

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 792 076**

51 Int. Cl.:

H01L 33/00 (2010.01)

H01L 33/08 (2010.01)

H01S 5/40 (2006.01)

H01L 25/075 (2006.01)

H01S 5/34 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **08.02.2017** **E 17382061 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **18.12.2019** **EP 3361516**

54 Título: **Dispositivo monolítico fuente de luz cuántica ajustable y circuito óptico cuántico del mismo**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
10.11.2020

73 Titular/es:

**CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES
CIENTÍFICAS (CSIC) (100.0%)
C/ Serrano 117
28006 Madrid, ES**

72 Inventor/es:

**ALÉN MILLÁN, BENITO;
FUSTER SIGNÉS, DAVID;
GONZÁLEZ DÍAZ, YOLANDA y
GONZÁLEZ SOTOS, LUISA**

74 Agente/Representante:

PONS ARIÑO, Ángel

ES 2 792 076 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 monolítico fuente de luz cuántica ajustable y circuito óptico cuántico del mismo

5 OBJETO DE LA INVENCION

El objeto de la invención se refiere al campo de la física, especialmente de la física cuántica.

10 La presente invención se dirige a una fuente de luz cuántica, más específicamente un dispositivo capaz de generar fotones únicos o pares de fotones entrelazados.

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

15 El desarrollo de las tecnologías de información cuántica es la quintaesencia del ámbito de las teorías cuánticas de luz y materia. Incluso hoy en día, después de muchos años de desarrollo de estas teorías, la mayoría de los dispositivos funcionan normalmente basados en teorías semiclásicas en donde un aspecto u otro (o ambos) se consideran un medio continuo.

20 Hasta hoy en día, incluso el transistor comercial más pequeño, a pesar de sus características de tamaño nanométrico, puede describirse razonablemente bien con ecuaciones clásicas de equilibrio y transporte de cargas. Lo mismo puede decirse de la mayor parte de los dispositivos emisores y detectores de luz en los que la luz se trata como una onda electromagnética continua. Aunque reconociendo el poder de la sofisticación de estas teorías y su increíble extensión de aplicación, es claro que, más pronto o más tarde, nuestra madurez tecnológica superará una barrera crítica, a partir de la que las propiedades cuánticas de la luz y la materia se explotarán con su pleno potencial.

25 En 2013, los habitantes de la Europa del Oeste, gastaron 215.000 millones de euros en transacciones comerciales a través de Internet y el 72 % de los usuarios llevaron a cabo alguna clase de transacción comercial en línea. La intención de la criptografía clásica y cuántica es desarrollar nuevos métodos y tecnologías que puedan preservar la privacidad y seguridad de los datos en las telecomunicaciones modernas.

30 El primer algoritmo basado en el cifrado de clave pública se promulgó hace más de 30 años por Rivest, Shamir y Adleman e, incluso hoy en día, se usa este algoritmo (RSA) para cifrar la mayor parte de la información sensible en Internet.

35 Es necesario entender que los mensajes cifrados en esa forma no son inviolables. Su descifrado es un problema matemático tedioso, pero no insuperable. Usando un método de factorización clásico, un ordenador de sobremesa moderno necesitaría varios milenios para descifrar un mensaje cifrado con una clave RSA de 256 bits. Sin embargo, la tarea sería mucho menos ardua si se usara para la tarea un algoritmo de factorización cuántica ejecutado en un ordenador cuántico. Aunque dicho resultado no puede esperarse pronto, la capacidad de estos ordenadores cuánticos está "in crescendo" con la demostración reciente de la factorización de números de cinco dígitos o 16 bits.

40 Alternativamente a los métodos de clave pública, la criptografía de libreta de un solo uso es segura contra adversarios con infinita potencia de computación. Siendo su único defecto que el método de intercambio de claves privadas debe demostrarse inquebrantable. Afortunadamente, la teoría de información cuántica no solo produce un problema, la quiebra de la seguridad de los algoritmos de clave pública, sino que también ofrece métodos "inviables" para el intercambio de claves privadas. El protocolo cuántico criptográfico mejor conocido es el BB84, que se basa en el "teorema de no clonación de estados cuánticos" que a su vez se deduce del principio de incertidumbre. La información codificada en un estado cuántico se modifica irreversiblemente durante el proceso de medición. Esto permite varios medios para que dos socios legítimos intercambien información codificada en estados cuánticos y que detecten cuando su privacidad ha sido comprometida. Esta propiedad exclusiva de los protocolos de información cuánticos permite el intercambio inviolable de claves absolutamente privadas entre interlocutores legítimos.

45 Para telecomunicaciones cuánticas, los estados cuánticos de la luz, tales como fotones únicos o pares de fotones entrelazados, son los portadores preferidos de la información cuántica. Para generarlos y manipularlos, numerosos grupos de investigación y compañías han invertido incontables esfuerzos para llevar las teorías de luz cuántica a aplicaciones y estas últimas a tecnologías. De hecho, los denominados "módems cuánticos" ya existen fuera del laboratorio como prototipos orientados a grandes compañías y clientes institucionales. Para popularizarlos, es necesario que dicha tecnología pase a través de ciclos de miniaturización e integración como ha ocurrido con otras tecnologías digitales desde la invención del procesador y la ley de Moore. La cuestión clave es cómo fabricar una fuente de luz cuántica fiable, integrada y escalable que se pueda usar en general en las nuevas tecnologías de información cuántica.

50 Las propiedades cuánticas de la luz se postularon por Einstein y Planck para explicar la radiación del cuerpo negro y el efecto fotoeléctrico al comienzo del siglo XX. Sin embargo, no ha sido hasta la década de los 70 cuando se

descubrió la primera evidencia experimental de la naturaleza cuántica de la luz que implicó la detección de fotones individuales. Se deduce de esta investigación pionera que, desde el punto de vista del observador local, un flujo de luz emitido por un estado cuántico individual de un átomo está compuesto de fotones únicos (fotones emitidos uno a uno), pero la mayor parte de las fuentes de luz no cumplen generalmente esta regla. Una simple forma de ver esto es que dos átomos individuales no relacionados presentes en una cierta fuente de luz pueden emitir dos fotones no relacionados simultáneamente.

Las siguientes décadas fueron fundamentales para el desarrollo de la teoría de información cuántica pero solo desde 1984, con la publicación del protocolo BB84, el advenimiento de Internet, y la creciente preocupación de la sociedad por la seguridad de las telecomunicaciones, la teoría y la tecnología de la información cuántica gradualmente alcanzaron su relevancia actual.

Hallar un sistema físico adecuado para desarrollar esta tecnología no es fácil. A pesar del éxito de experimentos sobre átomos e iones individuales, fue obvio que estos sistemas físicos no estaban dispuestos para adaptar los nuevos protocolos cuánticos a las tecnologías de telecomunicaciones existentes basadas en fuentes de luz de semiconductor y fibras ópticas. A mediados de los 90, usando moléculas individuales como emisores de luz cuántica, se abrió un nuevo camino mostrando que los sistemas físicos que consisten en muchos átomos también pueden emitir fotones si se excita cada vez un único electrón.

No fue hasta la llegada del nuevo siglo cuando se demostraron definitivamente las fuentes de fotones únicos en sistemas de estado sólido. Se demostró casi simultáneamente en centros de color en el diamante, puntos cuánticos de CdTe coloidal dispersos en vidrio, y puntos cuánticos de InAs crecidos sobre GaAs mediante métodos epitaxiales.

A lo largo de los años estos estudios se han hecho populares y las fuentes de luz cuántica se han demostrado en varios sistemas cuánticos que pueden clasificarse en tres categorías:

- I.- Emisores de luz cuántica basados en diversos materiales de semiconductor nanoestructurados en una matriz de semiconductor como GaAs, InP, GaN, y crecidos mediante métodos epitaxiales.
- II.- Emisores de luz cuántica basados en nanoestructuras y moléculas orgánicas e inorgánicas dispersas sobre sustratos sólidos o polímeros.
- III.- Emisores de luz cuántica basados en vacantes y defectos embebidos en cristales con una gran banda de energía prohibida tales como el diamante o el carburo de silicio.

Mencionar todos los trabajos y comparar sus resultados llevaría mucho más espacio del disponible en el presente documento de modo que cumpliremos con la comparación de puntos cuánticos InAs/GaAs, puntos cuánticos coloidales y nitrógeno-vacante sobre diamante como representativos de cada categoría. Los dos últimos funcionan con fluidez a temperatura ambiente, mientras que la mayor parte de las fuentes de luz cuánticas de la primera categoría requieren bajas temperaturas (< 77 K) para funcionar apropiadamente. La temperatura es una ventaja crucial para el objetivo tecnológico propuesto, pero no la única. Hay varios requisitos prácticos y fundamentales que determinan el potencial real de los diferentes enfoques para convertirse en una tecnología apropiada:

- Longitud de onda: Actualmente, las telecomunicaciones ópticas de media y larga distancia se realizan a través de fibras ópticas. La atenuación de la señal se mide en dB/km y es baja en el infrarrojo cercano e infrarrojo de longitud de onda corta, con un mínimo en 1,55 micras, y mucho más alta en los intervalos visible y ultravioleta. La emisión de puntos cuánticos basados en GaAs y basados en InP cubre el intervalo infrarrojo desde 850 a 1700 nm naturalmente. Otros sistemas emiten típicamente en el visible o UV.

- Integración: Las tecnologías de información óptica moderna se basan en circuitos integrados fotónicos en los que la generación (detección) de luz se empaqueta con componentes de procesamiento de señal en un único chip fotónico en el lado del transmisor (receptor). Es una industria que sigue los pasos de miniaturización de la industria electrónica. Las obleas de semiconductor y materiales epitaxiales ya se usan para fabricar emisores y detectores de luz, amplificadores de luz y también componentes pasivos, tales como guías de onda, usando tecnologías de fabricación micro-planar conocidas de la industria electrónica. El diamante, debido a su mayor dureza mecánica y estabilidad química, o puntos cuánticos coloidales, moléculas, nanotubos de carbono,... debido a su pobre durabilidad o resistencia al ambiente pueden no ser tan apropiados o fáciles de adaptar a los procesos de fabricación existentes a una escala industrial. Una excepción a esta regla es el SiC cuyo uso en electrónica y optoelectrónica es bien conocido.

- Capacidad para ser impulsado eléctricamente: Los primeros láseres de estado sólido se bombeaban con fuentes de luz externas que excitaban los electrones del medio activo a niveles de energía más altos. Los primeros láseres capaces de convertir energía eléctrica directamente en luz coherente se basaron en gases ionizados en los que circulaba corriente eléctrica entre los electrodos proporcionando la energía de excitación. Estas fuentes fueron aún instrumentos voluminosos hasta la invención de, primero, el diodo láser de doble heteroestructura y, posteriormente, el diodo láser de pozo cuántico. Estas fuentes de luz compactas, con bajo consumo de potencia y alta tasa de modulación, hicieron posible la conversión directa

de datos eléctricos en luz tal como se demandaba en las telecomunicaciones modernas. Es claro que si la intención es la integración y la miniaturización, las fuentes de luz cuánticas impulsadas eléctricamente hechas de materiales semiconductores duraderos y fácilmente fabricados, incluyendo OLED, ofrecen grandes ventajas sobre otras alternativas que no están tan desarrolladas en este aspecto.

5 - Indistinguibilidad de los fotones: La indistinguibilidad de los fotones individuales emitidos por la fuente es un parámetro esencial en los algoritmos de procesamiento cuántico y también en los protocolos de criptografía cuántica. La indistinguibilidad se mide como la ausencia de diferencias entre paquetes de ondas que describen dos fotones de la misma fuente. Su enemigo son los desplazamientos de fase aleatorios provocados por el ambiente durante el proceso de generación (desfase puro).

