor, por ejemplo un metal como el oro (Au) o plata (Ag) se forma en la parte posterior de la célula 100 fotovoltaica, y particularmente en la proximidad de la superficie de la base 112 opuesta a la que está enfrentada al emisor 114, constituyendo un primer terminal de contacto de la célula 100 fotovoltaica.
- 45 Una tapa 145 de un material semiconductor de un tipo de conductividad determinado, por ejemplo del tipo n, se forma por piezas encima de la capa 136 de ventana correspondiente a la célula superior 105c; un contacto 150 de un material conductor, por ejemplo un metal como el Au o Ag, se forma encima de la tapa 145, constituyendo un segundo terminal de contacto de la célula 100 fotovoltaica.
- Encima de la capa 136 de ventana se forma además una capa 140 de cubierta hecha de un material anti-reflectante, por ejemplo constituida por una o más capas de óxido. Se deja una vía de paso adecuada entre la capa 140 de
- 50 cubierta anti-reflectante en dirección al metal 150 para permitir el contacto externo de la célula 100 fotovoltaica.
- Analizando con mayor detalle las células elementales que constituyen toda la célula 100 fotovoltaica, la célula inferior 105a tiene la base 112 constituida por germanio (Ge) dopado del primer tipo de conductividad - en el ejemplo que se considera, el tipo p. Alternativamente, la base 112 puede implementarse por medio de silicio (Si) dopado adecuadamente. El emisor 114 de la célula inferior 105a está formado del mismo material que la base 112, por
- 55 ejemplo Ge, pero dopado del modo opuesto - en el ejemplo considerado, el tipo n.
- La capa 116 de ventana puede estar constituida por una capa de material semiconductor como un compuesto

cuaternario o terciario, por ejemplo un compuesto de indio (In), galio (Ga), y fosforo (P), es decir, InGaP, un compuesto de In, Ga y arsénico (As), es decir, InGaAs, un compuesto de aluminio (Al), Ga y As, es decir, AlGaAs, o por medio de otro compuesto formado por elementos de los grupos III y V de la tabla periódica de elementos.

5 El diodo túnel 108 se implementa de un modo conocido, por ejemplo por medio de una primera capa formada por material dopado III-V del segundo tipo de conductividad - en el ejemplo considerado, el tipo n - y una segunda capa formada por un material dopado III-V del tipo de conductividad opuesto - en el ejemplo considerado, el tipo p.

La capa 118 de barrera está formada por un material semiconductor, como por ejemplo AlGaAs, AlGaInP o InGaP dopado del primer tipo de conductividad - en el ejemplo considerado, del tipo p.

10 La célula intermedia 105b tiene la base 120 constituida por InGaAs dopado del primer tipo de conductividad - en el ejemplo considerado, el tipo p. El emisor 124 de la célula intermedia 105b está formado por material semiconductor dopado del modo opuesto - en el ejemplo considerado, del tipo n -, como InGaAs, AlInGaAs o AlInGaP. La capa 122 de separación está implementada con un material semiconductor, por ejemplo el mismo material de la base 120; sin embargo, el material de la capa 122 de separación es intrínseco, es decir, libre de una cantidad apreciable de impurezas de dopado.

15 La capa 126 de ventana puede estar constituida por una capa de material semiconductor como AlGaAs, AlInGaP o AlInP, o por otro compuesto formado por elementos de los grupos III y V de la tabla periódica de elementos.

El diodo túnel 110 puede llevarse a cabo por medio de una primera capa formada por un material semiconductor III-V del segundo tipo de conductividad - en el ejemplo considerado, el tipo n - y una segunda capa formada por un material semiconductor III-V dopado del tipo de conductividad opuesto - en el ejemplo considerado, el tipo p.

20 Del mismo modo que para la capa 118 de barrera, la capa 128 de barrera está formada por un material semiconductor como AlGaInP o AlInP dopado del primer tipo de conductividad - en el ejemplo considerado, el tipo p.

25 La célula superior 105c tiene la base 130 que está constituida por InGaP dopado del primer tipo de conductividad - en el ejemplo considerado, el tipo p. El emisor 134 de la célula superior 105c está formado por un material semiconductor III-V dopado del modo opuesto - en el ejemplo considerado, el tipo n. La capa 132 de separación se lleva a cabo por medio de un material semiconductor III-V, por ejemplo el mismo material de la base 130; sin embargo, el material de la capa 132 de separación es intrínseco, es decir, libre de una cantidad apreciable de impurezas de dopado.

