

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 672 791**

51 Int. Cl.:

H01L 51/44 (2006.01)

H01L 51/46 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **25.06.2007 PCT/US2007/014762**

87 Fecha y número de publicación internacional: **31.12.2008 WO09002305**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **25.06.2007 E 07796437 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **30.05.2018 EP 2165354**

54 Título: **Dispositivo fotovoltaico que incluye nanocristales semiconductores**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
18.06.2018

73 Titular/es:
**MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY
(100.0%)
77 MASSACHUSETTS AVENUE
CAMBRIDGE, MA 02139-4307, US**

72 Inventor/es:
**ARANGO, ALEXI;
BULOVIC, VLADIMIR;
WOOD, VANESSA y
BAWENDI, MOUNGI, G.**

74 Agente/Representante:
ISERN JARA, Jorge

ES 2 672 791 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 que incluye nanocristales semiconductores

5 Campo técnico

La presente invención se refiere a dispositivos fotovoltaicos que incluyen nanocristales semiconductores.

Antecedentes

10

Los dispositivos fotovoltaicos pueden producir corriente eléctrica en respuesta a la excitación de un componente activo del dispositivo. La excitación puede estimularse al iluminar el dispositivo con una longitud de onda de luz apropiada, a la vez que se aplica una tensión a lo largo del dispositivo. El componente de absorción puede ser un polímero, tal como un polímero orgánico conjugado o un polímero que contenga restos de absorción o capas de moléculas orgánicas. El perfil de respuesta a la longitud de onda y otras características físicas del dispositivo, pueden alterarse por la estructura electrónica (por ejemplo, brechas energéticas) de los materiales usados.

15

El documento US2007103068A1 divulga un dispositivo emisor de luz que incluye un nanocristal semiconductor y una capa de transporte de carga que incluye un material inorgánico. La capa de transporte de carga puede ser una capa de transporte de huecos o de electrones. El material inorgánico puede ser un semiconductor inorgánico.

20

Sumario

25

En general, un dispositivo fotovoltaico puede incluir una pluralidad de nanocristales semiconductores. Los nanocristales semiconductores pueden ser partículas semiconductoras inorgánicas, por ejemplo, de 1-15 nm de diámetro, decoradas opcionalmente con una capa de ligandos orgánicos. Los nanocristales pueden mostrar efectos de confinamiento cuántico intensos los cuales pueden aprovecharse a la hora de diseñar enfoques químicos ascendentes para crear heteroestructuras complejas con propiedades electrónicas y ópticas que sean ajustables con el tamaño y la composición de los nanocristales.

30

Los nanocristales semiconductores pueden usarse como el material de absorción en un dispositivo fotovoltaico. Los nanocristales semiconductores pueden dispersarse en un líquido y, por lo tanto, son compatibles con técnicas de deposición de película delgada tales como el recubrimiento por centrifugación, el recubrimiento por gota y el recubrimiento por inmersión. Sin embargo, los medios granulares de nanocristal semiconductor que se derivan de estas técnicas de deposición pueden tener propiedades de transporte eléctrico pobres en dispositivos de estado sólido. A diferencia de un medio granular, una capa (por ejemplo, una monocapa o una multicapa) tal como una película delgada de nanocristales semiconductores puede usarse en un dispositivo fotovoltaico. Una película delgada proporciona las propiedades de absorción de luz beneficiosas de los nanocristales semiconductores a la vez que minimiza el impacto en el rendimiento eléctrico.

35

40

Los dispositivos que usan materiales orgánicos para las capas de transporte de huecos o de transporte de electrones (o ambas) pueden tener una conversión de luz a electricidad de alta eficiencia, pero pueden experimentar vidas útiles cortas debido a las inestabilidades intrínsecas de los materiales orgánicos. Los propios nanocristales inorgánicos pueden ser intrínsecamente más estables que sus equivalentes orgánicos, tal y como evidencian los estudios de fotoluminiscencia. Un dispositivo que utiliza nanocristales semiconductores para la absorción y semiconductores inorgánicos para el transporte eléctrico puede alcanzar un rendimiento optoelectrónico superior y una estabilidad de larga duración. Los semiconductores inorgánicos pueden depositarse por un método a baja temperatura, tal como pulverización catódica, deposición de vapor en vacío, impresión por chorros de tinta o sedimentación iónica.

45

50

Los nanocristales semiconductores pueden depositarse en un sustrato, usando impresión por microcontacto. De manera ventajosa, la impresión por microcontacto permite definir un patrón de características a microescala o nanoescala (por ejemplo, de menos de 1 mm, de menos de 500 μm , de menos de 200 μm , de menos de 100 μm , de menos de 25 μm o de menos de 1 μm) en una superficie. En particular, una monocapa de nanocristales semiconductores puede depositarse por impresión por microcontacto. Este enfoque puede permitir una aplicación esencialmente seca (es decir, esencialmente libre de disolventes) de una película de nanocristal semiconductor con patrón en un sustrato. De este modo, puede usarse una variedad más amplia de sustratos, porque la elección del sustrato no está restringida por los requisitos de solubilidad y química superficial.

55

60

En un aspecto, un dispositivo fotovoltaico incluye una primera capa de transporte de carga que incluye un primer material inorgánico en contacto con un primer electrodo dispuesto para introducir carga en la primera capa de transporte de carga, una segunda capa de transporte de carga en contacto con un segundo electrodo, en donde el segundo electrodo está dispuesto para introducir carga en la segunda capa de transporte de carga y una capa de absorción que comprende una pluralidad de nanocristales semiconductores dispuestos entre la primera capa de transporte de carga y la segunda capa de transporte de carga, en donde la pluralidad de nanocristales semiconductores es una población de nanocristales semiconductores que tienen una desviación de no más del 15 %

65

de media cuadrática (rms, por sus siglas en inglés) en diámetro medio y en donde la pluralidad de nanocristales semiconductores forman una multicapa de nanocristales.

5 El primer material inorgánico puede ser amorfo o policristalino. El primer material inorgánico puede ser un semiconductor inorgánico. El semiconductor inorgánico puede incluir un calcogenuro de metal. El calcogenuro de metal puede ser un calcogenuro de metal mixto. El calcogenuro de metal puede incluir un óxido de cinc, un óxido de titanio, un óxido de niobio, un sulfuro de cinc, un óxido de indio y estaño o una mezcla de los mismos.

10 La segunda capa de transporte de carga puede incluir un segundo material inorgánico. El segundo material inorgánico puede ser amorfo o policristalino. El segundo material inorgánico puede ser un semiconductor inorgánico. El semiconductor inorgánico puede incluir un calcogenuro de metal. El calcogenuro de metal puede ser un calcogenuro de metal mixto. El calcogenuro de metal puede incluir un óxido de cinc, un óxido de titanio, un óxido de niobio, un sulfuro de cinc, un óxido de indio y estaño o una mezcla de los mismos.

15 La primera capa de transporte de carga puede ser una capa de transporte de huecos o una capa de transporte de electrones. La pluralidad de nanocristales semiconductores puede ser una población esencialmente monodispersa de nanocristales semiconductores. El dispositivo puede ser transparente. El segundo electrodo puede estar en contacto directo con la pluralidad de nanocristales semiconductores.

20 La pluralidad de nanocristales semiconductores puede formar una capa que tenga un espesor de 4 nm a 2000 nm. La capa puede tener un espesor de menos de 100 nm.

25 En otro aspecto, un método para formar el dispositivo tal y como se ha descrito anteriormente en el presente documento, incluye depositar una primera capa de transporte de carga que incluya un primer material inorgánico sobre un electrodo, depositar una capa de absorción que comprenda una pluralidad de nanocristales semiconductores sobre el electrodo, en donde la pluralidad de nanocristales semiconductores está en contacto eléctrico con la primera capa de transporte de carga y depositar una segunda capa de transporte de carga que incluya un segundo material inorgánico sobre el electrodo, en donde la pluralidad de nanocristales semiconductores está en contacto eléctrico con la segunda capa de transporte de carga.

30 Depositar el primer material inorgánico puede incluir utilizar pulverización catódica. Depositar el segundo material inorgánico puede incluir utilizar pulverización catódica.