10 Los electrones responsables de la emisión de fotones en un entorno de estado sólido se someten a interacciones no deseadas entre ellos mismos y con otras excitaciones de la matriz cristalina (es decir fonones) que amplía el ancho de la línea de emisión (medida en hercios) del fotón emitido más allá de la inversa de su vida media (este último sería un fotón idealmente por transformada de Fourier). El ancho de línea de los fotones emitidos por impurezas en el diamante a temperatura ambiente es varios órdenes de magnitud más alto que los emitidos por excitones confinados en puntos cuánticos de InAs. Disminuyendo las temperaturas a 1,8 K, ambos se hacen comparables, pero entonces el diamante pierde su principal ventaja tecnológica (operación a temperatura ambiente) sobre los emisores cuánticos epitaxiales.

15 Las ventajas exclusivas de los emisores de luz cuántica de la categoría I se aprovecharon por Toshiba Laboratories (Cambridge) en 2002. Poco después de la demostración de la emisión del fotón único en puntos cuánticos de InAs/GaAs, los Toshiba Labs. desarrollaron la primera fuente monolítica de luz cuántica basada en inyección eléctrica directa. El diseño de Toshiba consistió en un único diodo p-i-n en cuya región intrínseca se hicieron crecer puntos cuánticos autoensamblados de InGaAs mediante epitaxia por haces moleculares (MBE). Aplicando una polarización directa al diodo, se inyectaron los portadores mayoritarios desde capas dopadas a los puntos cuánticos produciendo luz. Si la luz de un único punto cuántico se filtra espacial y espectralmente, el resultado es una fuente de luz cuántica con inyección eléctrica.

20 El diseño presentado y validado por Toshiba en el documento US2002196827A1 presenta grandes ventajas sobre la excitación mediante una fuente de luz externa (especialmente en términos de consumo de energía e integración del sistema) y también plantea algunos problemas descritos en la sección a continuación y que nuestra propuesta se dirige a remediar. Con unas pocas variaciones, el diseño p-i-n de Toshiba se ha usado para fabricar fuentes de luz cuántica monolítica con diferentes materiales de categoría I. En las otras categorías, este diseño se ha replicado gradualmente explorando la factibilidad de la generación en línea de potencia de luz cuántica en un intervalo más amplio de materiales.

25 El diseño de los Toshiba Labs (2002) permanece inamovible y aunque se ha mejorado, por sí mismos y por otros, para incrementar la eficiencia o para producir pares de fotones entrelazados, todos los desarrollos posteriores se basan en un dispositivo de dos terminales con una única región activa que contiene puntos cuánticos / defectos y dos regiones dopadas para inyectar portadores eléctricos desde ella.

El diseño de dos terminales tiene varias desventajas:

30 1. Control conflictivo de varios parámetros clave: Un campo eléctrico externo es un recurso valioso para controlar la longitud de onda de emisión y el estado de carga de los emisores de luz cuántica de categoría I a través del efecto Stark cuántico confinado y la carga de Coulomb capacitiva, respectivamente. Un diseño basado en una única unión p-i-n hace difícil, cuando no imposible, controlar el estado de carga del emisor y/o su longitud de onda de emisión independientemente de la corriente eléctrica inyectada en el dispositivo. Como se ve en los trabajos pioneros de Toshiba, el emisor de luz cuántica opera a una única longitud de onda solamente para las corrientes más bajas (<80 nA). Para corrientes más altas, aparecen nuevas líneas de emisión a energías más bajas y para corrientes de emisión más altas se convierte en un espectro continuo. En la práctica esto significaría la aparición de nuevas fuentes de luz y la emisión de más de un único fotón simultáneamente. Esto dificulta el control sobre el brillo de la fuente de luz cuántica debido a que el número de fotones por segundo, determinado por la corriente inyectada, no puede variarse mucho sin afectar a la longitud de onda o carácter cuántico de los fotones emitidos. Este inconveniente es compartido por todas las fuentes de luz cuántica impulsadas eléctricamente basadas en el diseño de Toshiba.

35 2. Rendimiento limitado en membranas ultrafinas: el diseño de dos terminales no puede aplicarse fácilmente a situaciones en las que los puntos cuánticos están embebidos en membranas ultrafinas. Un ejemplo de la primordial importancia práctica es la fabricación de fuentes de luz cuántica impulsadas eléctricamente basadas en microcavidades de cristal fotónico (PCM) embebiendo, por ejemplo, puntos cuánticos. Las PCM son un componente crucial en la fotónica cuántica integrada que incrementa el brillo de una fuente de luz cuántica por medio del efecto Purcell (acoplamiento luz-materia débil). Son también fundamentales para desarrollar repetidores cuánticos e interfaces espín-fotón basadas en electrodinámica cuántica de cavidad (acoplamiento luz-materia fuerte). En ambos

casos, la sintonía espectral entre el modo de cavidad y la energía del emisor de luz cuántica es crucial. Algunos grupos han usado dispositivos de dos terminales para controlar mediante un campo eléctrico externo la longitud de onda de emisión de los emisores de luz cuántica embebidos en dichas microcavidades (efecto Stark). También, se ha demostrado la electroluminiscencia amplia y débil a partir de una colección de emisores de luz cuántica embebidos en una PCM.

También, a pesar del gran potencial de las PCM para fotónica cuántica integrada, las fuentes de luz cuántica impulsadas eléctricamente son muy difíciles de embeber en las PCM. La razón es que el cristal fotónico es extremadamente sensible a su entorno dieléctrico y, por lo tanto, los electrodos metálicos no pueden depositarse encima de la PCM sin reducir drásticamente su factor de calidad (un parámetro crucial para ambas aplicaciones mencionadas anteriormente). Debido a esta restricción fundamental, los electrodos metálicos deben depositarse fuera de los límites del PC (típicamente ~20 micras o más) incrementando ampliamente la trayectoria que necesitan recorrer los portadores mayoritarios antes de llegar al emisor cuántico (localizado en el centro de la PCM). Aunque ~20 micras es una distancia razonable para la mayor parte de las aplicaciones optoelectrónicas, las PCM relevantes en este caso se fabrican sobre una membrana de ~100 nm de grosor que, de acuerdo con el diseño de dos terminales, debe contener la estructura p-i-n de inyección de portadora. En dicho caso, las capas dopadas solo pueden ser de ~30 nm de grueso haciendo la resistencia de la lámina no solo intrínsecamente alta sino también perjudicada por el proceso de fabricación del PC. Por lo tanto, dicho dispositivo ha sido explorado principalmente como un medio para controlar la longitud de onda del emisor de luz cuántica mediante la aplicación de un campo eléctrico en polarización inversa. En este caso la corriente de portadores mayoritarios ni es necesaria ni juega un papel.

Otro campo de aplicación en donde los emisores de luz cuántica se benefician del uso de membranas ultrafinas se refiere al diseño del estrés de los estados cuánticos. Esto es particularmente relevante para la producción de pares de fotones entrelazados (EPP) usando emisores de luz cuántica de tipo I y III. Como emisores crecidos generalmente no emiten EPP a menos que sus simetrías cristalinas rotas se restauren mediante la aplicación de un campo externo en el plano de crecimiento. El uso de membranas ultrafinas hace posible diseñar esos estados con fuerzas mecánicas moderadas aplicadas externamente (inducidas típicamente por transductores piezoeléctricos). La adición de inyección de portadora impulsada eléctricamente y el diseño del estrés en un dispositivo monolítico impactará en el desarrollo de fuentes de luz cuántica, repetidores y memorias cuánticos, y con los diseños existentes, se perjudica también por la alta resistencia de la lámina de las membranas ultrafinas como se ha explicado anteriormente.

La misma desventaja dificulta el desarrollo de sensores cuánticos integrados basados en voladizos de consulta, membranas y otros resonadores nano-optomecánicos ultrafinos con luz cuántica.

3. Integración del sistema limitada: los circuitos fotónicos cuánticos integrados (IQPC), justamente como cualquier otro circuito fotónico integrado, se basan en la integración de múltiples funcionalidades sobre un único chip. Las fuentes de luz y memorias cuánticas impulsadas eléctricamente son solo los dos primeros de una larga lista de componentes pasivos y activos que incluyen guías de onda, moduladores de fase, detectores de luz, resonadores optomecánicos,... Las fuentes de luz cuántica basadas en el diseño de dos terminales presentan un control conflictivo de varios parámetros claves y un rendimiento limitado en membranas ultrafinas que perjudica la integración de estos componentes monolíticos en IQPC. En un grado mayor que los átomos e iones atrapados, las fuentes y memorias de luz cuántica basadas en sistemas de estado sólido sufren de una ampliación no homogénea provocada por fluctuaciones estadísticas de sus propiedades y/o en su entorno. Para aplicaciones de circuitos fotónicos cuánticos, deben ajustarse diferentes componentes independientemente y, para el IQPC final, esto debe realizarse localmente usando sabiamente el espacio disponible. Como se ha expuesto en 1, el diseño de dos terminales carece de suficiente flexibilidad para cambiar parámetros clave, como la longitud de onda de la fuente de luz cuántica o el brillo, de una forma independiente (requisitos de ajuste) o, como se ha expuesto en 2, no puede implementarse fácilmente sobre membranas de cristales fotónicos o componentes ultrafinos en general (requisitos de espacio). Estos son solamente unos pocos ejemplos de los muchos problemas que un diseño monolítico rediseñado puede mitigar como se explica en la descripción de la sección de invención a continuación.

Técnica anterior para dispositivos de fuentes de luz cuántica monolíticos

En el diseño original de Toshiba, se inyectaron portadores desde capas dopadas de un diodo p-i-n para generar directamente "electroluminiscencia en los emisores de luz cuántica embebidos". La intensidad de la electroluminiscencia se controló variando la polarización del dispositivo y las propiedades cuánticas de esta luz surgieron del filtrado espectral y espacial del flujo de fotones.

Hay varios desarrollos dirigidos a proporcionar soluciones parciales a algunos aspectos acometidos por el objeto de la invención.

Yuan en "Electrically Driven Single-Photon Source" Science 295 (5552) 102 - 5 de febrero de 2002 divulga una fuente de radiación eléctricamente inducida de un fotón único generado a partir de la electroluminiscencia de un único punto cuántico revelado en la región intrínseca de un tipo de unión p-i-n, esto es un diodo PIN que tiene dos

regiones dopadas de modo diferente y dos terminales. Este documento detalla cómo con bajos niveles de corriente de inyección, el espectro de la electroluminiscencia del punto cuántico revela una única línea definida debido a la recombinación de excitones. La función de autocorrelación de segundo orden de la luz emitida muestra que la emisión de fotón único bajo demanda puede estimularse por pulsos de tensión de duración por debajo del nanosegundo.

Junto con las actividades de Toshiba, por ejemplo en el documento US2011108744 se describe una fuente de fotones que comprende: un punto cuántico; contactos eléctricos configurados para aplicar un campo eléctrico a través de dicho punto cuántico; y una fuente de alimentación conectada a dichos contactos, configurada dicha fuente eléctrica para aplicar un potencial de modo que los portadores se suministren con dicho punto cuántico para formar un bi-excitón o un excitón de mayor orden. En ese documento dicha fuente de fotones comprende adicionalmente una barrera configurada para incrementar el tiempo que le lleva a un portador a y desde dicho punto cuántico, y siendo ese tiempo mayor que la vida media de radiación de un excitón en el punto cuántico, siendo adecuado el punto cuántico para la emisión de fotones durante la desintegración de un bi-excitón, excitón o de orden más alto.