30 Del mismo modo que para la capa 126 de ventana, la capa 136 de ventana puede estar constituida por una capa de material semiconductor como AlInP o por medio de otro compuesto formado por elementos de los grupos III y V de la tabla periódica de elementos.

35 Desde el punto de vista del proceso de fabricación, la célula 100 fotovoltaica puede fabricarse comenzando por un sustrato del material semiconductor que forma la base 112 de la célula inferior 105a - en el ejemplo considerado, Ge - del tipo de conductividad adecuado - en el ejemplo considerado, el tipo p -, y con una concentración de dopado adecuada. Particularmente, por medio de los procesos de difusión y deposición, comenzando por dicho sustrato que actúa como base 112, se forma el emisor 114 de la célula inferior 105a. Todas las capas subsiguientes de la célula 100 fotovoltaica hasta la ventana 136 se pueden obtener por medio de técnicas de crecimiento epitaxial adecuadas, como el Crecimiento Epitaxial por Haces Moleculares (MBE según sus siglas en inglés) o la Deposición Química Metal Orgánica en fase Vapor (MOCVD según sus siglas en inglés), utilizando el emisor 114 y la base 112 de la célula inferior 105a como sustrato masivo.

40 De acuerdo con una realización de la presente invención, el dopado de la base 120 de la célula intermedia 105b no es constante, sino que varía de un modo no lineal a lo largo de toda su profundidad, es decir, a lo largo de la dirección identificada en la Figura 1 con la referencia x.

45 Para describir con detalle los efectos producidos por la presencia de un dopado no lineal en la base 120, e ilustrar las ventajas que se pueden obtener por el uso de tal solución, se compararán entre sí a continuación tres diferentes perfiles de dopado de la base 120.

50 La Figura 2 ilustra el caso más común en el estado de la técnica, es decir, el caso en que la base 120 está dopada con una concentración de dopado constante. Particularmente, con la referencia 210a se muestra un diagrama de la concentración de dopado $C(x)$ dentro de la barrera 118, la base 120 y el emisor 124 de la célula intermedia 105b a lo largo de la dirección x; la línea continua muestra la concentración del dopado de tipo p - como zinc (Zn) o carbono (C) -, mientras que la concentración del dopado tipo n - como por ejemplo Si o telurio (Te) - se muestra por medio de una línea discontinua. Se debe remarcar que en la Figura 2 la capa 122 de separación se ha omitido deliberadamente para no complicar excesivamente la descripción; sin embargo, los conceptos de la presente invención se pueden aplicar tanto a células que comprenden uniones dotadas de capas de separación hechas de un material intrínseco como células que comprenden uniones sin ninguna capa de separación. En el caso ilustrado en la Figura 2, la concentración de dopado tipo p en la base 120 se mantiene constante a lo largo de la dirección x para toda la profundidad de la base 120. Como es conocido para los expertos en la materia, la concentración de dopado

tipo p de la base 120 se establece preferiblemente en un valor menor que el de la concentración de dopado de la barrera 118. Con la referencia 215a se muestra un diagrama del campo eléctrico $E(x)$ que se desarrolla en la barrera 118, en la base 120 y en el emisor 124 cuando las concentraciones de dopado siguen el perfil mostrado en el diagrama, 210a. Como se puede observar en el diagrama 215a, con un perfil de dopado de este tipo el campo eléctrico se concentra sustancialmente en dos puntos de la célula intermedia 105b, en particular en un primer punto que corresponde a la interfaz entre la barrera 118 y la base 120, y en un segundo punto que corresponde a la interfaz entre la base 120 y el emisor 124. Con mayor detalle, entre la barrera 118 y la base 120 el campo eléctrico presenta un pico - que se identifica en la figura con la referencia 220 - debido a la variación abrupta de la concentración del dopado tipo p, mientras que entre la base 120 y el emisor 124 el campo eléctrico presenta otro pico - que se identifica en la figura con la referencia 225 - debido a la presencia de la región de depleción generada por la unión pn de base 120 / emisor 124. A lo largo de toda la porción central de la base 120, el campo eléctrico resulta ser prácticamente nulo; como consecuencia, los posibles pares hueco-electrón que se generaron por fotogeneración dentro de dicha porción de la base 120 tendrían una probabilidad de recombinación muy elevada, restando su contribución de la corriente fotogenerada de la célula 100 fotovoltaica.