35 En otro aspecto, un método para generar corriente incluye exponer el dispositivo tal y como se ha descrito anteriormente en el presente documento a una longitud de onda de luz de excitación, en donde el dispositivo incluye una primera capa de transporte de carga que incluye un primer material inorgánico en contacto con un primer electrodo dispuesto para introducir carga en la primera capa de transporte de carga, una segunda capa de transporte de carga en contacto con un segundo electrodo, en donde el segundo electrodo está dispuesto para introducir carga en la segunda capa de transporte de carga y una capa de absorción que comprende una pluralidad de nanocristales semiconductores dispuestos entre la primera capa de transporte de carga y la segunda capa de transporte de carga.

Otras características, objetos y ventajas de la invención resultarán aparentes a partir de la descripción y dibujos así como a partir de las reivindicaciones.

45 Descripción de los dibujos

La FIG. 1 es un dibujo esquemático que representa un dispositivo fotovoltaico.

La FIG. 2 es un diagrama que representa un método para formar un dispositivo fotovoltaico.

50 Las FIGS. 3A-3E son dibujos esquemáticos que representan dispositivos fotovoltaicos.

La FIG. 4 es una gráfica que representa propiedades ópticas y eléctricas de un dispositivo fotovoltaico.

55 Descripción detallada

Un dispositivo fotovoltaico puede incluir dos capas que separan dos electrodos del dispositivo. El material de una capa puede escogerse basándose en la capacidad del material para transportar huecos o la capa de transporte de huecos (HTL, por sus siglas en inglés). El material de la otra capa puede escogerse basándose en la capacidad del material para transportar electrones o la capa de transporte de electrones (ETL, por sus siglas en inglés). Habitualmente, la capa de transporte de electrones puede incluir una capa de absorción. Cuando se aplica una tensión y el dispositivo se ilumina, un electrodo acepta huecos (portadores de carga positiva) de la capa de transporte de huecos, mientras que el otro electrodo acepta electrones de la capa de transporte de electrones; los huecos y electrones se originan como excitones en el material de absorción. El dispositivo puede incluir una capa de absorción entre la HTL y la ETL. La capa de absorción puede incluir un material seleccionado por sus propiedades de absorción, tales como ancho de línea o longitud de onda de absorción.

Un dispositivo fotovoltaico puede tener una estructura tal como la que se muestra en la FIG. 1, en la que un primer electrodo 2, una primera capa 3 en contacto con el electrodo 2, una segunda capa 4 en contacto con la capa 3 y un segundo electrodo 5 en contacto con la segunda capa 4. La primera capa 3 puede ser una capa de transporte de huecos y la segunda capa 4 puede ser una capa de transporte de electrones. Al menos una capa puede ser no polimérica. Las capas pueden incluir un material inorgánico. Uno de los electrodos de la estructura está en contacto con un sustrato 1. Cada electrodo puede entrar en contacto con un suministro de potencia para proporcionar una tensión a lo largo de la estructura. La capa de absorción puede producir fotocorriente cuando se aplica una tensión de polaridad y magnitud correctas a lo largo del dispositivo. Una capa de absorción separada (no mostrada en la FIG. 1) se incluye entre la capa de transporte de huecos y la capa de transporte de electrones. La capa de absorción separada incluye una pluralidad de nanocristales semiconductores, que es una población esencialmente monodispersa de nanocristales. La capa que incluye nanocristales es una multicapa de nanocristales.

Los nanocristales y al menos un electrodo tienen un desplazamiento de banda prohibida suficiente para transferir un portador de carga desde los nanocristales hasta el primer electrodo o el segundo electrodo. El portador de carga puede ser un hueco o un electrón. La capacidad del electrodo para transferir un portador de carga permite que la corriente fotoinducida fluya de una manera que facilite la fotodetección.

Los dispositivos fotovoltaicos que incluyen nanocristales semiconductores pueden fabricarse al recubrir por centrifugación una solución que contenga las moléculas semiconductoras orgánicas de HTL y los nanocristales semiconductores, en donde la HTL está formada por debajo de la monocapa de nanocristal semiconductor mediante separación de fases (véase, por ejemplo, la solicitud de patente de EE. UU. n.º 10/400.907, presentada el 28 de marzo del 2003 y la publicación de solicitud de patente de EE. UU. n.º 2004/0023010). Esta técnica de separación de fases colocaba de manera reproducible una monocapa de nanocristales semiconductores entre una HTL y ETL de semiconductor orgánico, aprovechando, por tanto, de manera efectiva las propiedades de absorción de luz favorables de los nanocristales semiconductores, a la vez que se minimiza su impacto en el rendimiento eléctrico. Los dispositivos fabricados por esta técnica estaban limitados por impurezas en el disolvente, por la necesidad de usar moléculas de semiconductor orgánico que sean solubles en los mismos disolventes que los nanocristales semiconductores. La técnica de separación de fases no era adecuada para depositar una monocapa de nanocristales semiconductores encima tanto de una HTL como de una HIL (debido a que el disolvente destruye la película delgada orgánica subyacente). El método de separación de fases tampoco permitía el control de la localización de los nanocristales semiconductores que emiten colores diferentes en el mismo sustrato; ni definir un patrón en los nanocristales que emiten un color diferente en ese mismo sustrato.

Además, los materiales orgánicos usados en las capas de transporte (es decir, las capas de transporte de huecos, de inyección de huecos o de transporte de electrones) pueden ser menos estables que los nanocristales semiconductores usados en la capa de absorción. Como resultado, la vida operacional de los materiales orgánicos limita la vida del dispositivo. Un dispositivo con materiales más longevos en las capas de transporte puede usarse para formar un dispositivo más duradero.

El sustrato puede ser opaco o transparente. Un sustrato transparente puede usarse en la fabricación de un dispositivo transparente. Véase, por ejemplo, Bulovic, V. y col., *Nature* 1996, 380, 29; y Gu, G. y col., *Appl. Phys. Lett.* 1996, 68, 2606-2608. El sustrato puede ser rígido o flexible. El sustrato puede ser de plástico, de metal o de vidrio. El primer electrodo puede ser, por ejemplo, un conductor de inyección de huecos de alta función de trabajo, tal como una capa de óxido de indio y estaño (ITO). Otros materiales de primer electrodo pueden incluir óxido de indio y estaño y galio, óxido de indio y estaño y cinc, nitruro de titanio o polianilina. El segundo electrodo puede ser, por ejemplo, un metal de inyección de electrones de baja función de trabajo (por ejemplo, de menos de 4,0 eV), tal como Al, Ba, Yb, Ca, una aleación de litio y aluminio (Li:Al) o una aleación de magnesio y plata (Mg:Ag). El segundo electrodo, tal como Mg:Ag, puede cubrirse con una capa de metal protectora opaca, por ejemplo, una capa de Ag para proteger la capa de cátodo de la oxidación atmosférica o una capa relativamente delgada de ITO esencialmente transparente. El primer electrodo puede tener un espesor de aproximadamente 500 ángstroms a 4000 ángstroms^(10 ángstroms = 1 nm).

La primera capa puede tener un espesor de aproximadamente 50 ángstroms a aproximadamente 5 micrómetros, tal como un espesor en el intervalo de 100 ángstroms a 100 nm, 100 nm a 1 micrómetro o 1 micrómetro a 5 micrómetros. La segunda capa puede tener un espesor de aproximadamente 50 ángstroms a aproximadamente 5 micrómetros, tal como un espesor en el intervalo de 100 ángstroms a 100 nm, 100 nm a 1 micrómetro o 1 micrómetro a 5 micrómetros. El segundo electrodo puede tener un espesor de aproximadamente 50 ángstroms a más de aproximadamente 1000 ángstroms.