El documento WO2011009465 describe una fuente de luz cuántica de fotones basada en un nanocable esencialmente cónico que se fabrica a partir de un material semiconductor; el nanocable se complementa mediante un par de electrodos conectados eléctricamente a un emisor de fotones que se integra en el nanocable y que genera o emite un fotón único cuando se aplica un voltaje de impulsión entre los electrodos. Este documento describe que el nanocable está rodeado por aire o vacío, de modo que se pueda aprovechar de la relación resultante entre el índice de refracción de los nanocables y el material que lo rodea (aire). También detalla que los electrodos son ópticamente transparentes de modo que pueden usarse como parte de un elemento antirreflectante.

Los documentos US5583349A y US2016064439A1 divulgan apilamientos de diodo emisor de luz (LED). Un apilamiento LED permite combinar luz desde diferentes longitudes de onda en un dispositivo monolítico, produciendo nuevos colores como una combinación de la luz producida por cada LED del apilamiento LED. El dispositivo está fabricado usando diferentes procesos que pueden ser usados para generar un dispositivo monolítico que tiene diferentes capas de semiconductor.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

Las desventajas anteriormente mencionadas presentes en la técnica anterior pueden resolverse mediante la implementación de un dispositivo de fuente monolítica de luz cuántica ajustable y circuito óptico cuántico del mismo de la invención, que cambia el concepto de diodo de emisión de luz cuántica propuesto en la técnica anterior y el modo de inyección de los portadores mayoritarios.

Para esta finalidad, el dispositivo de fuente monolítica de luz cuántica ajustable, que es un dispositivo emisor de luz cuántica, proporciona un nuevo terminal y una nueva capa activa del dispositivo.

Nótese que en el dispositivo emisor de luz cuántica objeto de la invención, la conversión in situ de luz clásica en luz cuántica se realiza sin implicar ningún proceso óptico no lineal, lo que puede decirse que es uno de los elementos claves del dispositivo emisor de luz cuántica objeto de la invención. Varios procesos ópticos no lineales como la conversión descendente paramétrica pueden producir fotones únicos y pares de fotones entrelazados mediante conversión de frecuencia dentro de un medio no lineal de una fuente de luz de bombeo. La fuente de luz se proporciona típicamente por una fuente láser externa de alta potencia. Aunque se podrían realizar intentos para integrar la fuente de la bomba y el medio no lineal monolíticamente haciendo uso de compuestos semiconductores, el diseño y los principios de funcionamiento de dicho dispositivo serían muy diferentes del objeto de la invención.

Por lo tanto, el objeto de la invención es un dispositivo monolítico capaz de generar luz cuántica a partir de una fuente de tensión, tal como una batería, mientras se ajustan independientemente sus propiedades clave, como la longitud de onda y brillo. Tal como un LED ilumina nuestras calles convirtiendo una corriente eléctrica en una poderosa luz blanca, o un diodo láser lee y registra datos en un DVD, nuestro dispositivo convertirá una corriente eléctrica en fotones únicos altamente indistinguibles o pares de fotones entrelazados sin requerir otros componentes activos aparte del dicho dispositivo monolítico.

El objeto de la invención halla una solución para un bien conocido problema de existencia de fuentes de luz cuánticas impulsadas eléctricamente que tienen un rendimiento limitado cuando se implementan en membranas ultrafinas, microcavidades de cristales fotónicos y guías de onda o más generalmente, nanodispositivos sensibles a su entorno dieléctrico. En todos estos casos, el nuevo diseño resuelve el problema sin comprometer el carácter monolítico de la fuente.

Debido a sus nuevas capacidades de ajuste y factibilidad de integración óptica, el objeto de la invención mejora las fuentes monolíticas actuales de luz cuántica, y tiene un gran potencial en comunicaciones cuánticas, pero también abre la puerta a circuitos integrados fotónicos más factibles para procesamiento de información cuántica y metrología.

El dispositivo de la invención comprende un conjunto de diodos, preferentemente dos, y un conjunto de áreas intrínsecas, preferiblemente dos, en una estructura monolítica "p-i-n-i-p". Las capas intrínsecas y dopadas más bajas comprenden uno o más pozos cuánticos (QW), mientras que las capas intrínsecas superiores contienen preferentemente una única capa que comprende emisores de luz cuántica (por ejemplo QD epitaxiales). El diodo inferior funciona con polarización directa, esto es, mediante la inyección de portadores mayoritarios produciendo "electroluminiscencia en QW". Esta luz clásica (CL) es de hecho la luz convencional emitida por un diodo emisor de luz (LED) que se propaga a través del dispositivo hasta que alcanza la zona activa superior que contiene los emisores de luz cuántica. En esta región, la luz clásica es absorbida generando pares electrón-hueco que se capturan por los emisores de luz cuántica y se reemiten como luz cuántica. La luz cuántica se recoge a continuación siguiendo los métodos conocidos para filtrado temporal, espacial y espectral de las fuentes de luz cuántica según sea necesario. El diodo superior puede impulsarse independientemente y permitir un número de funcionalidades no presentes en el diseño de dos terminales:

- Control de la energía del emisor de luz cuántica a través del efecto Stark cuántico confinado y por ello de la longitud de onda de la fuente de luz cuántica independientemente del mecanismo de inyección de portadores.
- Control del estado de carga del QD a través de carga y descarga capacitiva o difusiva de portadores eléctricos adicionales independientemente del mecanismo de inyección de portadores.
- Modulación de la intensidad o brillo de la fuente de luz cuántica usando dos parámetros independientes: inyección de corriente en el diodo inferior (modulación de la intensidad de luz clásica) o campo eléctrico inverso del diodo superior (agotamiento completo de cargas en los QD).
- Impulso eléctrico completo de las fuentes de luz cuántica o memorias cuánticas embebidas en membranas ultrafinas, incluyendo microcavidades de cristal fotónico / guías de onda, sensores nano-optomecánicos, membranas de diseño del estrés y otros similares, sin perjudicar el entorno dieléctrico o el brillo de la fuente de luz cuántica.

El diseño de tres terminales permite la implementación de compuertas complejas verticales y/o laterales eléctricas de los estados del emisor de luz cuántica independientemente del nivel de inyección de la fuente de luz de bombeo embebida monolíticamente. Esto es de primordial importancia para satisfacer la factibilidad del ajuste y los requisitos de ahorro de espacio de circuitos fotónicos cuánticos altamente integrados. Más específicamente, permite:

- El uso de capas de sacrificio y de detención de grabación y métodos de microfabricación estándar, para eliminar completa o selectivamente una o más capas dopadas y para definir regiones pasivas, regiones activas eléctricamente invertidas, compuertas laterales, compuertas de Schottky, transistores de efecto de campo y otros similares, todos funcionando en la misma oblea independientemente del nivel de inyección de la fuente de luz clásica de bombeo embebida monolíticamente. También, el concepto de tres terminales no impone ninguna restricción particular a la construcción de la fuente de luz de bombeo embebida monolíticamente ni al diseño de la fuente de luz cuántica. En particular:
 - Pueden implementarse todos los desarrollos actuales y futuros en el campo de los dispositivos de emisión de luz clásica. Particularmente, en lugar de diseños de LED convencionales, pueden usarse reflectores de Bragg para fabricar unos LED de cavidad resonante, o láseres de Cavidad Vertical (VCSEL) para estrechar el espectro de luz clásico e incrementar su tasa y profundidad de modulación. Pueden implementarse también las estrategias de confinamiento actuales basadas en la formación de capas de bloqueo de corriente, mediante la oxidación anódica u otros métodos, para canalizar o bloquear la corriente en el diodo inferior o superior e incrementar asimismo la tasa y profundidad de eficiencia/modulación. Todos estos desarrollos pueden incorporarse sin esfuerzo al diseño para mejorar la generación eléctrica monolítica de fotones únicos y pares de fotones entrelazados bajo demanda.
 - Pueden incorporarse todos los desarrollos actuales y futuros en la investigación de nuevos materiales para la fabricación de fuentes de luz cuántica. En particular, los emisores de luz cuántica pueden fabricarse de cualquier combinación de materiales capaz de contener portadores únicos y/o emitir luz cuántica en tanto son capaces de absorber la luz bombeada. También, los métodos de fabricación determinísticos basados en emisores de luz cuántica controlados en sitio o emisores de luz cuántica selectivamente dirigidos son completamente compatibles con nuestro diseño.

DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Para complementar la descripción realizada y para ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención de acuerdo con una realización práctica de la misma, se adjuntan como una parte integral de dicha descripción, un conjunto de dibujos en los que, ilustrativamente y no restrictivamente, se ha representado lo siguiente:

Figuras 1a – 1b. Muestran vistas en perspectiva del estado de la técnica en la figura 1a y una vista en perspectiva del dispositivo de la invención en la figura 1b.

Figura 2. Muestra una simulación del método de elementos finitos alcanzada resolviendo de forma autoconsistente las ecuaciones de Poisson y de deriva-difusión en el dispositivo. El mapa de color indica la energía

de los electrones con $V_{EB} = V_{CB} = 0 \text{ V}$.

Figura 3. Muestra las corrientes de base y colector calculadas para diferentes VCE y VBE con las ecuaciones de transporte resueltas como en un transistor bipolar en configuración de base común. El diseño para el emisor de luz cuántica ajustable se ha optimizado para disminuir casi completamente el efecto transistor (atenuación de 90 dB), es decir, toda la corriente inyectada por el emisor se dedica a generar electroluminiscencia en los pozos cuánticos.

Figura 4. Muestra una ilustración de una configuración p-i-n-i-p del dispositivo de la invención como una fuente monolítica de luz cuántica con propiedades cuánticas eléctricamente ajustables.

Figura 5. Muestra una ilustración del dispositivo de la invención con una capa dopada superior intercambiada mediante un contacto Schottky superior.

Figura 6. Muestra una ilustración de una configuración p-i-n-i-p del dispositivo de la invención englobando espejos y reflectores de Bragg.

Figura 7. Muestra una ilustración del dispositivo de la invención modificado de tal forma que la luz cuántica se extrae del lado del sustrato.

Figura 8. Muestra una ilustración del dispositivo de la invención en donde los emisores cuánticos están embebidos en estructuras de cristal fotónico (PC) dentro de una membrana y su emisión de luz cuántica puede impulsarse eléctricamente dentro del mismo dispositivo.

Figura 9. Muestra una ilustración del dispositivo de la invención en donde las propiedades de los emisores cuánticos (como longitud de onda, estado de carga) pueden ajustarse eléctricamente mediante la tensión aplicada mientras están embebidos en estructuras del cristal fotónico (PC) dentro de una membrana. Al mismo tiempo, su emisión de luz cuántica puede impulsarse eléctricamente dentro del mismo dispositivo.

Figura 10. Muestran una realización del dispositivo de la invención en donde los emisores de luz cuántica están embebidos en una membrana y sus propiedades ajustadas mediante una fuerza o calor aplicado con un transductor externo. Al mismo tiempo, su emisión de luz cuántica puede impulsarse eléctricamente dentro del mismo dispositivo.

Figura 11. Muestra una ilustración del dispositivo de la invención en donde los emisores cuánticos están embebidos en una unión p-i-n con una membrana para ajustar sus propiedades por la tensión aplicada y/o por la fuerza o calor aplicado con un transductor externo. Al mismo tiempo, su emisión de luz cuántica puede impulsarse eléctricamente dentro del mismo dispositivo.