La Figura 3 ilustra otro caso conocido en la técnica, es decir, el caso en el que la base 120 resulta estar dopada con una concentración de dopado de tipo p que varía linealmente. En particular, como se ilustra en el diagrama 210b, la concentración de dopado $C(x)$ de tipo p de la base 120 disminuye linealmente desde un valor más alto (en la interfaz entre la barrera 118 y la base 120) a un valor más bajo (en la interfaz entre la base 120 y el emisor 124). Con la referencia 215b se muestra un diagrama del campo eléctrico $E(x)$ que se desarrolla en la barrera 118, en la base 120 y en el emisor 124 cuando la concentración de dopado sigue el perfil indicado en el diagrama 210b. Como se puede observar en el diagrama 215b, con una base 120 dotada de un perfil de dopado de tipo lineal, el campo eléctrico ya no se concentra solo en la interfaz entre la barrera 118 y la base 120 y en la interfaz entre la base 120 y el emisor 124, sino que se extiende a lo largo de toda la profundidad de la base 120. Con mayor detalle, incluso en este caso el campo eléctrico presenta un primer pico - que se identifica en la figura con la referencia 230 - entre la barrera 118 y la base 120 debido a la variación abrupta de la concentración de dopado de tipo p y un segundo pico - que se identifica en la figura con la referencia 235 - entre la base 120 y el emisor 124 debido a la presencia de la región de depleción generada por la unión pn de base 120 / emisor 124; sin embargo, en este caso, la presencia de un gradiente de dopado lineal origina un campo eléctrico que tiene un valor sustancialmente constante - que se identifica en la figura con la referencia 240 - que se extiende a lo largo de la porción central de la base 120, conectando el pico 230 con el pico 235. La presencia de un campo eléctrico no nulo a lo largo de toda la profundidad de la base 120 permite que los posibles pares hueco-electrón generados en la porción central de la base 120 se separen y se recojan en los terminales de la célula. Para contrarrestar lo más posible la eventualidad de que tales pares hueco-electrón se recombinen, el dopado de la base 120 debería ser tal que garantice un campo eléctrico suficientemente alto a lo largo de toda la base 120; sin embargo, con un perfil de dopado lineal del tipo que se ilustra en la Figura 3, esta condición se puede alcanzar suponiendo que la cantidad de dopado de tipo p es alta en una gran parte de la base (y por tanto, también cerca de la interfaz con la barrera 118), como se resalta en la Figura 3. Como es conocido para los expertos en la materia, un dopado excesivo del material semiconductor de una unión pn reduce la vida útil de los portadores, aumentando la probabilidad de recombinación; como consecuencia, una base 120 dispuesta con una gran porción de su grosor con una concentración de dopado excesivamente alta reduciría la recogida de portadores fotogenerados en la porción 120 de base en dirección a la barrera 118, reduciendo la eficiencia de conversión de la célula 100 fotovoltaica.

De acuerdo con una realización de la presente invención, esta desventaja se resuelve conformando adecuadamente el perfil de concentración $C(x)$ de dopado tipo p de la base 120, como se ilustra en la Figura 4.

En particular, al ajustar el origen 0 del eje x en la interfaz entre la barrera 118 y la base 120, y asumir que la profundidad de la base es igual a L (es decir, la interfaz entre la base 120 y el emisor 124 se produce en $x = L$), de acuerdo con una realización de la presente invención, el perfil de concentración de dopado $C(x)$ de la base 120 es una función decreciente que se subdivide en tres porciones principales, y específicamente:

- una primera porción, que se identifica en la figura con la referencia 405 y que varía desde $x = 0$ hasta $x = x_1$, donde el valor medio de la pendiente del perfil de concentración de dopado $C(x)$ está sustancialmente comprendido dentro del rango $[-9 \cdot 10^{17}; -4 \cdot 10^{17}] \text{ cm}^{-3}/\mu\text{m}$, y $1/5 \cdot L \leq x_1 \leq 1/3 \cdot L$;
- una segunda porción, que se identifica en la figura con la referencia 410 y que varía desde $x = x_1$ hasta $x = x_2$, donde el valor medio de la pendiente del perfil de concentración de dopado $C(x)$ está sustancialmente comprendido dentro del rango $[-2 \cdot 10^{17}; -5 \cdot 10^{16}] \text{ cm}^{-3}/\mu\text{m}$, y $1/3 \cdot L \leq x_2 \leq 9/10 \cdot L$; y
- una tercera porción, identificada en la figura con la referencia 415 y que varía desde $x = x_2$ hasta $x = L$, donde el valor medio de la pendiente del perfil de concentración de dopado $C(x)$ está sustancialmente comprendido dentro del rango $[-3 \cdot 10^{17}; -9 \cdot 10^{16}] \text{ cm}^{-3}/\mu\text{m}$.