Una capa de transporte de huecos (HTL) o una capa de transporte de electrones (ETL) puede incluir un material inorgánico, tal como un semiconductor inorgánico. El semiconductor inorgánico puede ser cualquier material con una banda prohibida mayor que la energía de emisión del material de absorción. El semiconductor inorgánico puede incluir un calcogenuro de metal, un pnicturo de metal o un semiconductor elemental, tal como un óxido de metal, un sulfuro de metal, un selenuro de metal, un telururo de metal, un nitruro de metal, un fosfuro de metal, un arseniuro de metal o arseniuro de metal. Por ejemplo, el material inorgánico puede incluir óxido de cinc, un óxido de titanio, un óxido de niobio, un óxido de indio y estaño, óxido de cobre, óxido de níquel, óxido de vanadio, óxido de cromo, óxido

de indio, óxido de estaño, óxido de galio, óxido de manganeso, óxido de hierro, óxido de cobalto, óxido de aluminio, óxido de talio, óxido de silicio, óxido de germanio, óxido de plomo, óxido de circonio, óxido de molibdeno, óxido de hafnio, óxido de tántalo, óxido de tungsteno, óxido de cadmio, óxido de iridio, óxido de rodio, óxido de rutenio, óxido de osmio, un sulfuro de cinc, selenuro de cinc, telururo de cinc, sulfuro de cadmio, selenuro de cadmio, telururo de cadmio, sulfuro de mercurio, selenuro de mercurio, telururo de mercurio, carburo de silicio, diamante (carbón), silicio, germanio, nitruro de aluminio, fosfuro de aluminio, arseniuro de aluminio, antimoniuro de aluminio, nitruro de galio, fosfuro de galio, arseniuro de galio, antimoniuro de galio, nitruro de indio, fosfuro de indio, arseniuro de indio, antimoniuro de indio, nitruro de talio, fosfuro de talio, arseniuro de talio, antimoniuro de talio, sulfuro de plomo, selenuro de plomo, telururo de plomo, sulfuro de hierro, selenuro de indio, sulfuro de indio, telururo de indio, sulfuro de galio, selenuro de galio, telururo de galio, selenuro de estaño, telururo de estaño, sulfuro de estaño, sulfuro de magnesio, selenuro de magnesio, telururo de magnesio o una mezcla de los mismos. El óxido de metal puede ser un óxido de metal mixto, tal como, por ejemplo, ITO. En un dispositivo, una capa de óxido de metal puro (es decir, un óxido de metal con un único metal esencialmente puro) puede desarrollar regiones cristalinas con el tiempo, degradando el rendimiento del dispositivo. Un óxido de metal mixto puede ser menos propenso a formar tales regiones cristalinas, proporcionando vidas útiles de dispositivo más duraderas que las disponibles con óxidos de metal puro. El óxido de metal puede ser un óxido de metal dopado, en el que el dopaje es, por ejemplo, una deficiencia de oxígeno, un dopante halógeno o un metal mixto. El semiconductor inorgánico puede incluir un dopante. En general, el dopante puede ser un dopante de tipo p o uno de tipo n. Una HTL puede incluir un dopante de tipo p, mientras que una ETL puede incluir un dopante de tipo n.

Los semiconductores inorgánicos cristalinos simples se han propuesto para el transporte de carga a los nanocristales semiconductores en los dispositivos. Los semiconductores inorgánicos cristalinos simples se depositan por técnicas que requieren calentar el sustrato que ha de recubrirse a una temperatura alta. Sin embargo, Los semiconductores de capa superior deben depositarse directamente en la capa de nanocristal, que no es resistente a los procesos a temperatura alta, ni adecuada para un crecimiento epitaxial sencillo. Las técnicas epitaxiales (tales como la deposición química de vapor) también pueden resultar costosas de fabricar y generalmente no pueden usarse para cubrir un gran área, (es decir, mayor que una oblea de 12 pulgadas de diámetro).

De manera ventajosa, el semiconductor inorgánico puede depositarse en un sustrato a una temperatura baja, por ejemplo, por pulverización catódica. La pulverización catódica se realiza aplicando una alta tensión a lo largo de un gas a baja presión (por ejemplo, argón) para crear un plasma de electrones e iones de gas en un estado de alta energía. Los iones del plasma energizado alcanzan un objetivo del material de recubrimiento deseado, haciendo que los átomos de ese objetivo se expulsen con la suficiente energía para desplazarse hasta, y enlazarse con, el sustrato.

El sustrato o el dispositivo que se está fabricando se enfría o se calienta para un control de temperatura durante el proceso de crecimiento. La temperatura afecta a la cristalinidad del material depositado y a cómo interactúa esta con la superficie en el que se está depositando. El material depositado puede ser policristalino o amorfo. El material depositado puede tener dominios cristalinos con un tamaño en el intervalo de 10 ángstroms a 1 micrómetro. La concentración de dopaje puede controlarse variando el gas o la mezcla de gases, que se usa para el plasma de pulverización catódica. La naturaleza y el grado de dopaje pueden influir en la conductividad de la película depositada, así como en su capacidad para inactivar de manera óptica los excitones colindantes. Al hacer crecer un material encima de otro, pueden crearse diodos p-n o p-i-n. El dispositivo puede optimizarse para suministrar carga a una monocapa de nanocristal semiconductor.

Las capas pueden depositarse en una superficie de uno de los electrodos por recubrimiento por centrifugación, recubrimiento por inmersión, deposición de vapor, pulverización catódica u otros métodos de deposición de película delgada. El segundo electrodo puede intercalarse, someterse a pulverización catódica o evaporarse en la superficie expuesta de la capa sólida. Puede definirse un patrón en uno o ambos electrodos. Los electrodos del dispositivo pueden conectarse a una fuente de tensión por vías eléctricamente conductivas. Tras la aplicación de la tensión, el dispositivo genera luz.

La impresión por microcontacto proporciona un método para aplicar un material a una región predefinida en un sustrato. La región predefinida es una región en el sustrato en el que se aplica el material de manera selectiva. El material y el sustrato pueden escogerse de tal manera que el material permanezca esencialmente en su totalidad dentro del área predeterminada. Al seleccionar una región predefinida que forma un patrón, puede aplicarse material al sustrato de manera que el material forme un patrón. El patrón puede ser un patrón regular (tal como un conjunto o una serie de líneas) o un patrón irregular. Una vez que el patrón del material se forma en el sustrato, el sustrato puede tener una región que incluya el material (la región predefinida) y una región esencialmente libre de material. En algunas circunstancias, el material forma una monocapa en el sustrato. La región predefinida puede ser una región discontinua. En otras palabras, cuando el material se aplica a la región predefinida del sustrato, las localizaciones que incluyen el material pueden separarse por otras localizaciones que están esencialmente libres del material.

En general, la impresión por microcontacto se inicia formando un molde con patrón. El molde tiene una superficie con un patrón de elevaciones y depresiones. Se forma un sello con un patrón complementario de elevaciones y

depresiones, por ejemplo, recubriendo la superficie con patrón del molde con un precursor polimérico líquido que se cura mientras está en contacto con la superficie del molde con patrón. Posteriormente, el sello puede entintarse; es decir, el sello entra en contacto con un material que ha de depositarse es un sustrato. El material se adhiere de manera reversible al sello. Posteriormente, el sello entintado entra en contacto con el sustrato. Las regiones elevadas del sello pueden entrar en contacto con el sustrato mientras que las regiones deprimidas del sello pueden separarse del sustrato. Allí donde el sello entintado entra en contacto con el sustrato, el material de tinta (o al menos una porción del mismo) se transfiere desde el sello hasta el sustrato. De esta manera, el patrón de elevaciones y depresiones se transfiere desde el sello hasta el sustrato como regiones que incluyen el material y que están libres del material en el sustrato. La impresión por microcontacto y las técnicas relacionadas se describen, por ejemplo, en las patentes de EE. UU. n.ºs 5.512.131; 6.180.239; y 6.518.168. En algunas circunstancias, el sello puede ser un sello sin características distintivas que tiene un patrón de tinta, en el que el patrón se forma cuando la tinta se aplica al sello. Véase la solicitud de patente de EE. UU. n.º 11/253.612, presentada el 21 de octubre del 2005. Adicionalmente, la tinta puede tratarse (por ejemplo, química o térmicamente) antes de transferir la tinta desde el sello hasta el sustrato. De esta manera, la tinta con patrón puede exponerse a condiciones que son incompatibles con el sustrato.