Figura 12. Muestra un diagrama de una matriz de fuente de luz cuántica ajustable que comprende dos o más dispositivos de la invención a partir del mismo sustrato. Para implementar diferentes funcionalidades, pueden eliminarse selectivamente capas epitaxiales activas y pasivas de cada dispositivo. Cada una de las capas activas restantes puede impulsarse independientemente con diferentes polarizaciones. Al mismo tiempo, su emisión de luz cuántica puede impulsarse eléctricamente dentro del mismo dispositivo.

Figura 13. Muestra un diagrama de un circuito óptico cuántico básico que comprende dos o más dispositivos de la invención a partir del mismo sustrato. Los dispositivos se interconectan dentro del circuito mediante una guía de onda y absorbentes de luz. Los dispositivos pueden polarizarse independientemente para emitir, detectar o alterar las propiedades de la luz cuántica. Al mismo tiempo, su emisión de luz cuántica puede impulsarse eléctricamente dentro del mismo dispositivo.

Figura 14. Muestra un diagrama de un circuito óptico cuántico básico que comprende dos o más dispositivos de la invención a partir del mismo sustrato. Las propiedades cuánticas de los emisores/receptores cuánticos se controlan mediante transductores piezoeléctricos, calentadores y/o campos eléctricos internos. Los dispositivos se conectan mediante una guía de onda y/o absorbentes de luz. La luz cuántica es capturada y dirigida al circuito con microcavidades de cristal fotónico y el guía de onda. Los dispositivos pueden impulsarse independientemente para emitir, detectar o alterar las propiedades de la luz cuántica. Al mismo tiempo, su emisión de luz cuántica puede impulsarse eléctricamente dentro del mismo dispositivo.

Figura 15. Muestra una ilustración del dispositivo de la invención en donde los emisores cuánticos están embebidos en un dispositivo nano-optomecánico como un voladizo para metrología cuántica y aplicaciones de detección y su emisión de luz cuántica puede impulsarse eléctricamente dentro del mismo dispositivo.

REALIZACIÓN PREFERIDA DE LA INVENCION

En una posible realización preferida del dispositivo de un primer aspecto de la invención, se proporciona un

dispositivo capaz de emitir luz cuántica tal como se muestra en las Figuras 1b y 4 el cual tiene al menos un diodo inferior (1), que debe ser parcialmente transparente a la luz emitida por al menos un pozo cuántico (4), y al menos un diodo superior (3) que debería absorber parcial o completamente dicha luz emitida; de ahí los emisores de luz cuántica. Esto no es un problema en la práctica dado que hay varias combinaciones de materiales semiconductores que cumplen esta regla.

En una posible configuración preferida, el dispositivo de la invención comprende varias zonas con diferentes dopados p-i-n-i-p o alternativamente n-i-p-i-n; aunque puede desarrollarse un dispositivo con un número de zonas específico, tal como cinco en el dispositivo mostrado en la Figura 1b; de esta forma tienen capas alternativas de semiconductor tipo p intrínseco o tipo n, pares de capas con capas respectivas de semiconductor tipo p y semiconductor tipo n entre las que se disponen los diodos (1, 3).

De ese modo un diseño básico del dispositivo mostrado tanto en la Figura 1b como en la Figura 4, puede comprender, sobre un sustrato que puede ser dopado (tipo n o tipo p) o intrínseco, un bloque (2) de material semiconductor que a su vez puede estar respectivamente dopado y seleccionado entre materiales semiconductores de tipo n o tipo p; merece la pena mencionar que el material del sustrato depende del material del bloque (2), de modo que el sustrato se hace de un material tipo n o intrínseco cuando el bloque (2) es de tipo n, o de material tipo p o intrínseco cuando el bloque (2) está hecho de tipo p. La selección de los materiales semiconductores de tipo n o tipo p produce las estructuras anteriormente mencionadas p-i-n-i-p o alternativamente n-i-p-i-n. Este diseño básico es la piedra angular de una realización preferida de la invención en donde, independientemente de los materiales semiconductores que se seleccionan preferentemente de materiales semiconductores compuestos III-V y teniendo en cuenta posibles disposiciones diferentes de capas de materiales tipo n, tipo p e intrínseco, se forma un dispositivo emisor de luz cuántica que es monolítico, y comprende sobre dicho bloque (2), que es en esta realización preferida un bloque (2) de material semiconductor tipo p:

- Un diodo inferior (1) que comprende el bloque (2) y sobre la parte superior de dicho bloque una primera capa de material semiconductor (11) que puede tener la misma composición que el bloque (2) estando hecho preferentemente de un material semiconductor tipo p, una segunda capa de material semiconductor (12) que está hecha preferentemente de material intrínseco, dicha segunda capa de material semiconductor (12) puede comprender pozos cuánticos (4); situado sobre la segunda capa de material semiconductor (12), se proporciona una tercera capa de material semiconductor (13), en este caso hecha preferentemente de material semiconductor tipo n que puede comprender también pozos cuánticos. Se considera que es funcional que el dispositivo trabajaría en cualquier caso con uno o más de un pozo cuántico (4), y por razones de concreción, se proporcionan por este medio una pluralidad de pozos cuánticos (4).
- Un diodo superior (3) que comprende una cuarta capa de material semiconductor (31) que puede tener la misma composición que la de la tercera capa de material semiconductor (13) estando hecha preferentemente de material semiconductor tipo n; y una quinta capa de material semiconductor (32) localizada en la parte superior de la cuarta capa de material semiconductor (31) y que está hecha preferentemente de material intrínseco, quinta capa de material semiconductor (32) que a su vez puede comprender emisores de luz cuántica (5), que pueden ser, a saber, puntos cuánticos de semiconductor (5) u otros materiales cuánticos capaces de emitir luz cuántica, a saber, nanotubos de carbono, moléculas orgánicas, materiales de capa simple,... Sobre la parte superior de dicha quinta capa de material semiconductor (32) se proporciona una sexta capa de material semiconductor (33), estando hecha preferentemente dicha sexta capa de material semiconductor (33) de material semiconductor tipo p.
- Se proporciona también una primera capa metálica (21) localizada o bien sobre la primera capa de material semiconductor (11) o bien sobre el bloque (2) de material semiconductor generando un contacto eléctrico óhmico para al menos uno de dichos materiales semiconductores, formando así un primer contacto eléctrico. Se proporciona también una segunda capa metálica (22) localizada sobre o bien la tercera capa de material semiconductor (13) o bien la cuarta capa de material semiconductor (31) generando un contacto eléctrico óhmico para al menos uno de dichos materiales semiconductores, formando así un segundo contacto eléctrico. Se proporciona también una tercera capa metálica (23) localizada sobre la sexta capa de material semiconductor (32) generando un contacto eléctrico óhmico para dichos materiales semiconductores (32), formando así un tercer contacto eléctrico.

Como se ha mencionado anteriormente el dispositivo de la invención puede proporcionarse con diferentes posibles disposiciones de materiales semiconductores de tipo n, tipo p e intrínseco para las capas de material semiconductor (11, 12, 13, 31, 32, 33); en este sentido en posibles realizaciones alternativas del dispositivo de la invención, el bloque (2) y la primera capa de material semiconductor (11) están hechos de material semiconductor tipo n, la segunda (12) y quinta (32) capas de material semiconductor están hechas de material semiconductor intrínseco, la tercera (13) y cuarta (31) capas de material semiconductor están hechas de material semiconductor tipo p y la sexta capa semiconductor a (33) está hecha de material semiconductor tipo n. La inversión de la configuración de materiales semiconductores produce las configuraciones p-i-n-i-p o alternativamente n-i-p-i-n; en las que i denota una capa intrínseca.

El dispositivo de la invención puede producir diferentes configuraciones basándose en el modelo base anteriormente descrito; en consecuencia, la tercera capa de material semiconductor (13), que se localiza sobre la segunda capa de

material semiconductor (12), puede hacerse de un material semiconductor tipo p cuando la primera capa de material semiconductor (11) es de material semiconductor tipo n, o material semiconductor tipo n cuando la primera capa de material semiconductor (11) es de material semiconductor tipo p. De modo similar, la cuarta capa de material semiconductor (31), que se dispone sobre la tercera capa de material semiconductor (13) puede hacerse de material semiconductor tipo p cuando la primera capa de material semiconductor (11) es de material semiconductor tipo n, o de material semiconductor tipo n cuando la primera capa de material semiconductor (11) es de material semiconductor tipo p. En una forma similar, la quinta capa de material semiconductor (32) localizada en la parte superior de la cuarta capa de material semiconductor (31) y que comprende a su vez al menos un pozo cuántico (4) cuando la segunda capa de material semiconductor (12) comprende al menos un emisor cuántico (5), o al menos un emisor cuántico (5) cuando la segunda capa de material semiconductor (12) comprende al menos un pozo cuántico (4). Todas las posibles realizaciones del dispositivo de la invención pueden comenzar a partir de cualquiera de las configuraciones iniciales anteriores.

En una realización alternativa del dispositivo de la invención en donde la segunda capa de material semiconductor (12) comprende al menos un pozo cuántico (4), en esta realización la tercera capa metálica (23) y la sexta capa de material semiconductor (33) pueden eliminarse o la sexta capa de material semiconductor (33) puede sustituirse por una capa de aislamiento eléctrico o una capa metálica.

En el caso mostrado en la figura 1b, el dispositivo se diseña para emitir luz cuántica a aproximadamente 980 nm por ello el diodo inferior (1) se hace de una combinación de semiconductores compuestos III-V —en este caso $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ de composición variable—, y contiene pozos cuánticos (4) de GaAs con emisión a aproximadamente 785 nm mientras que el diodo superior (3) está hecho de una combinación de semiconductores compuestos III-V —en este caso GaAs y su coeficiente de absorción es $> 10^5 \text{ cm}^{-1}$ a esta longitud de onda—. La cuarta capa (32) contiene uno o más puntos cuánticos hechos de $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ cuya emisión es a aproximadamente 980 nm. De hecho, 785 nm es una longitud de onda estándar para excitar los puntos cuánticos (5) de InGaAs/GaAs y una capa de GaAs solo de 100 nm de grueso es suficiente para absorber $> 64 \%$ de luz.

Estos portadores foto-generados se difunden fácilmente en GaAs de alta calidad a baja temperatura de modo que la probabilidad de captura por los puntos cuánticos (5) es muy alta. El dispositivo emisor de luz cuántica objeto de la invención, puede adaptarse a otras ventanas espectrales como ventanas de telecomunicaciones por fibra (1,31 micras, 1,55 micras, etc.) o telecomunicaciones en espacio libre en los intervalos visible y ultravioleta. Para esta finalidad podemos proceder a cambiar la combinación de materiales basada en GaAs por una combinación de materiales basada en InP, una combinación de materiales basada en GaN o combinaciones de materiales adecuadas que permitan cubrir el intervalo espectral relevante.

La invención proporciona el diodo superior (3) con la capacidad de aplicar un campo eléctrico a los emisores de luz cuántica (5) sin afectar al proceso de inyección de portadores eléctricos (que tiene lugar en el diodo inferior (1)). Este campo eléctrico se usa para modular la emisión de los emisores de luz cuántica (5) en intensidad y energía a través del efecto Stark y para controlar su carga mediante el mecanismo de bloqueo de Coulomb. Con esto, el control de la emisión de los emisores de luz cuántica (5) puede realizarse independientemente del nivel de corriente e inyección de portadores que es uno de los problemas fundamentales del diseño de dos terminales.