De acuerdo con una realización de la presente invención, la concentración de dopado en la interfaz entre la barrera 118 y la base 120 ($x = 0$) varía desde $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ hasta $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, y la concentración de dopado en la interfaz entre la base 120 y el emisor 124 ($x = L$) varía desde $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ hasta $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Este perfil de concentración de dopado $C(x)$ particular de la base 120 puede obtenerse convenientemente durante el proceso de fabricación de la célula 100 fotovoltaica, ya que, como se ha descrito anteriormente, la célula intermedia 105b y, en el ejemplo considerado, también la célula superior 105c, están formados por materiales semiconductores dopados epitaxialmente, es decir, por un material semiconductor generado mediante técnicas de crecimiento epitaxial, como MBE o MOCVD. Gracias a las técnicas de crecimiento epitaxial, el dopado de la capa de base de la célula intermedia (y, posiblemente, también de las células superiores) puede ser controlado con precisión a lo largo de todo el grosor de la base; explotando tales técnicas epitaxiales, se introducen los elementos dopantes en la cámara de reacción con precursores III-V, permitiendo controlar la concentración de dopado a nivel atómico para obtener teóricamente cualquier perfil de concentración de dopado posible. Por el contrario, utilizando una técnica de implantación y difusión de dopado, como en las células solares de silicio estándar, sólo es posible obtener perfiles de concentración de dopado que tienen la forma de una función exponencial - o una combinación de varias funciones exponenciales.

Aunque el perfil de concentración de dopado $C(x)$ que se muestra en la Figura 4 es una función lineal a trocos formada por exactamente tres rampas lineales, es decir, una rampa lineal por porción, los conceptos de la presente invención se pueden aplicar a diferentes perfiles, suponiendo que se cumple con los rangos de pendientes mencionados anteriormente. Por ejemplo, el perfil de concentración de dopado $C(x)$ puede ser una función lineal a trozos que incluye más de tres rampas lineales o una función polinómica al menos de cuarto grado.

Un ejemplo de un posible perfil de concentración de dopado $C(x)$ que cumple con los rangos de pendiente de acuerdo con la realización de la invención anteriormente descrita es ilustrado en la Figura 5 mediante el diagrama 510. Gracias a su perfil de dopado particular, el campo eléctrico tiene un valor relativamente elevado en la porción periférica de la base 120 - es decir, cerca de la interfaz entre la barrera 118 y la base 120 -, y un valor relativamente bajo en la unión pn - es decir, cerca de la interfaz entre la base 120 y el emisor 124. En particular, como se ilustra en el diagrama 515 de la Figura 5, en este caso el campo eléctrico presenta también un primer pico - que se identifica en la figura con la referencia 550 - entre la base 120 y el emisor 124. Además, incluso en este caso hay un campo eléctrico que se extiende a lo largo de la porción central de la base 120, conectando el pico 545 con el pico 550. Sin embargo, la presencia de un gradiente de dopado no lineal provoca que el campo eléctrico que se extiende en la porción central de la base - que se identifica en la figura con la referencia 555 - no tenga un valor constante, sino que presenta una tendencia decreciente (en valor absoluto) a lo largo de la dirección x, desde un primer valor en la interfaz entre la barrera 118 y la base 120 hasta un segundo valor en la interfaz entre la base 120 y el emisor 124, donde dicho primer valor es mayor - en valor absoluto - que el segundo valor. La presencia de un campo eléctrico de este tipo permite obtener mayores eficiencias de conversión porque:

- los portadores minoritarios generados en las porciones de base 120 lejos de la unión pn están sujetos a un campo eléctrico más elevado - generado gracias a la pendiente relativamente alta de la porción 405 del perfil de dopado -, y por tanto se recogen de un modo más eficiente,

- el movimiento de difusión de la mayoría de portadores fotogenerados en la base 120 (es decir, los huecos) en dirección a la unión es dificultado - gracias a la pendiente relativamente baja de la porción 410 del perfil de dopado -, disminuyendo así el componente difusivo de la corriente oscura de la célula,

- los portadores minoritarios fotogenerados en la base 120 (es decir, los electrones) son ventajosamente empujados en dirección a la unión pn - gracias al campo eléctrico generado por la pendiente relativamente alta de la porción 410 del perfil de dopado, y

- todas las ventajas mencionadas anteriormente se obtienen con una base relativamente poco dopada para la mayoría de su grosor, y en consecuencia la probabilidad de recombinación de los portadores fotogenerados resulta limitada de un modo positivo.