La FIG. 2 representa un diagrama de flujo que resume las etapas básicas en el proceso de impresión por microcontacto. Primero, se hace un maestro de silicio usando técnicas convencionales de procesamiento de semiconductor que definen un patrón en la superficie de silicio, por ejemplo, un patrón de elevaciones y depresiones (como alternativa, para una deposición sin patrón, puede usarse un maestro de Si sin diseñar). Posteriormente, los precursores de polidimetilsiloxano (PDMS, por ejemplo, Sylgard 184) se mezclan, se desgasifican, se vierten en el maestro y se vuelven a desgasificar y se les permite curarse a temperatura ambiente (o por encima de la temperatura ambiente, para tiempos de curado más rápidos) (etapa 1). El sello de PDMS, que tiene una superficie que incluye el patrón del maestro de silicio, se libera posteriormente del maestro y se corta con la forma y tamaño deseados. Posteriormente, este sello se recubre con una capa de química superficial, seleccionada para adherirse fácilmente y liberar la tinta según se necesite. Por ejemplo, la capa de química superficial puede ser una capa de parileno-C de deposición química de vapor. La capa de química superficial puede ser, por ejemplo, de un espesor de 0,1 a 2 µm, según el patrón que haya de reproducirse (etapa 2). Posteriormente, el sello se entinta, por ejemplo, recubriendo por centrifugación, dispensando por bomba de jeringa o imprimiendo por chorros de tinta una solución de nanocristales semiconductores (etapa 3). La solución puede tener, por ejemplo, una concentración de 1-10 mg/mL en cloroformo. La concentración puede variar según el resultado deseado. Posteriormente, el sello entintado puede entrar en contacto con un sustrato, y puede aplicarse una leve presión durante, por ejemplo, 30 segundos para transferir la tinta (es decir, una monocapa de nanocristal semiconductor) completamente hasta el nuevo sustrato (etapa 4). Las FIG. 2A y 2B representan la preparación de un sustrato de vidrio recubierto de ITO. Una capa de transporte de huecos y/o de inyección de huecos (HTL e HIL, respectivamente) que incluye un semiconductor orgánico se evapora térmicamente en el sustrato de ITO. La capa de nanocristal semiconductor con patrón se transfiere a esta capa de HTL y el resto del dispositivo (por ejemplo, la capa de transporte de electrones (HTL), la capa de inyección de electrones (EIL) y los electrodos, según se desee) puede añadirse posteriormente (etapa 5). Véanse, por ejemplo, las solicitudes de patente de EE. UU. n.ºs 11/253.595 y 11/253.612, ambas presentadas el 21 de octubre del 2005 y 11/032.163, presentada el 11 de enero del 2005.

Cuando un nanocristal absorbe un fotón, aparece un par electrón-hueco excitado. La longitud de onda de absorción se relaciona con la banda prohibida efectiva del material semiconductor confinado cuánticamente. La banda prohibida es una función del tamaño, forma, material y configuración del nanocristal. Los nanocristales que tienen diámetros pequeños pueden tener propiedades intermedias entre formas moleculares o granulares de materia. Por ejemplo, los nanocristales que se basan en materiales semiconductores que tienen diámetros pequeños pueden exhibir un confinamiento cuántico tanto del electrón como del hueco en todas las tres dimensiones, lo que lleva a un aumento en la banda prohibida efectiva del material con un tamaño de cristalita descendente. En consecuencia, tanto la emisión como la absorción óptica de nanocristales cambia al azul o a energías más altas, a medida que disminuye el tamaño de las cristalitas.

El semiconductor que forma los nanocristales puede incluir un compuesto del grupo II-VI, un compuesto del grupo II-V, un compuesto del grupo III-VI, un compuesto del grupo III-V, un compuesto del grupo IV-VI, un compuesto del grupo I-III-VI, un compuesto del grupo II-IV-VI o un compuesto del grupo II-IV-V, por ejemplo, ZnO, ZnS, ZnSe, ZnTe, CdO, CdS, CdSe, CdTe, MgO, MgS, MgSe, MgTe, HgO, HgS, HgSe, HgTe, AlN, AlP, AlAs, AlSb, GaN, GaP, GaAs, GaSb, InN, InP, InAs, InSb, TiN, TiP, TiAs, TiSb, TlSb, PbS, PbSe, PbTe o mezclas de los mismos.

Los métodos para preparar nanocristales semiconductores monodispersos incluyen pirólisis de reactivos organometálicos, tales como cadmio de dimetilo, inyectado en un disolvente coordinante caliente. Esto permite una nucleación discreta y da lugar al crecimiento controlado de cantidades macroscópicas de nanocristales. La preparación y manipulación de nanocristales se describe, por ejemplo, en la patente de EE. UU. 6.322.901 y 6.576.291 así como en la solicitud de patente de EE. UU. n.º 60/550.314. El método para fabricar un nanocristal es un proceso de crecimiento coloidal. El crecimiento coloidal ocurre al inyectar rápidamente un dador M y un dador X en un disolvente coordinante caliente. La inyección produce un núcleo que puede hacerse crecer de manera controlada para formar un nanocristal. La mezcla de reacción puede calentarse levemente para hacer crecer e hibridar el nanocristal. Tanto el tamaño medio como la distribución de tamaño de los nanocristales en una muestra

dependen de la temperatura de crecimiento. La temperatura de crecimiento necesaria para mantener un crecimiento continuo aumenta con el tamaño medio de cristal en aumento. El nanocristal es un miembro de una población de nanocristales. Como resultado de la nucleación discreta y el crecimiento controlado, la población de nanocristales obtenida tiene una distribución de diámetros monodispersa y reducida. También puede hacerse referencia a la distribución de diámetros monodispersa como tamaño. El proceso de crecimiento controlado e hibridación de los nanocristales en el disolvente coordinante que sigue a la nucleación también puede dar lugar a una derivación superficial uniforme y a estructuras nucleares regulares. A medida que se amola la distribución de tamaño, la temperatura puede elevarse para mantener un crecimiento continuo. Al añadir más dadores M o dadores X, el periodo de crecimiento puede acortarse.

El dador M puede ser un compuesto inorgánico, un compuesto organometálico o un metal elemental. M es cadmio, cinc, magnesio, mercurio, aluminio, galio, indio o talio. El dador X es un compuesto capaz de reaccionar con el dador M para formar un material con la fórmula general MX. Habitualmente, el dador X es un dador de calcogenuro o un dador de pnicturo, tal como un calcogenuro de fosfina, un bis(silil) calcogenuro, dioxígeno, una sal de amonio o un tris(silil) pnicturo. Los dadores X adecuados incluyen dioxígeno, bis(trimetilsilil) selenuro ((TMS)₂Se), selenuros de trialquil fosfina tales como selenuro de (tri-n-octilfosfina) (TOPSe) o selenuro de (tri-n-butilfosfina) (TBPSe), telururos de trialquil fosfina tales como telururo de (tri-n-octilfosfina) (TOPTe) o telururo de hexapropilfosforotriamida (HPPTTe), bis(trimetilsilil)telururo ((TMS)₂Te), bis(trimetilsilil)sulfuro ((TMS)₂S), un sulfuro de trialquil fosfina tal como sulfuro de (tri-n-octilfosfina) (TOPS), una sal de amonio tal como un haluro de amonio (por ejemplo, NH₄Cl), tris(trimetilsilil) fosfuro ((TMS)₃P), tris(trimetilsilil) arseniuro ((TMS)₃As), o tris(trimetilsilil) antimoniuro ((TMS)₃Sb). En algunas realizaciones, el dador M y el dador X pueden ser restos dentro de la misma molécula.

Un disolvente coordinante puede ayudar a controlar el crecimiento del nanocristal. El disolvente coordinante es un compuesto que tiene un par solitario de dadores que, por ejemplo, tiene un par de electrones solitarios disponibles para coordinarse a una superficie del nanocristal en crecimiento. La coordinación del disolvente puede estabilizar el nanocristal en crecimiento. Los disolventes coordinantes habituales incluyen alquil fosfinas, óxidos de alquil fosfina, ácidos fosforosos de alquilo o ácidos fosfínicos de alquilo, sin embargo, otros disolventes coordinantes, tales como piridinas, furanos y aminas también pueden ser adecuados para la producción de nanocristales. Entre los ejemplos de disolventes coordinantes adecuados se incluye la piridina, tri-n-octil fosfina (TOP), óxido de tri-n-octil fosfina (TOPO) y tris-hidroxilpropilfosfina (tHPP). Puede usarse TOPO de grado técnico.