En otra realización más de la invención es posible producir estructuras fotónicas tales como unas microcavidades de cristal fotónico en el dispositivo de la invención, así como cualquier otro componente fotónico tales como: espejos, guías de onda, acopladores y divisores de luz,... O componentes mecánicos tales como: columnas, membranas (61), voladizos (62). La implementación de dichas características no requiere de esfuerzos adicionales a aquellos existentes en el diseño convencional usando técnicas de fabricación conocidas. Al implementar dichas características, todo el dispositivo aún actúa como una fuente monolítica de luz cuántica sin intervención de fuentes de luz externas.

Unas estructuras fotónicas de inserción se preparan preferentemente en la quinta capa de material semiconductor (32), embebiendo de ese modo los emisores de luz cuántica (5) cuando están presentes en la quinta capa de material semiconductor (32). Debe tomarse nota sin embargo, de que la sexta capa de material semiconductor (33) puede proporcionarse por encima de dicha quinta capa de material semiconductor (32). En este mismo caso las estructuras fotónicas pueden estar compuestas tanto de dicha quinta como de dicha sexta capas de material semiconductor (32, 33).

Dejando aparte los mecanismos de generación y absorción de luz, el diseño electrónico del dispositivo de la invención es similar a un transistor tipo BJT en configuración de base común. Sin embargo, el diseño del dispositivo debería modificarse para eliminar el efecto transistor parásito. Para hacer esto, las regiones dopadas intermedias (13+31) (base del transistor bipolar) deben diseñarse cuidadosamente (grosor y composición) para eliminar la inyección de portadores mayoritarios de una zona intrínseca a la otra. Por ello, la interconexión entre los dos diodos es puramente óptica evitando la acumulación de cargas no deseadas en los emisores de luz cuántica.

El dispositivo de la invención puede fabricarse de tal manera que habilite al dispositivo como una fuente monolítica de luz cuántica ajustable, como el dispositivo representado en la Figura 4 que corresponde a una configuración p-i-n-

i-p. El dispositivo de la Figura 4 proporciona control del brillo de la fuente y tensión independientes de las propiedades del emisor cuántico.

5 Sin embargo, pueden aplicarse modificaciones a la estructura del dispositivo preparando diferentes realizaciones y aplicaciones del dispositivo, en este sentido puede obtenerse una fuente monolítica de luz cuántica ajustable en configuración p-i-n-i-Schottky como la representada en la Figura 5 mediante la sustitución de la sexta capa de material semiconductor (33) con un contacto Schottky metálico; esto permite al dispositivo proporcionar control del brillo de la fuente y tensión independientes de las propiedades del emisor cuántico.

10 Los emisores de luz cuántica comprendidos en la quinta capa de material semiconductor (32) podrían ser de naturaleza no epitaxial y depositados mediante diversos métodos sobre la cuarta capa de material semiconductor (31). En este caso, la capacidad de ajuste por tensión de las propiedades del emisor de luz cuántica podría aún llevarse a cabo sustituyendo la sexta capa de material semiconductor (33) con un material de aislamiento eléctrico y aplicando tensiones de puerta a través de la capa metálica (23) como en un transistor metal-aislante-semiconductor; esto permite al dispositivo proporcionar control del brillo de la fuente y tensión independientes de las propiedades del emisor cuántico.

20 El dispositivo de la invención puede proporcionarse también con reflectores y espejos de Bragg (51, 52, 53) que engloban capas ópticamente activas, tal como se representa en la Figura 6. En un diseño simple, con los emisores cuánticos (5) asignados en capas por encima de aquellas capas que comprenden pozos cuánticos (4), un único espejo de Bragg (51) inferior refleja la luz emitida por los pozos cuánticos (2) en la dirección del sustrato de vuelta a las regiones del emisor cuántico (5). Un segundo espejo de Bragg (51) puede asignarse entre medias de dos diodos (1, 3) para reflejar selectivamente la luz cuántica hacia arriba. Alternativa o simultáneamente, un espejo metálico superior (53) podría reflejar toda la luz de vuelta hacia abajo hacia el bloque (2). Estos y otros usos de los reflectores y espejos de Bragg (51, 52, 53) permiten gestionar la propagación de los flujos de luz clásica y cuántica esencialmente en una dirección vertical (concretamente, paralela a la dirección de crecimiento); como un experto en la materia apreciará la configuración de los reflectores y espejos de Bragg (51, 52, 53) puede depender de la disposición de los pozos cuánticos (4) y emisores cuánticos (5). Su localización y número podría diseñarse también para estrechar el ancho de banda espectral e incrementar la tasa y profundidad de modulación de la fuente. Una configuración típica se representa en la figura 7, en donde el dispositivo tiene una configuración p-i-n-i-p con reflectores y/o espejos de Bragg de diferentes tipos que permiten la reflexión de la luz cuántica (QL) a través del bloque (2) hacia el sustrato diseñado ópticamente. Esto se consiguen proporcionando en el bloque (2) o el sustrato acopladores de funda (41) de la fibra óptica, recubrimientos antirreflexión (42),... y reflejando la luz cuántica (QL) por los reflectores y/o espejos de Bragg superiores. Esta última configuración prepara una realización en donde se disponen al menos uno de entre: acoplador de funda (41) de la fibra óptica y recubrimientos antirreflectantes (42); o bien sobre el bloque (2) o bien sobre el sustrato de modo que la luz cuántica pase a través del bloque (2).

40 El dispositivo de la invención puede comprender adicionalmente una o más membranas delgadas (61) que a su vez pueden comprender los emisores cuánticos (5), tal como los puntos cuánticos (5). Por ello, las membranas (61) pueden fabricarse sobre la sexta capa de material semiconductor (33) o la quinta capa de material semiconductor (32) creando un espacio de aire por debajo de los puntos cuánticos (5). Las membranas (61) pueden comprender también estructuras fotónicas como cristales fotónicos (PC) para proporcionar al emisor cuántico (5) un entorno dieléctrico que modifique el acoplamiento luz-materia y/o la propagación de la luz. La Figura 8 muestra el dispositivo resultante con las membranas (61) sobre la quinta capa de material semiconductor (32) modificada para acoger una o más estructuras fotónicas cada una, en esta realización puede haber o no capas adicionales por encima de la quinta capa de material semiconductor (32). Las estructuras fotónicas pueden comprender uno o más emisores cuánticos (5). Todo el dispositivo es capaz de emitir luz cuántica sin la intervención de fuentes de luz externas mientras se mejora el acoplamiento luz-materia y/o el ajuste de la propagación de la luz. El dispositivo resultante de esta realización puede presentar una membrana (61) fabricada sobre la quinta capa de material semiconductor (32) que define un espacio por debajo de los emisores cuánticos (5), tal como se ha establecido anteriormente, dicha membrana (61) puede comprender estructuras fotónicas que son estructuras de captura o guiado de la luz como estructuras de cristal fotónico que embeben los emisores de luz cuántica (5). Como reconocerá un experto en la materia esto puede resolver cualquier limitación existente de la técnica anterior para realizar la misma tarea.

55 El dispositivo de la figura 8 puede completarse restaurando de nuevo la sexta capa de material semiconductor (33) y la tercera capa metálica (23) o añadiendo un contacto Schottky superior o estructura metal-aislante como se ha mencionado anteriormente. Por ello, la estructura de diodo superior (3) puede embeber la quinta capa de material semiconductor (32) que comprende a su vez los emisores cuánticos (5). Las membranas (61) y/o las estructuras fotónicas pueden fabricarse directamente sobre esta estructura de diodo superior (3). Todo el dispositivo, mostrado en la Figura 9, es capaz de emitir luz cuántica sin la intervención de fuentes de luz externa y al mismo tiempo los emisores cuánticos están ajustados eléctricamente en tanto están embebidos en estructuras PC.

65 También es útil la membrana (61) para modificar las propiedades del emisor cuántico a través de elementos externos como transductores de fuerza (63) preferentemente piezotransductores, resistencias eléctricas que actúan como calentadores, etc., acogidos sobre la parte superior o la proximidad. En estas realizaciones, no puede haber una capa adicional por encima de la sexta capa de material semiconductor (33) tal como se muestra en la Fig. 10 o

5 toda la estructura de diodo superior (3) podría preservarse tal como se muestra en la Fig. 11. La fuerza y/o calor externo se aplican localmente mediante dichos transductores (63) para modificar adicionalmente las propiedades de los emisores cuánticos (5) embebidos e incrementar las capacidades de ajuste del dispositivo sin afectar a sus otras funciones. Todo el dispositivo es un dispositivo emisor de luz cuántica ajustable que trabaja sin la intervención de fuentes de luz externas.

10 En otro aspecto de la invención, y teniendo en cuenta que el dispositivo emisor de luz cuántica de la invención se fabricaría usando un sustrato a partir del que se definen los diferentes componentes del dispositivo usando epitaxia, podría generarse más de un dispositivo sobre el sustrato definiendo un circuito óptico integrado o circuito fotónico cuántico que comprende al menos dos dispositivos como los descritos por el presente documento.

15 La figura 12 muestra un ejemplo de una matriz de dos de dichos dispositivos en donde las fuentes de luz cuánticas monolíticas tienen sus capas semiconductoras y metálicas selectivamente eliminadas o modificadas para implementar esquemas de polarización por tensión independientes e integrar diferentes funcionalidades en la misma oblea. Los dispositivos pueden accionarse canalizando independientemente la corriente y la tensión para emitir o detectar luz cuántica o alterar las propiedades de los emisores cuánticos. Al mismo tiempo, la emisión de luz cuántica puede impulsarse eléctricamente dentro del circuito.

20 La Figura 13 muestra un ejemplo de un circuito óptico cuántico en donde se conectan dos o más dispositivos en el mismo sustrato mediante guías de onda y absorbentes de luz. La funcionalidad de dichos circuitos puede mejorarse ampliamente añadiendo membranas (61) que mantendrían las estructuras fotónicas y/o transductores externos como se ha descrito anteriormente. El resultado se muestra en la Figura 14. Cada dispositivo en el circuito puede impulsarse independientemente para emitir, detectar o alterar las propiedades de la luz cuántica. Al mismo tiempo, la emisión de luz cuántica puede impulsarse eléctricamente dentro del circuito.

25 Cualquiera de las realizaciones anteriores puede modificarse para contener sistemas nano-optomecánicos tales como un voladizo (62) con emisores de luz cuántica (5) embebidos. Un ejemplo se muestra en la Figura 15 donde parte de la quinta capa de material semiconductor (32) se ha conformado en la forma de un voladizo (62) que embebe uno o más emisores cuánticos (5). En esta realización no puede haber una capa adicional por encima de la sexta capa de material semiconductor (33). Todo el dispositivo emitirá luz cuántica en un entorno adecuado para aplicaciones de metrología optomecánica cuántica y de sensor. Lo hace sin intervención de fuentes de luz externas. El dispositivo resultante proporciona la quinta capa de material semiconductor (32) que comprende un oscilador mecánico, tal como un voladizo (62).

30 Aunque los emisores de luz cuántica (5) pueden disponerse en diferentes capas de acuerdo con la realización respectiva, la quinta capa de material semiconductor (32) puede ser una que comprende los emisores de luz cuántica (5); en este caso, dichos emisores de luz cuántica (5) pueden localizarse o bien por encima de dicha quinta capa de material semiconductor (32) o por debajo de dicho quinto material semiconductor (32).

35 En posibles realizaciones adicionales, el dispositivo de la invención puede proporcionarse adicionalmente con una o más capas de bloqueo de corriente para canalizar el flujo de corriente eléctrica a través del dispositivo. Estas capas de bloqueo de corriente pueden incorporarse en cualquiera de las realizaciones descritas anteriormente.