Naturalmente, para satisfacer los requisitos locales y específicos, una persona experta en la materia puede aplicar a la solución descrita anteriormente numerosas modificaciones y alteraciones. En particular, aunque la presente invención se ha descrito con un cierto grado de particularidad con referencia a realización(es) preferida(s) de la misma, se debe entender que son posibles múltiples omisiones, sustituciones y cambios en la forma y detalles, así como otras realizaciones; además, se pretende específicamente que los elementos y/o pasos específicos que se describen con relación a cualquier realización descrita de la invención se puedan incorporar a cualquier otra realización como una cuestión de opción de diseño en general.

Por ejemplo, aunque en la presente invención se ha hecho referencia a una célula fotovoltaica de tres uniones, donde la base que está dopada de un modo no lineal pertenece a la célula elemental intermedia, aplican consideraciones similares a diferentes casos, por ejemplo en caso de que el número de células elementales sea diferente de tres (incluso en el caso de una célula de unión simple), en caso de que la base dopada de un modo no lineal pertenezca a una célula elemental diferente de la célula intermedia, y en caso de que más de una célula elemental esté dotada de una base dopada de un modo no lineal.

REIVINDICACIONES

1. Célula (100) fotovoltaica monolítica que comprende al menos una unión (120, 124), donde dicha al menos una unión incluye una base (120) formada por un material semiconductor dopado epitaxialmente de un primer tipo de conductividad y un emisor (124) formado por un material semiconductor dopado de un segundo tipo de conductividad opuesto al primero, estando dicho emisor apilado sobre la base de acuerdo con una primera dirección (x), y teniendo la base de al menos una de dicha al menos una unión un gradiente decreciente de concentración de dopante (C(x)) a lo largo de dicha primera dirección
- 5 caracterizada porque
- dicha base comprende:
- 10 una primera porción lejos del emisor, una segunda porción próxima al emisor, y una tercera porción entre la primera porción y la segunda porción, donde:
- en la primera porción, dicho gradiente decreciente de concentración de dopante tiene una pendiente cuyo valor medio varía sustancialmente desde $-9 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}/\mu\text{m}$ hasta $-4 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}/\mu\text{m}$;
 - 15 - en la segunda porción, dicho gradiente decreciente de concentración de dopante tiene una pendiente cuyo valor medio varía sustancialmente desde $-3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}/\mu\text{m}$ hasta $-9 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}/\mu\text{m}$; y
 - en la tercera porción, dicho gradiente decreciente de concentración de dopante tiene una pendiente cuyo valor medio varía sustancialmente desde $-2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}/\mu\text{m}$ hasta $-5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}/\mu\text{m}$.
2. La célula fotovoltaica de la reivindicación 1, donde:
- la longitud de la base a lo largo de la primera dirección es igual que una primera magnitud (L), extendiéndose dicha primera porción a lo largo de la primera dirección desde un primer extremo (0) que corresponde a un extremo de la base lejano del emisor hasta un segundo extremo (x1), extendiéndose dicha tercera porción a lo largo de la primera dirección desde el segundo extremo a un tercer extremo (x2), extendiéndose dicha segunda porción a lo largo de la primera dirección desde el tercer extremo hasta un cuarto extremo correspondiente a un extremo de la base próximo al emisor;
 - 20 - el segundo extremo está ubicado a una primera distancia del primer extremo, y el tercer extremo está ubicado a una segunda distancia del primer extremo a lo largo de la primera distancia, y
 - dicha primera distancia tiene un valor que varía desde un quinto hasta un tercio de la primera magnitud, y dicha segunda distancia tiene un valor que varía desde un tercio de la primera magnitud hasta un noveno de la primera magnitud.
- 25 3. La célula fotovoltaica de la reivindicación 1 o 2, donde dicho gradiente decreciente de concentración de dopante corresponde a una función lineal a trozos.
- 30 4. La célula fotovoltaica de la reivindicación 3, donde dicha función lineal a trozos comprende al menos tres rampas lineales, correspondiendo cada porción de la base a al menos una rampa lineal respectiva.
- 35 5. La célula fotovoltaica de la reivindicación 1 o 2, donde dicho gradiente decreciente de concentración de dopante corresponde a una función polinómica.
6. La célula fotovoltaica de la reivindicación 5, donde dicha función polinómica es una función polinómica de al menos cuarto grado.
7. Célula fotovoltaica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, donde:
- la al menos una unión incluye una primera unión, una segunda unión, y una tercera unión, estando apilada dicha segunda unión sobre la primera unión de acuerdo con la primera dirección y estando apilada dicha tercera unión sobre la segunda unión de acuerdo con la primera dirección, y
 - 40 - dicha al menos una de dicha al menos una unión es la segunda unión.
8. Célula fotovoltaica de acuerdo con la reivindicación 7 cuando depende de la reivindicación 2, donde la concentración de dopante en el primer extremo es igual a un primer valor comprendido entre $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ y $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ y la concentración de dopante en el cuarto extremo es igual a un primer valor comprendido entre $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ y $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.
- 45 9. Método para fabricar una célula fotovoltaica que comprende al menos una unión, comprendiendo el método:
- generar dicha al menos una unión epitaxialmente formando una base por medio de un material