La distribución de tamaño durante la etapa de crecimiento de la reacción puede estimarse observando los anchos de línea de absorción de las partículas. La modificación de la temperatura de reacción en respuesta a los cambios en el espectro de absorción de las partículas permite mantener una distribución de tamaño de partículas amolada durante el crecimiento. Pueden añadirse reactantes a la solución de nucleación durante el crecimiento de cristales para hacer crecer cristales más grandes. Al detener el crecimiento en un diámetro medio particular de nanocristal y escoger la composición correcta del material de semiconducción, los espectros de emisión de los nanocristales pueden ajustarse continuamente en el intervalo de longitud de onda de 300 nm a 5 micrones o de 400 nm a 800 nm para CdSe y CdTe. El nanocristal tiene un diámetro de menos de 150 Å (10 Å=1 nm). Una población de nanocristales tiene diámetros medios en el intervalo de 15 Å a 125 Å.

El nanocristal puede ser un miembro de una población de nanocristales que tiene una distribución de tamaño reducida. El nanocristal puede ser una esfera, bastoncillo, disco o de otra forma. El nanocristal puede incluir un núcleo de un material semiconductor. El nanocristal puede incluir un núcleo que tenga la fórmula MX, en la que M es cadmio, cinc, magnesio, mercurio, aluminio, galio, indio, talio o mezclas de los mismos y X es oxígeno, sulfuro, selenio, telurio, nitrógeno, fósforo, arsénico, antimonio o mezclas de los mismos.

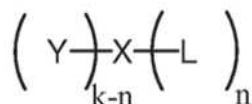
El núcleo puede tener un sobrerrecubrimiento en una superficie del núcleo. El sobrerrecubrimiento puede ser un material semiconductor que tenga una composición diferente de la composición del núcleo. El sobrerrecubrimiento de un material semiconductor en una superficie del nanocristal puede incluir un compuesto del grupo II-VI, un compuesto del grupo II-V, un compuesto del grupo III-VI, un compuesto del grupo III-V, un compuesto del grupo IV-VI, un compuesto del grupo I-III-VI, un compuesto del grupo II-IV-VI y un compuesto del grupo II-IV-V, por ejemplo, ZnO, ZnS, ZnSe, ZnTe, CdO, CdS, CdSe, CdTe, MgO, MgS, MgSe, MgTe, HgO, HgS, HgSe, HgTe, AlN, AlP, AlAs, AlSb, GaN, GaP, GaAs, GaSb, InN, InP, InAs, InSb, TiN, TiP, TiAs, TiSb, TlSb, PbS, PbSe, PbTe o mezclas de los mismos. Por ejemplo, pueden hacerse crecer sobrerrecubrimientos de ZnS, ZnSe o CdS en nanocristales de CdSe o CdTe. Un proceso de sobrerrecubrimiento se describe, por ejemplo, en la patente de EE. UU. 6.322.901. Al ajustar la temperatura de la mezcla de reacción durante el sobrerrecubrimiento y observar el espectro de absorción del núcleo, pueden obtenerse materiales sobrerrecubiertos que tienen eficiencias cuánticas de alta emisión y distribuciones de tamaño reducidas. El sobrerrecubrimiento puede ser de entre 1 y 10 monocapas de espesor.

La distribución de tamaño de partículas puede refinarse más por una precipitación selectiva de tamaño con un disolvente pobre para los nanocristales, tal como metanol/butanol tal y como se describe en la patente de EE. UU. 6.322.901. Por ejemplo, los nanocristales pueden dispersarse en una solución de 10 % de butanol en hexano. El metanol puede añadirse gota a gota a esta solución de agitación hasta que persista la opalescencia. La separación del sobrenadante y el floculante por centrifugación produce un precipitado enriquecido con las cristalitas más grandes en la muestra. Este procedimiento puede repetirse hasta que ya no se perciba ninguna amoladura del

espectro de absorción óptica. La precipitación selectiva de tamaño puede llevarse a cabo en una variedad de pares disolvente/no disolvente, que incluyen piridina/hexano y cloroformo/metanol. La población de nanocristales seleccionados por tamaño puede tener una desviación de no más del 15 % de media cuadrática de diámetro medio, preferentemente una desviación del 10 % de media cuadrática o menos, y más preferentemente una desviación del 5 % de media cuadrática o menos.

La superficie exterior del nanocristal puede incluir compuestos derivados del disolvente coordinante usado durante el proceso de crecimiento. La superficie puede modificarse por una exposición repetida a un exceso de un grupo coordinante competidor. Por ejemplo, una dispersión del nanocristal terminal puede tratarse con un compuesto orgánico coordinante, tal como piridina, para producir cristalitas que se dispersen fácilmente en piridina, metanol y aromáticos pero que ya no se dispersen en disolventes alifáticos. Tal proceso de intercambio superficial puede llevarse a cabo con cualquier compuesto capaz de coordinarse a o enlazarse con la superficie exterior del nanocristal, incluyendo, por ejemplo, fosfinas, tioles, aminas y fosfatos. El nanocristal puede exponerse a polímeros de cadena corta que exhiban una afinidad por la superficie y que terminen en un resto que tenga una afinidad por un medio de suspensión o dispersión. Tal afinidad mejora la estabilidad de la suspensión y disuade la floculación del nanocristal. Los compuestos coordinantes de nanocristal se describen, por ejemplo, en la patente de EE. UU. n.º 6.251.303.

Más específicamente, el ligando coordinante puede tener la fórmula:



en donde k es 2, 3 o 5 y n es 1, 2, 3, 4 o 5 de tal manera que k-n no es menor que cero; X es O, S, S=O, SO₂, Se, Se=O, N, N=O, P, P=O, As o As=O; cada uno de Y y L, independientemente, es arilo, heteroarilo o una cadena de hidrocarburo lineal o ramificada C₂₋₁₂ que contiene opcionalmente al menos un enlace doble, al menos un enlace triple o al menos un enlace doble y un enlace triple. La cadena de hidrocarburo puede sustituirse opcionalmente con uno o más alquilos C₁₋₄, alquenos C₂₋₄, alquinos C₂₋₄, alcoxi C₁₋₄, hidroxilo, halo, amino, nitro, ciano, cicloalquilo C₃₋₅, heterocicloalquilo de 3-5 miembros, arilo, heteroarilo, alquilcarboniloxi C₁₋₄, alquiloxicarbonilo C₁₋₄, alquilcarbonilo C₁₋₄ o formilo. La cadena de hidrocarburo también puede interrumpirse opcionalmente por -O-, -S-, -N(R^a)-, -N(R^a)-C(O)-O-, -O-C(O)-N(R^a)-, -N(R^a)-C(O)-N(R^b)-, -O-C(O)-O-, -P(R^a)-, o -P(O)(R^a)-. Cada una de las R^a y R^b, independientemente, es hidrógeno, alquilo, alquenoilo, alquinoilo, alcoxi, hidroxilalquilo, hidroxilo o haloalquilo.

Un grupo arilo es un grupo aromático cíclico sustituido o no sustituido. Entre los ejemplos se incluyen fenilo, bencilo, naftilo, tolilo, antracilo, nitrofenilo o halofenilo. Un grupo heteroarilo es un grupo arilo con uno o más heteroátomos en el anillo, por ejemplo, furilo, piridilo, pirrolilo, fenantrilo.

Un ligando coordinante adecuado puede adquirirse en el mercado o prepararse por técnicas orgánicas sintéticas ordinarias, por ejemplo, tal y como se describe en J. March, *Advanced Organic Chemistry*.

El microscopio electrónico de transmisión (TEM, por sus siglas en inglés) puede proporcionar información sobre el tamaño, forma y distribución de la población de nanocristales. Los patrones de difracción de rayos X de polvo (XRD, por sus siglas en inglés) pueden proporcionar la información más completa respecto al tipo y calidad de la estructura cristalina de los nanocristales. También son posibles estimaciones sobre el tamaño puesto que el diámetro de partícula está relacionado de manera inversa, a través de la longitud de coherencia de rayos X, al ancho de pico. Por ejemplo, el diámetro del nanocristal puede medirse directamente por el microscopio electrónico de transmisión o estimarse a partir de datos de difracción de rayos X usando, por ejemplo, la ecuación de Scherrer. También puede estimarse a partir del espectro de absorción UV/Vis.