40 Independientemente de la configuración del dispositivo, el sustrato y las capas de material semiconductor (11, 12, 13, 31, 32, 33) pueden hacerse de un material o combinación de materiales seleccionado de entre el grupo que consiste en: semiconductores compuestos III-V, semiconductores compuestos II-VI y semiconductores del grupo IV.

45 En un segundo aspecto de la invención, se proporciona un circuito óptico integrado o circuito fotónico cuántico que comprende al menos dos dispositivos como el dispositivo del primer aspecto de la invención.

50

REIVINDICACIONES

1. Un dispositivo para emitir fotones individuales o pares de fotones entrelazados, donde el dispositivo es monolítico y comprende, sobre un sustrato de material semiconductor seleccionado de entre: material semiconductor tipo p, material semiconductor tipo n y material semiconductor intrínseco:
- un diodo inferior (1) localizado encima del sustrato y que comprende:
 - un bloque (2) de material semiconductor seleccionado entre: material semiconductor tipo p y material semiconductor tipo n; teniendo el bloque (2) el mismo tipo de dopado que el sustrato cuando el sustrato está dopado,
 - una primera capa de material semiconductor (11) dispuesta en el bloque (2) y que tiene el mismo tipo de dopado que el bloque (2)
 - una segunda capa de material semiconductor (12) localizada sobre el primer material semiconductor (11) y que comprende a su vez: al menos un pozo cuántico (4) o al menos un emisor cuántico (5),
 - una tercera capa de material semiconductor (13) localizada sobre la segunda capa de material semiconductor (12) y hecha de:
 - material semiconductor tipo p cuando la primera capa de material semiconductor (11) es de material semiconductor tipo n,
 - material semiconductor tipo n cuando la primera capa de material semiconductor (11) es de material semiconductor tipo p,
 - un diodo superior (3) localizado encima del diodo inferior (1) y que comprende:
 - una cuarta capa de material semiconductor (31) dispuesta sobre la tercera capa de material semiconductor (13) y hecha de:
 - material semiconductor tipo p cuando la primera capa de material semiconductor (11) es de material semiconductor tipo n,
 - material semiconductor tipo n cuando la primera capa de material semiconductor (11) es de material semiconductor tipo p,
 - una quinta capa de material semiconductor (32) localizada encima de la cuarta capa de material semiconductor (31) y que comprende a su vez:
 - al menos un pozo cuántico (4) cuando la segunda capa de material semiconductor (12) comprende al menos un emisor cuántico (5), o
 - al menos un emisor cuántico (5) cuando la segunda capa de material semiconductor (12) comprende al menos un pozo cuántico (4),
 - una sexta capa de material semiconductor (33) dispuesta sobre la quinta capa de material semiconductor (32), y hecha de:
 - material semiconductor tipo n cuando la primera capa de material semiconductor (11) es de material semiconductor tipo n,
 - material semiconductor tipo p cuando la primera capa de material semiconductor (11) es de material semiconductor tipo p,
 - una primera capa metálica (21) localizada sobre o bien la primera capa de material semiconductor (11) o bien el bloque de material semiconductor (2) generando un contacto eléctrico óhmico para al menos uno de dichos materiales semiconductores,
 - una segunda capa metálica (22), localizada sobre o bien la tercera capa de material semiconductor (13) o bien la cuarta capa de material semiconductor (31) generando un contacto eléctrico óhmico para al menos uno de dichos materiales semiconductores, y
 - una tercera capa metálica (23), localizada sobre la sexta capa de material semiconductor (33) generando un contacto eléctrico óhmico para dicho material semiconductor,
- caracterizado en que los diodos (1, 3) están configurados y dispuestos de modo que la luz producida por el diodo (1, 3) que tiene el al menos un pozo cuántico (4) está desinada a ser absorbida por el diodo (1, 3) que tiene el al menos un emisor cuántico (5) y convertida por el al menos un emisor cuántico (5) en fotones individuales o pares de fotones entrelazados.
2. Dispositivo de acuerdo con la reivindicación 1 en el que la segunda capa de material semiconductor (12) comprende el menos un pozo cuántico (4), estando el dispositivo caracterizado por que la sexta capa de material semiconductor (33) se sustituye por una capa eléctricamente aislante o una capa metálica.
3. Dispositivo de acuerdo con la reivindicación 1 en el que la segunda capa de material semiconductor (12) comprende el menos un pozo cuántico (4) y se eliminan la tercera capa metálica (23) y la sexta capa de material semiconductor (33).
4. Dispositivo de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, que comprende adicionalmente reflectores y espejos de Bragg (51, 52, 53) para reflejar al menos parte de la luz emitida desde los materiales semiconductores de al menos uno de los diodos (1, 3).
5. Dispositivo de acuerdo con la reivindicación 4 en el que el número total máximo de reflectores y espejos de

Bragg (51, 52, 53) es cuatro.

- 5 6. Dispositivo de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, que comprende adicionalmente al menos uno de entre: acoplador de funda (41) de la fibra óptica y recubrimientos antirreflectantes (42); dispuestos o bien sobre el bloque (2) o bien sobre un sustrato de modo que los fotones individuales o pares de fotones entrelazados pasen a través del bloque (2).
- 10 7. Dispositivo de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, que comprende adicionalmente al menos una membrana (61) fabricada sobre la quinta capa de material semiconductor (32) que comprende los emisores cuánticos (5), que define un espacio de aire por debajo de los emisores cuánticos (5).
- 15 8. Dispositivo de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, que comprende adicionalmente al menos una estructura fotónica en la quinta capa de material semiconductor (32) que comprende los emisores cuánticos (5).
- 20 9. Dispositivo de acuerdo con las reivindicaciones 7 y 8, en la que la membrana (61) comprende al menos una estructura fotónica.
- 25 10. Dispositivo de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que la quinta capa de material semiconductor (32) comprende un oscilador mecánico, tal como un voladizo (62).
- 30 11. Dispositivo de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende adicionalmente una o más capas de bloqueo de corriente para canalizar el flujo de corriente eléctrica a través del dispositivo.
12. Dispositivo de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el sustrato y las capas de material semiconductor (11, 12, 13, 31, 32, 33) están hechas de un material o una combinación de materiales seleccionados de entre el grupo que consiste en: semiconductores compuestos III-V, semiconductores compuestos II-VI y semiconductores del grupo IV.
13. Circuito óptico cuántico que comprende al menos dos dispositivos como el dispositivo descrito en una cualquiera de las reivindicaciones 1-12.