semiconductor dopado de un primer tipo de conductividad y formando un emisor por medio de un material semiconductor dopado de un segundo tipo de conductividad opuesto al primero, estando dicho emisor apilado sobre la base de acuerdo con una primera dirección, incluyendo el paso de formar la base de al menos una de dicha al menos una unión dopar el material semiconductor con un gradiente decreciente de concentración de dopante a lo largo de dicha primera dirección

5

caracterizado porque

dicho paso de dopado incluye:

- dopar una primera porción lejos del emisor con un gradiente decreciente de concentración de dopante que tiene una pendiente cuyo valor medio sustancialmente varía desde $-9 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}/\mu\text{m}$ hasta $-4 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}/\mu\text{m}$;

10

- dopar una segunda porción próxima al emisor con un gradiente decreciente de concentración de dopante que tiene una pendiente cuyo valor medio varía sustancialmente desde $-3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}/\mu\text{m}$ hasta $-9 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}/\mu\text{m}$; y

- dopar una tercera porción entre la primera porción y la segunda porción con un gradiente decreciente de concentración de dopante que tiene una pendiente cuyo valor medio varía sustancialmente desde $-2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}/\mu\text{m}$ hasta $-5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}/\mu\text{m}$.

15

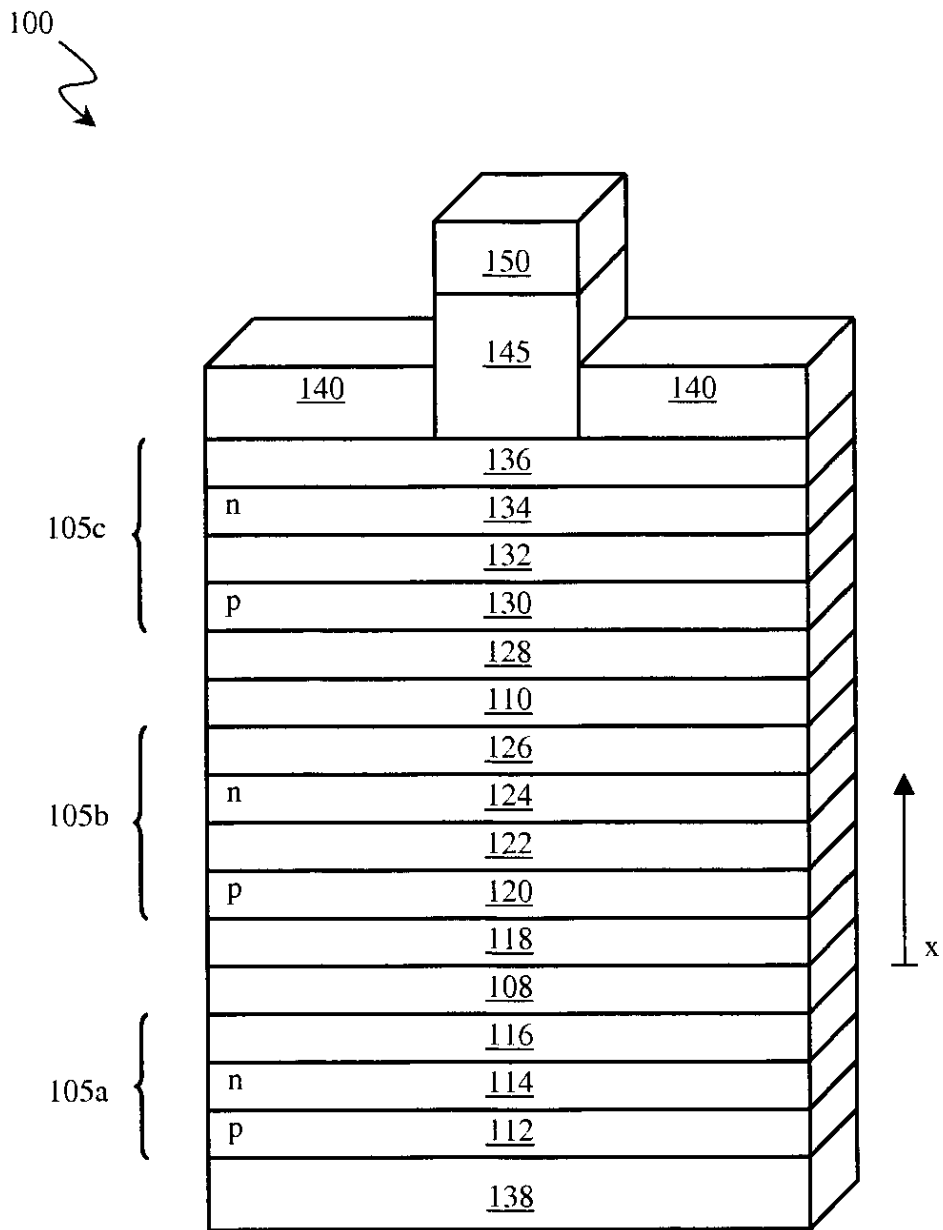


FIG. 1

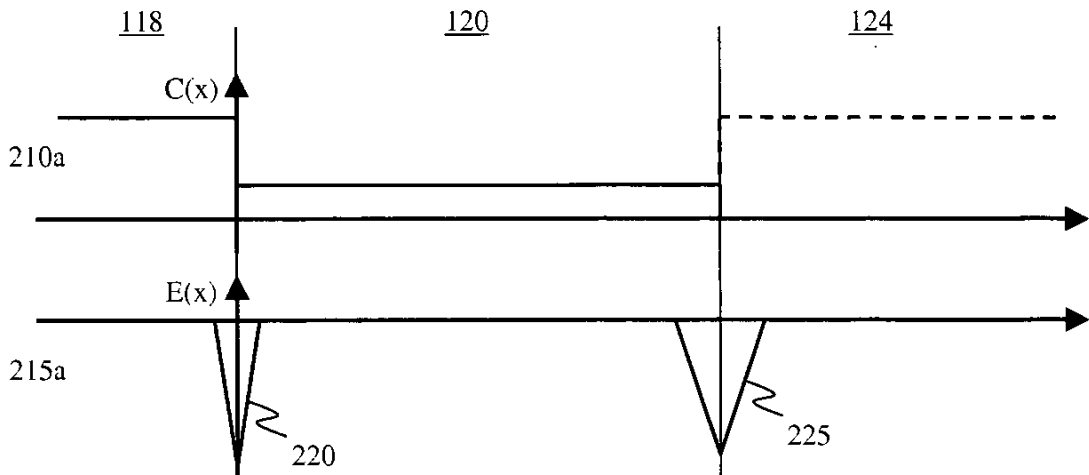


FIG. 2

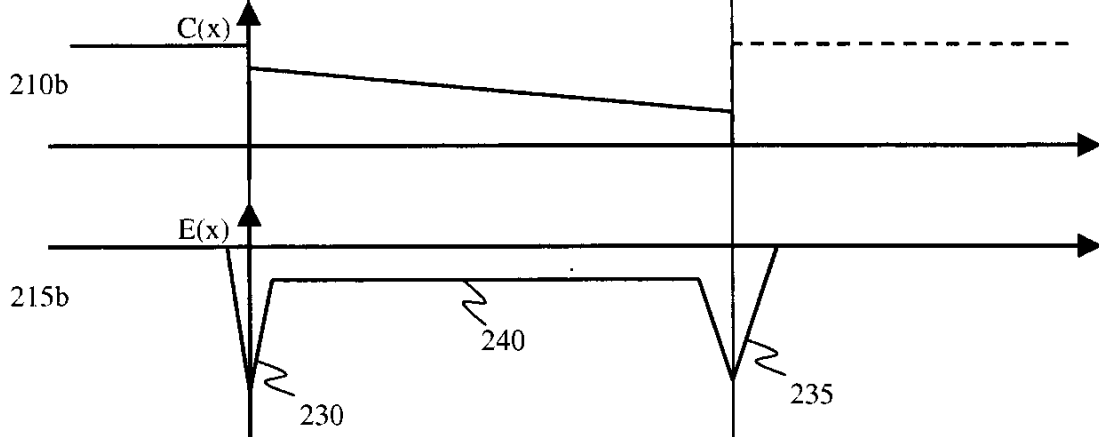


FIG. 3

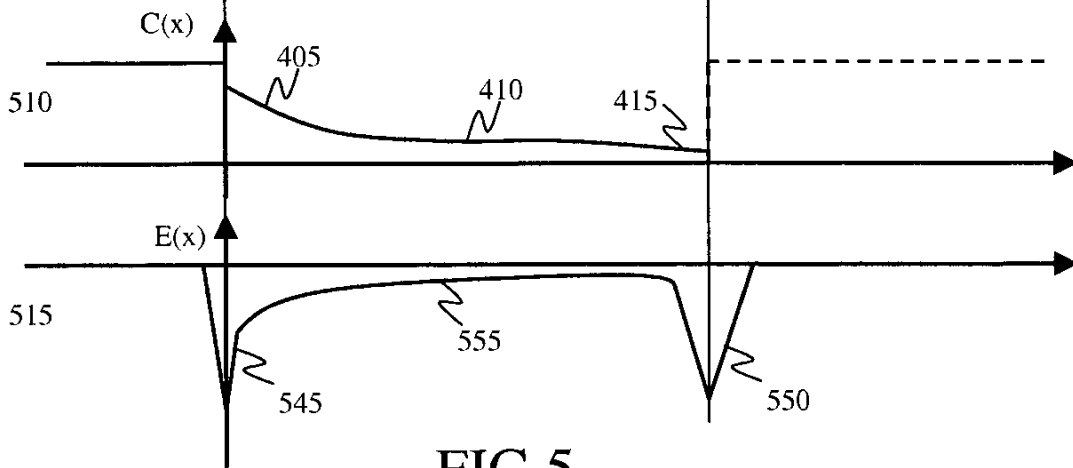


FIG. 5

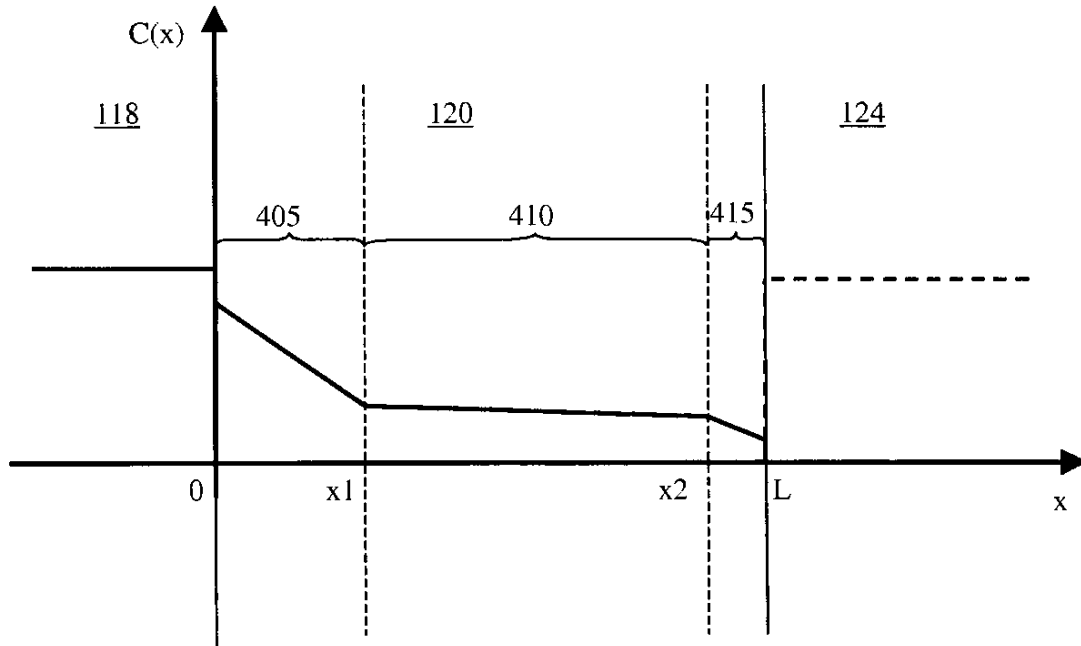


FIG.4