Los dispositivos individuales pueden formarse en múltiples localizaciones en un único sustrato para formar un conjunto fotovoltaico. En algunas aplicaciones, el sustrato puede incluir una placa de circuito *backplane*. La placa de circuito *backplane* incluye un sistema electrónico activo o pasivo para controlar o conmutar potencia a o desde elementos individuales del conjunto. Incluir una placa de circuito *backplane* puede resultar útil para aplicaciones tales como pantallas de visualización, sensores o cámaras. En particular, la placa de circuito *backplane* puede estar configurada como una matriz activa, una matriz pasiva, un formato fijo, de accionamiento directo o híbrido. Véase, por ejemplo, la solicitud de patente de EE. UU. n.º 11/253.612, presentada el 21 de octubre del 2005.

El dispositivo puede fabricarse en un ambiente controlado (libre de oxígeno y libre de humedad), evitando la inactivación de la eficiencia del dispositivo durante el proceso de fabricación. Otras estructuras de multicapa pueden usarse para mejorar el rendimiento del dispositivo (véanse, por ejemplo, las solicitudes de patente de EE. UU. n.ºs 10/400.907 y 10/400.908, presentadas el 28 de marzo del 2003). Una capa de bloqueo, tal como una capa de bloqueo de electrones (EBL, por sus siglas en inglés), una capa de bloqueo de huecos (HBL, por sus siglas en inglés) o una capa de bloqueo de huecos y electrones (eBL, por sus siglas en inglés), puede introducirse en la

estructura. Una capa de bloqueo puede incluir 3-(4-bifenililo)-4-fenilo-5-terc-butilfenilo-1,2,4-triazol (TAZ), 3,4,5-trifenilo-1,2,4-triazol, 3,5-bis(4-terc-butilfenilo)-4-fenilo-1,2,4-triazol, batocuproína (BCP), 4,4',4"-tris(N-(3-metilfenilo)-N-fenilamino)trifenilamina (m-MTDATA), dioxitiofeno de polietileno (PEDOT), 1,3-bis(5-(4-difenilamino)fenilo-1,3,4-oxadiazol-2-ilo)benzeno, 2-(4-bifenililo)-5-(4-terc-butilfenilo)-1,3,4-oxadiazol, 1,3-bis[5-(4-(1,1-dimetiletil)fenilo)-1,3,4-oxadiazol-2-ilo]benzeno, 1,4-bis(5-(4-difenilamino)fenilo-1,3,4-oxadiazol-2-ilo)benzeno o 1,3,5-tris[5-(4-(1,1-dimetiletil)fenilo)-1,3,4-oxadiazol-2-ilo]benzeno.

El rendimiento de los dispositivos fotovoltaicos puede mejorarse aumentando su eficiencia. Véanse, por ejemplo, Bulovic *y col.*, *Semiconductors and Semimetals* 64, 255 (2000), Adachi *y col.*, *Appl. Phys. Lett.* 78, 1622 (2001), Yamasaki *y col.*, *Appl. Phys. Lett.* 76, 1243 (2000), Dirr *y col.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* 37, 1457 (1998) y D'Andrade *y col.*, *MRS Fall Meeting*, BB6.2 (2001). Los nanocristales pueden incluirse en dispositivos emisores de luz eficientes, híbridos y orgánicos/inorgánicos.

Los dispositivos individuales pueden formarse en múltiples localizaciones en un único sustrato para formar una pantalla de visualización. La pantalla de visualización puede incluir dispositivos que emitan a longitudes de onda diferentes. Al definir un patrón en el sustrato con conjuntos de diferentes nanocristales semiconductores emisores de color, puede formarse una pantalla de visualización que incluya píxeles de diferentes colores.

Para formar un dispositivo, un semiconductor de tipo p tal como, por ejemplo, NiO, puede depositarse en un electrodo transparente tal como un óxido de indio y estaño (ITO). El electrodo transparente puede disponerse en un sustrato transparente. Después, los nanocristales semiconductores se depositan usando una técnica de deposición de monocapa simple compatible con áreas grandes tal como la impresión por microcontacto o una técnica de Langmuir-Blodgett (LB). En consecuencia, se aplica un semiconductor de tipo n (por ejemplo, ZnO o TiO₂), por ejemplo, por pulverización catódica, encima de esta capa. Un electrodo semiconductor o de metal puede aplicarse sobre esta para completar el dispositivo. También son posibles estructuras de dispositivo más complicadas. Por ejemplo, puede incluirse una capa ligeramente dopada próxima a la capa de nanocristal.

El dispositivo puede ensamblarse haciendo crecer por separado las dos capas de transporte y aplicando físicamente los contactos eléctricos usando un elastómero tal como polidimetilsiloxano (PDMS). Esto evita la necesidad de una deposición directa del material en la capa de nanocristal.

El dispositivo puede tratarse térmicamente después de la aplicación de todas las capas de transporte. El tratamiento térmico puede potenciar, además, la separación de cargas de los nanocristales, así como eliminar los grupos terminales orgánicos en los nanocristales. La inestabilidad de los grupos terminales puede contribuir a la inestabilidad del dispositivo.

Las capas de transporte inorgánicas usadas, en particular, los materiales de metal-óxido pueden actuar como capas de barrera para evitar que el O₂ y H₂O entren en la capa de absorción del dispositivo (la capa de nanocristal semiconductor). La naturaleza protectora de la capa inorgánica puede proporcionar alternativas de diseño al acondicionamiento. Por ejemplo, puesto que la capa inorgánica puede ser una barrera al agua y/u oxígeno, el dispositivo puede construirse sin la necesidad de componentes adicionales para bloquear tales contaminantes y evitar que alcancen el material de absorción. Los recubrimientos de encapsulado tales como BARIX (fabricado por Vitex) se fabrican usando capas alternas de óxidos de metal y polímeros. En tales barreras, los óxidos de metal son las barreras al O₂ y H₂O y las capas de polímero aleatorizan las ocurrencias de defectos de burbujas de gas en las capas de óxido de metal. De este modo, usando los óxidos de metal como capas de transporte, el propio dispositivo funciona como una capa protectora para los nanocristales semiconductores.

Las FIG. 3A-3E muestran posibles estructuras del dispositivo. Estas suponen un diseño convencional de diodo p-n (FIG. 3A), un diseño de diodo p-i-n (FIG. 3B), un dispositivo transparente (FIG. 3C), un dispositivo invertido (FIG. 3D) y un dispositivo flexible (FIG. 3E). Debido a la sencillez del dispositivo flexible, es posible incorporar capas de deslizamiento, es decir, estructuras de tres capas de tipo óxido de metal/metal/óxido de metal, para cada capa de óxido de metal de capa simple. Esto ha demostrado aumentar la flexibilidad de películas delgadas de óxido de metal, aumentando la conductividad, y a la vez manteniendo la transparencia. Esto es porque las capas de metal, habitualmente de plata, son muy delgadas (aproximadamente 12 nm cada una) y, por lo tanto, no absorben mucha luz.

Ejemplos

Se depositó un electrodo de óxido de indio y estaño (ITO) de 60 nm de espesor en vidrio, usando pulverización catódica por radio frecuencia en un ambiente inerte de argón. Se usó una velocidad de crecimiento lenta y una baja presión para conseguir una película con menos de 5 nm de rugosidad superficial y calentar el sustrato permitido para un control preciso sobre la resistividad del ITO. 20 nm de óxido de níquel (NiO) fueron sometidos a pulverización catódica por radiofrecuencia encima del electrodo de ITO en argón y oxígeno, dando lugar a una capa de tipo p en la que el porcentaje de O₂ determina el número de sitios dadores de huecos de exceso. Los nanocristales de selenuro de cadmio y cinc (ZnCdSe) sintetizados de manera coloidal ajustados para tener una emisión en el rojo fueron sometidos, posteriormente, a recubrimiento por centrifugación en el NiO. Se usó una velocidad de centrifugación

5 lenta para conseguir varias monocapas de cobertura de nanocrystal a lo largo del área de dispositivo. Un óxido de cinc (ZnO) de aislamiento y un dióxido de estaño (SnO₂) conductivo fueron sometidos, posteriormente, a co-pulverización catódica en un ambiente de argón para obtener una película de 40 nm con una concentración de portadores similar a la del NiO. Después, se depositó un electrodo superior de plata; sin embargo, el dispositivo también puede prepararse sometiendo a pulverización catódica un electrodo superior de ITO o un óxido de indio y cinc igualmente conductivo.