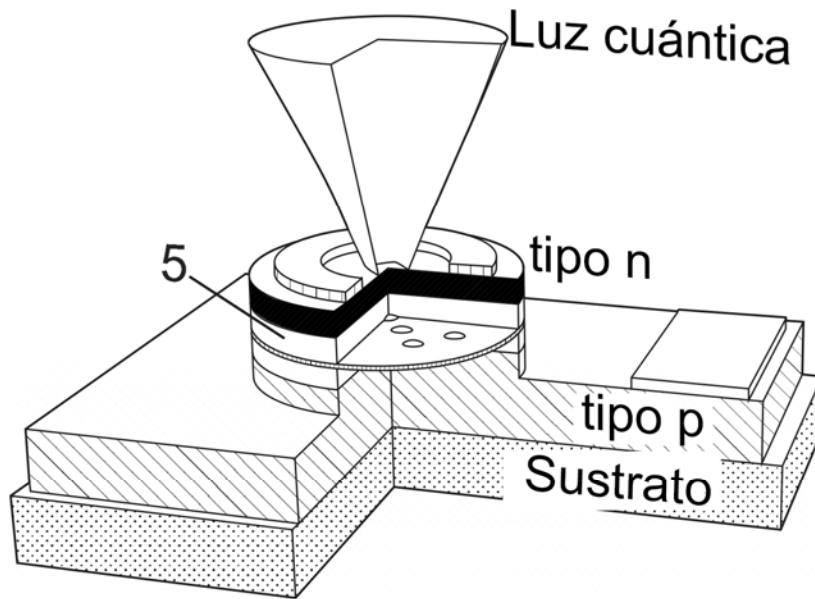


FIG. 1A

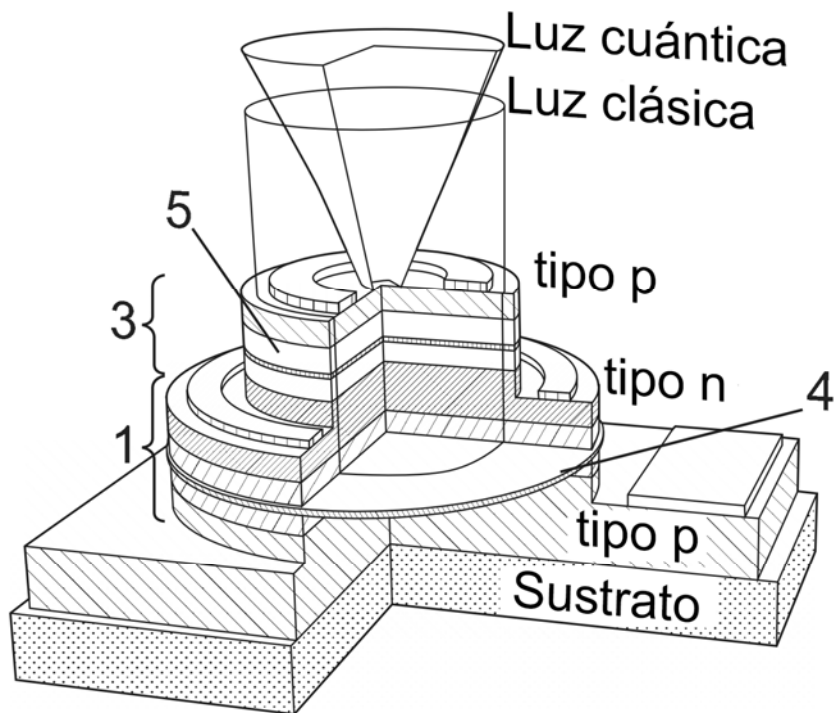


FIG. 1B

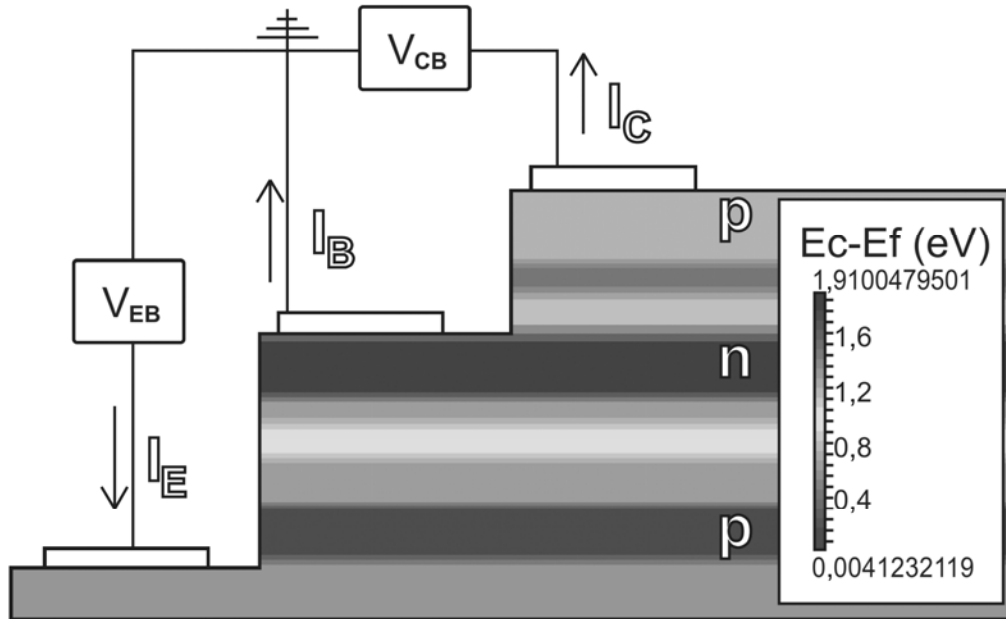


FIG. 2

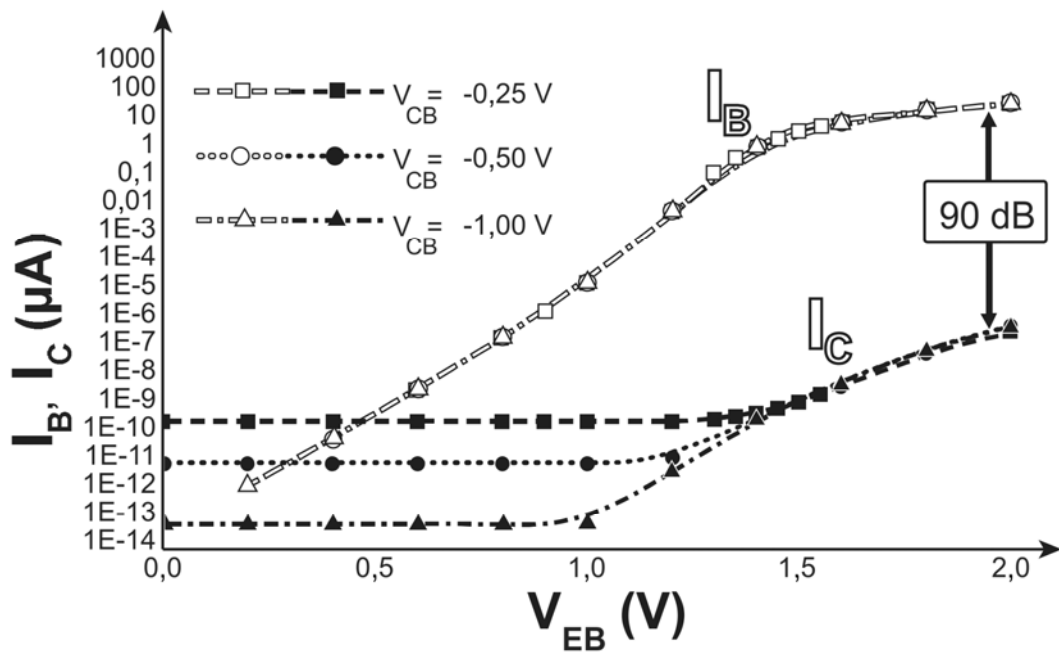


FIG. 3

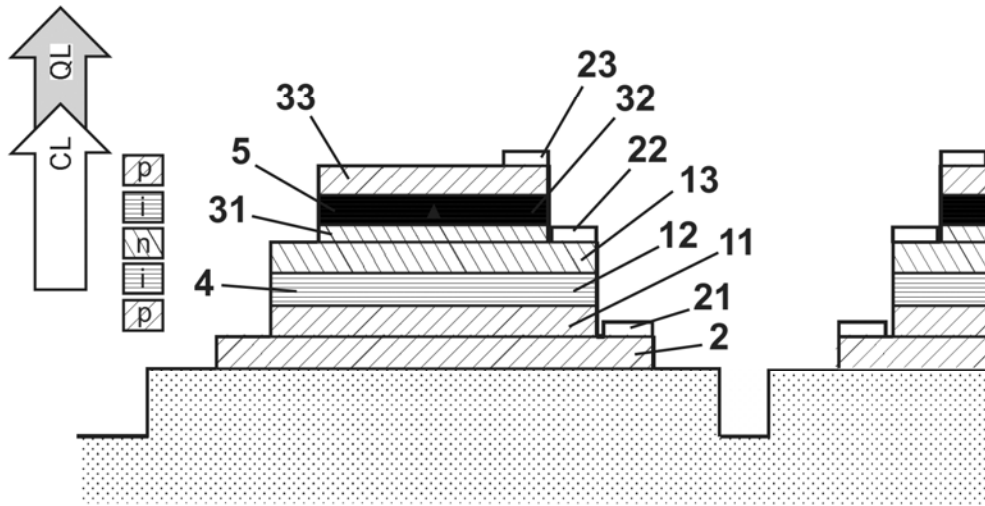


FIG. 4

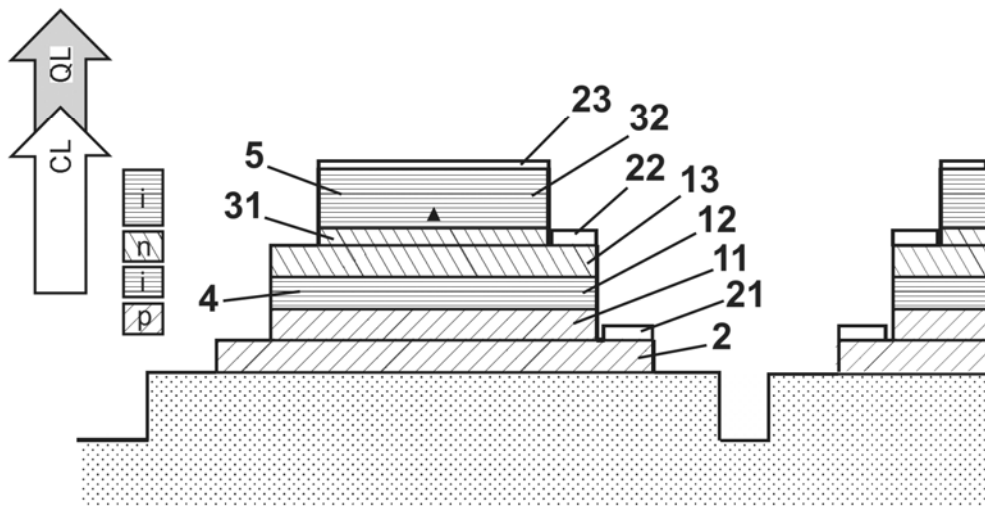


FIG. 5

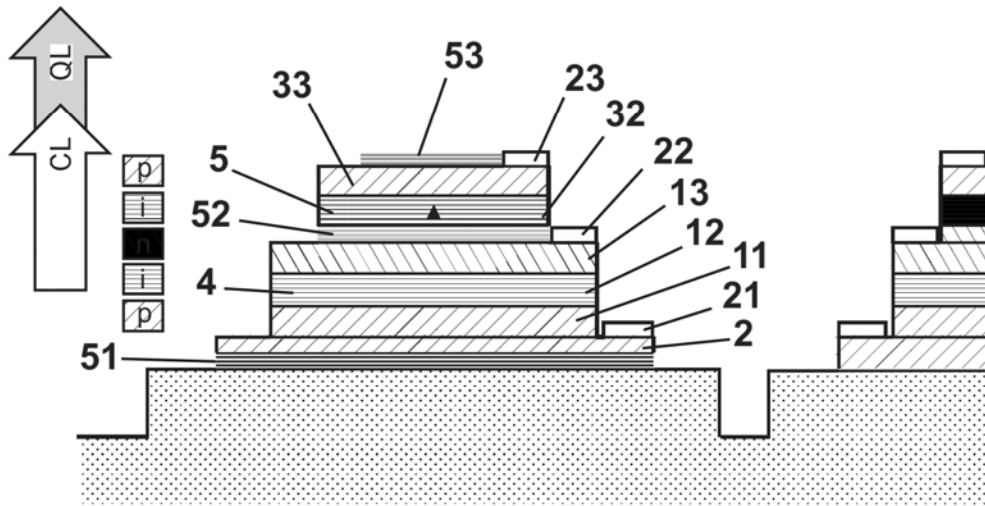


FIG. 6

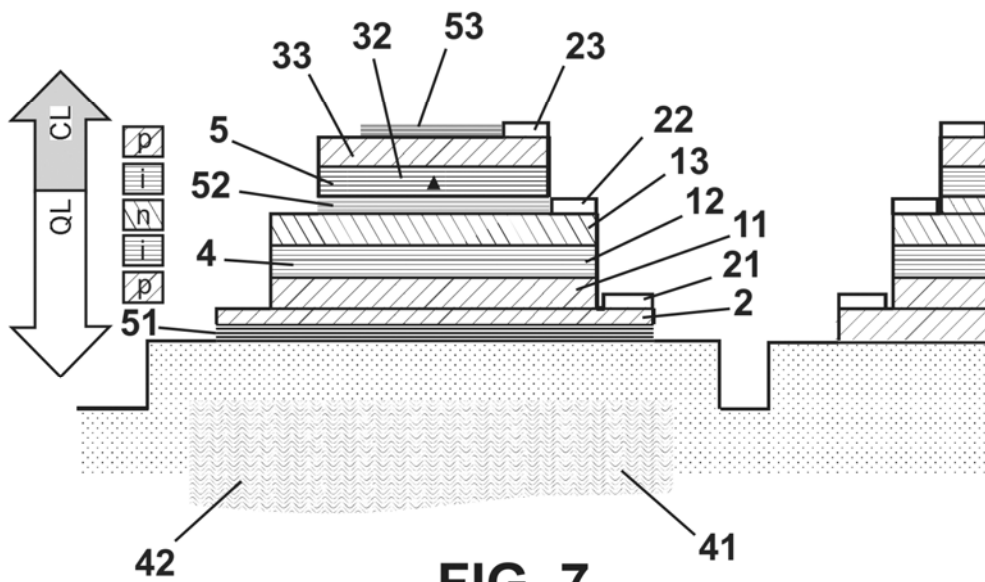


FIG. 7