10 La FIG. 4 muestra el espectro de eficiencia cuántica externa y características I-V del dispositivo. La curva de eficiencia cuántica externa dependiente de la longitud de onda mostró un pequeño pico a 625 nm, que demostraba que los nanocristales eran responsables de la absorción de la luz incidente. El diagrama de corriente-tensión muestra la respuesta a la corriente del dispositivo en la oscuridad y bajo iluminación. Las altas corrientes oscuras (curvas negras y azules) pueden atribuirse al hecho de que las capas de óxido de metal son delgadas. La tensión de circuito abierto de 0,2 resultó prometedora.

15 Otras realizaciones se encuentran dentro del alcance de las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Un dispositivo fotovoltaico que comprende:

5 una primera capa de transporte de carga que incluye un primer material inorgánico en contacto con un primer electrodo dispuesto para introducir carga en la primera capa de transporte de carga;
 una segunda capa de transporte de carga en contacto con un segundo electrodo, en donde el segundo electrodo está dispuesto para introducir carga en la segunda capa de transporte de carga; y
 10 una capa de absorción que comprende una pluralidad de nanocristales semiconductores dispuestos entre la primera capa de transporte de carga y la segunda capa de transporte de carga;
 en donde la pluralidad de nanocristales semiconductores es una población de nanocristales semiconductores que tienen una desviación de no más del 15 % de media cuadrática en diámetro medio;
 en donde la pluralidad de nanocristales semiconductores y al menos un electrodo tienen un desplazamiento de banda prohibida suficiente para transferir un portador de carga desde la pluralidad de nanocristales
 15 semiconductores hasta el primer electrodo o el segundo electrodo; y
 caracterizado por que la pluralidad de nanocristales semiconductores forman una multicapa de nanocristales.

20 2. El dispositivo fotovoltaico según la reivindicación 1, en donde el primer material inorgánico es amorfo o policristalino.

3. El dispositivo fotovoltaico según la reivindicación 1, en donde el primer material inorgánico es un semiconductor inorgánico.

4. El dispositivo fotovoltaico según la reivindicación 1, en donde la segunda capa de transporte de carga incluye un segundo material inorgánico.

5. El dispositivo fotovoltaico según la reivindicación 4, en donde el segundo material inorgánico es amorfo o policristalino.

30 6. El dispositivo fotovoltaico según la reivindicación 5, en donde el segundo material inorgánico es un semiconductor inorgánico.

7. El dispositivo fotovoltaico según una cualquiera de las reivindicaciones 3 y 6, en donde los semiconductores inorgánicos primero y/o segundo incluyen un calcogenuro de metal.

35 8. El dispositivo fotovoltaico según la reivindicación 7, en donde el calcogenuro de metal es un calcogenuro de metal mixto.

9. El dispositivo fotovoltaico según la reivindicación 8, en donde el calcogenuro de metal incluye un óxido de cinc, un óxido de titanio, un óxido de niobio, un sulfuro de cinc, un óxido de indio y estaño o una mezcla de los mismos.

40 10. El dispositivo fotovoltaico según una cualquiera de las reivindicaciones 1-9, en donde la primera capa de transporte de carga es una capa de transporte de huecos o una capa de transporte de electrones.

45 11. El dispositivo fotovoltaico según una cualquiera de las reivindicaciones 1-10, en donde el dispositivo es transparente.

12. Un método para formar un dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones 1-11, que comprende:

50 depositar una primera capa de transporte de carga que incluya un primer material inorgánico sobre un electrodo;
 depositar una capa de absorción que comprenda una pluralidad de nanocristales semiconductores sobre el electrodo, en donde la pluralidad de nanocristales semiconductores está en contacto eléctrico con la primera
 capa de transporte de carga; y
 55 depositar una segunda capa de transporte de carga que incluya un segundo material inorgánico sobre el electrodo, en donde la pluralidad de nanocristales semiconductores está en contacto eléctrico con la segunda
 capa de transporte de carga.

60 13. El método según la reivindicación 12, en donde depositar el primer material inorgánico incluye utilizar pulverización catódica.

14. Un método para generar corriente, que comprende:

65 exponer un dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones 1-11 a una longitud de onda de luz de excitación, en donde el dispositivo incluye:
 una primera capa de transporte de carga que incluye un primer material inorgánico en contacto con un primer electrodo dispuesto para introducir carga en la primera capa de transporte de carga;

una segunda capa de transporte de carga en contacto con un segundo electrodo, en donde el segundo electrodo está dispuesto para introducir carga en la segunda capa de transporte de carga; y
una capa de absorción que comprende una pluralidad de nanocristales semiconductores dispuestos entre la primera capa de transporte de carga y la segunda capa de transporte de carga.

5

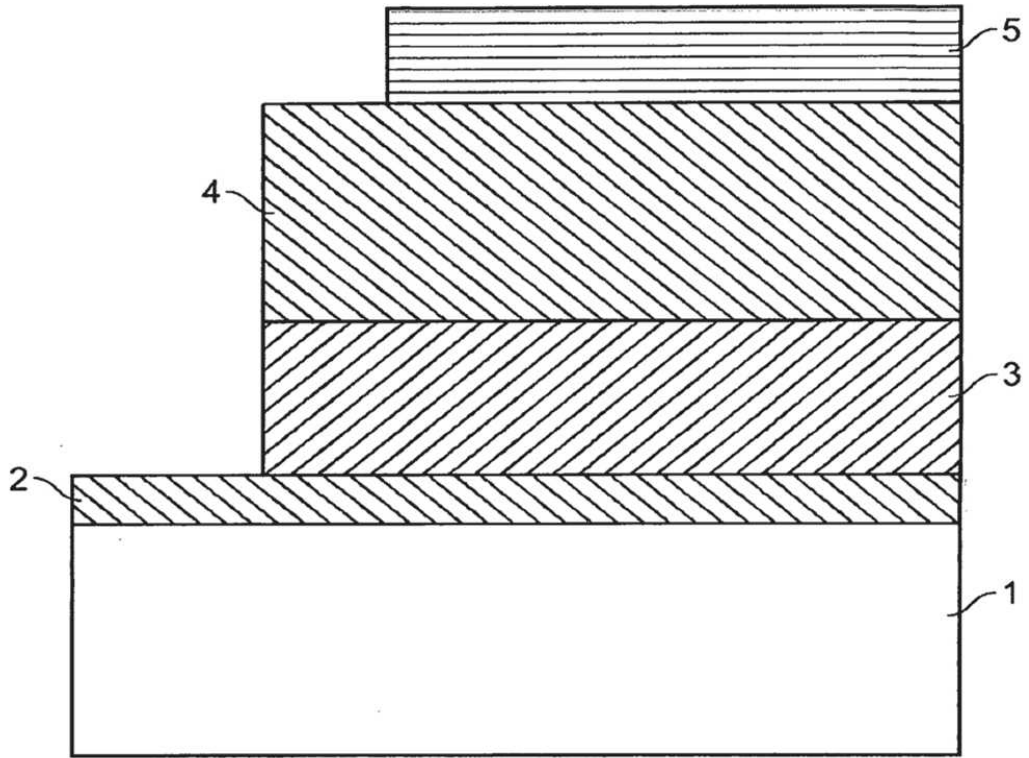


FIG. 1

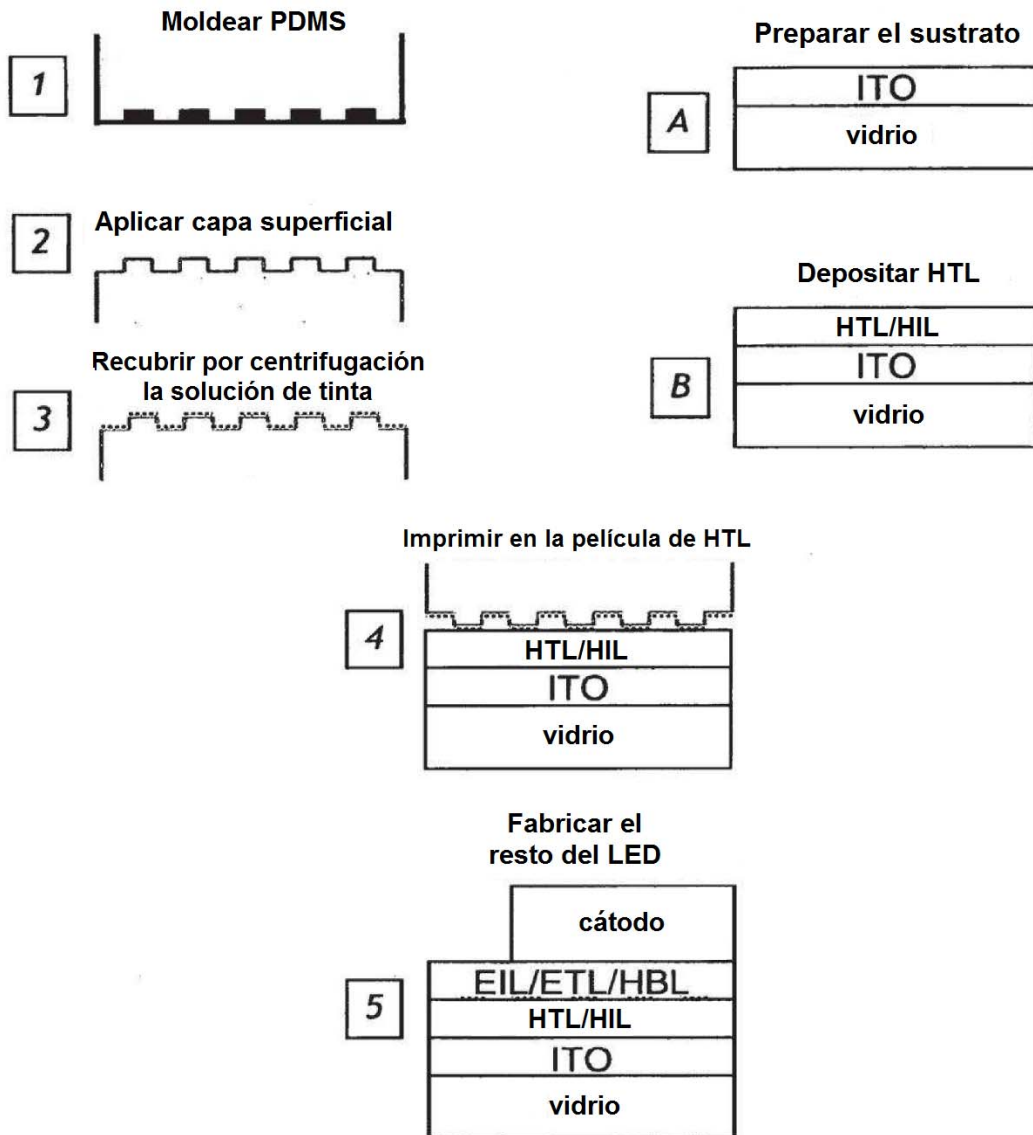
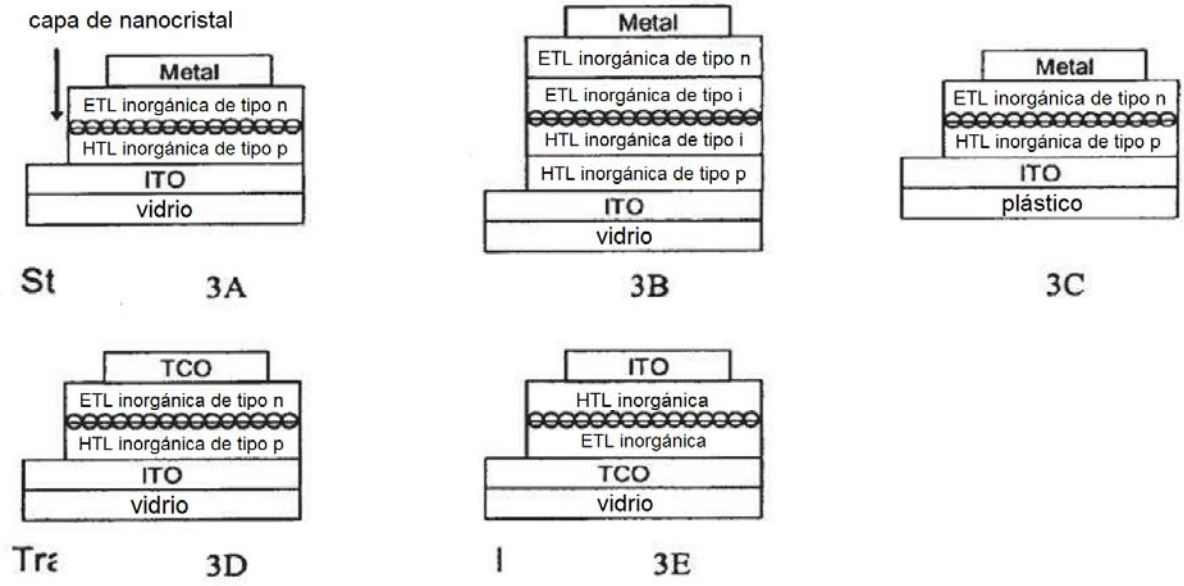


FIG. 2



FIGS. 3A-3E

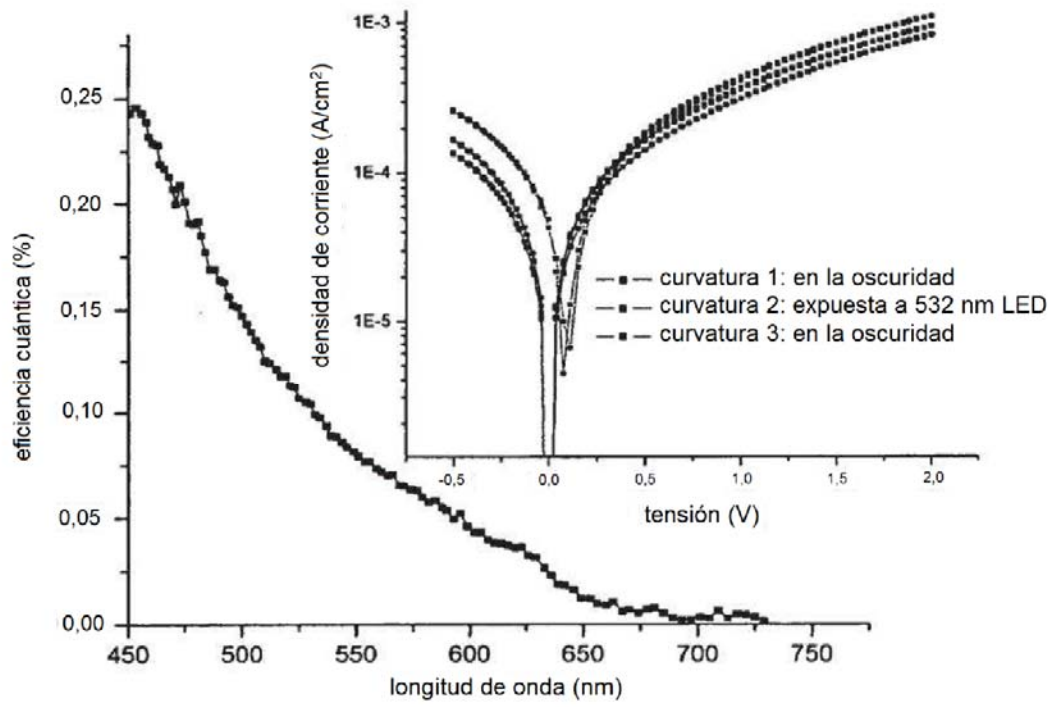


FIG. 4