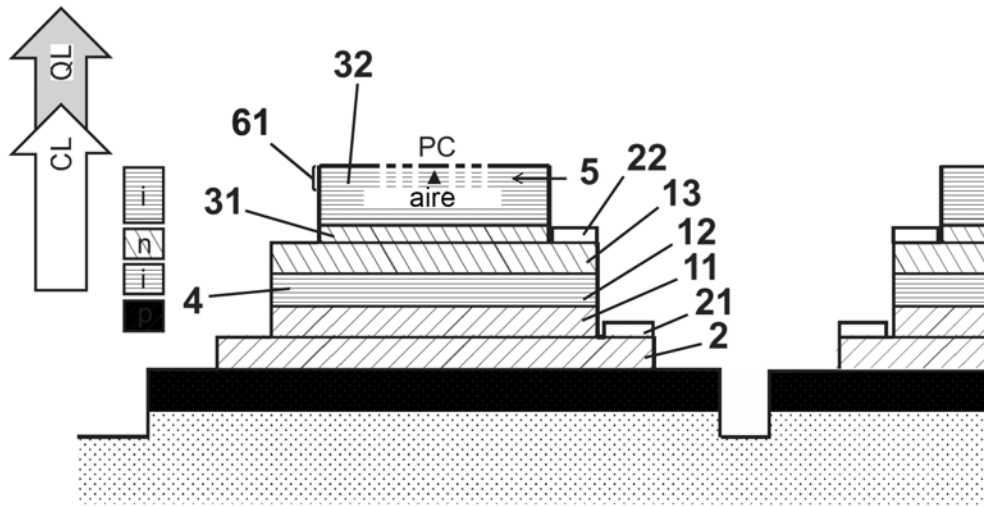


FIG. 8

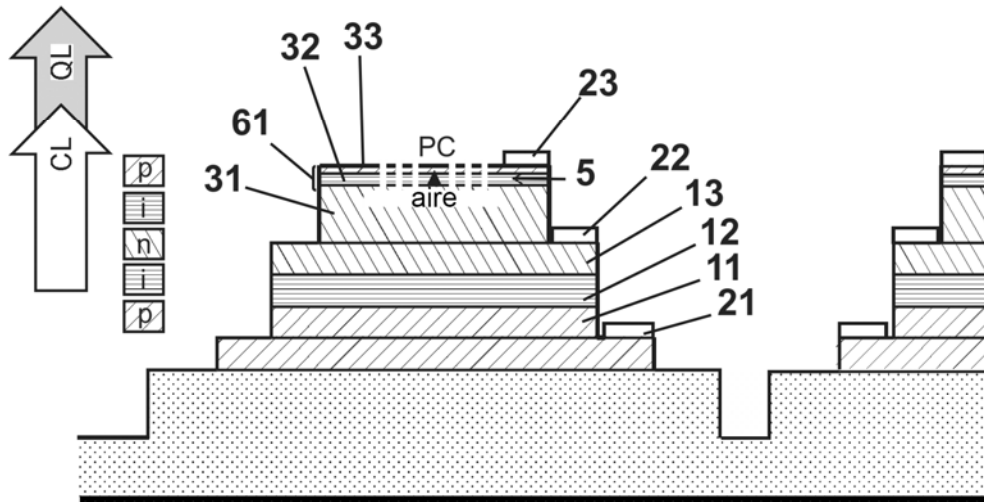


FIG. 9

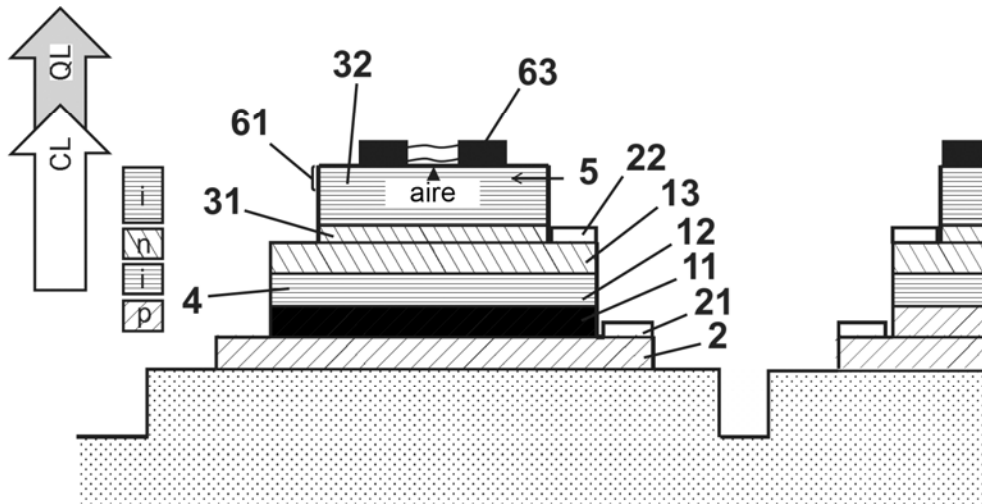


FIG. 10

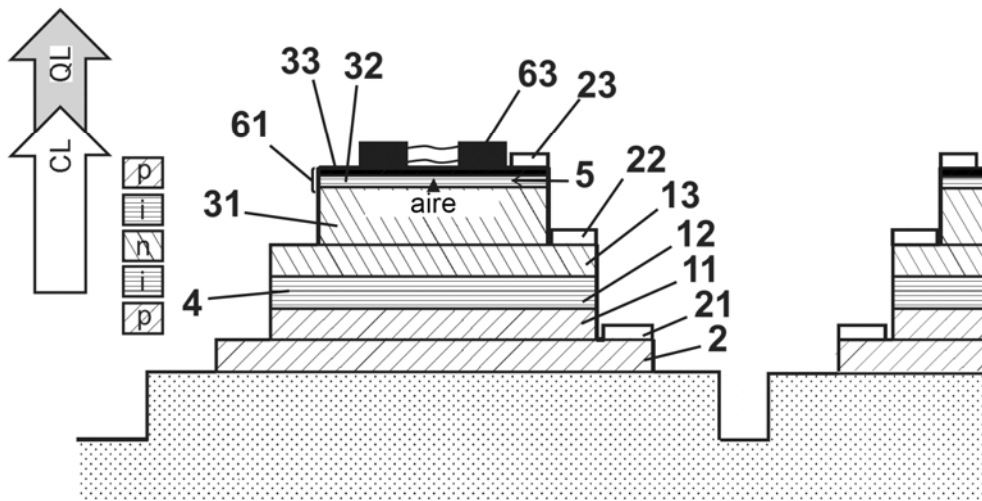


FIG. 11

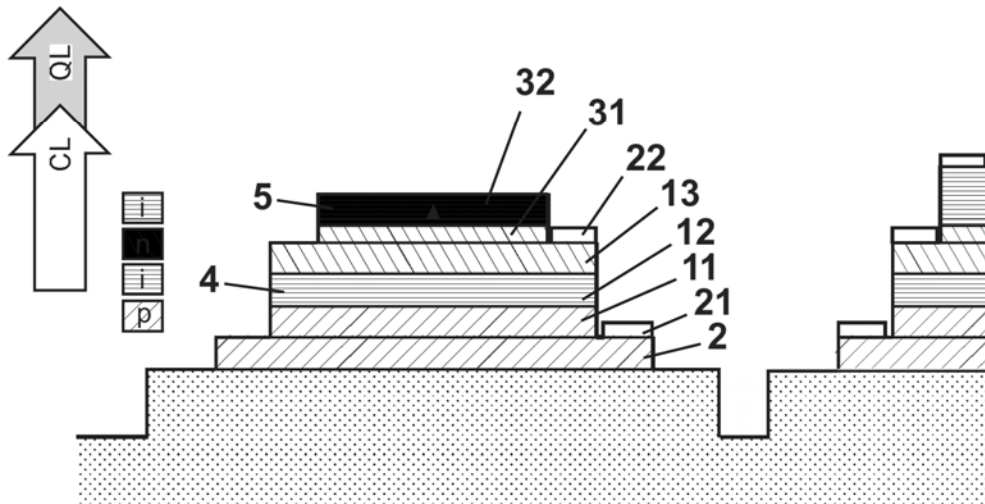


FIG. 12

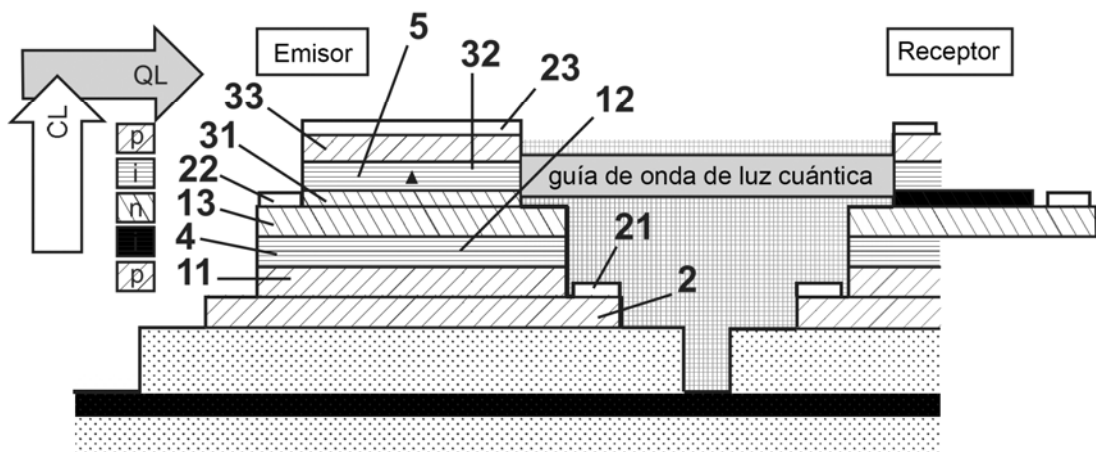


FIG. 13

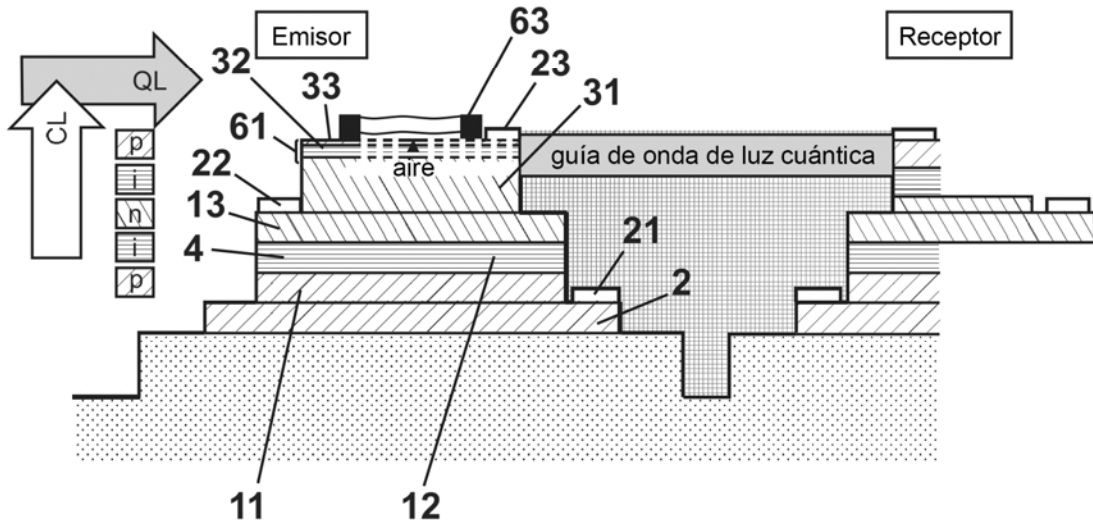


FIG. 14

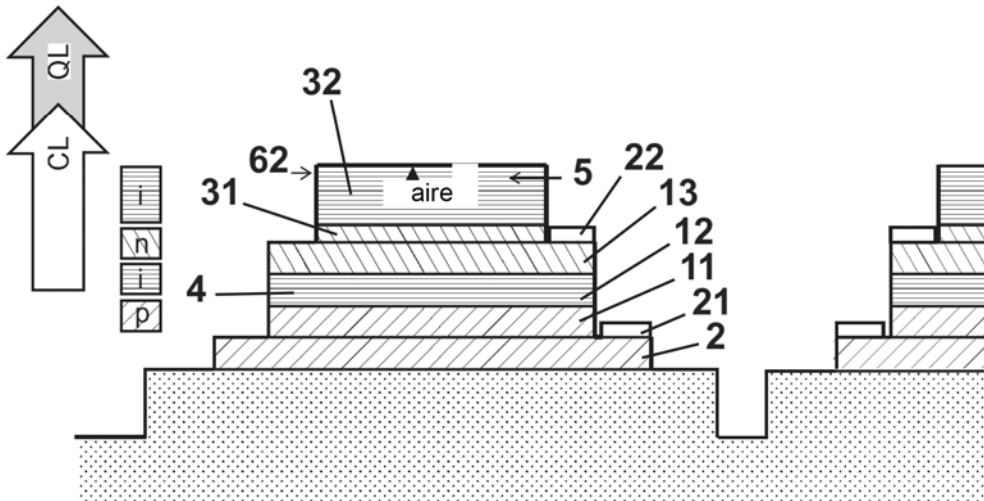


FIG. 15