



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 292 562**

51 Int. Cl.:
H04L 9/08 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Número de solicitud europea: **01907767 .6**

86 Fecha de presentación : **12.02.2001**

87 Número de publicación de la solicitud: **1262036**

87 Fecha de publicación de la solicitud: **04.12.2002**

54 Título: **Fuente de pocos fotones gobernable.**

30 Prioridad: **10.03.2000 FR 00 03096**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
16.03.2008

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
16.03.2008

73 Titular/es: **FRANCE TELECOM**
6, place d'Alleray
75015 Paris, FR

72 Inventor/es: **De Fornel, Frédérique;**
Favennec, Pierre-Noel;
Rahamani, Adel;
Salomon, Laurent y
Berguiba, Lotfi

74 Agente: **Justo Vázquez, Jorge Miguel de**

ES 2 292 562 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

Fuente de pocos fotones gobernable.

5 La presente invención se relaciona con una fuente de pocos fotones gobernable y de longitud de onda predeterminada.

La invención encuentra una aplicación particularmente ventajosa en el campo de las telecomunicaciones ópticas, particularmente las telecomunicaciones a corta distancia y privadas de alta seguridad.

10 En la continuación de esta memoria, se entenderá por la expresión “fuente de pocos fotones” una fuente de luz susceptible de emitir un fotón único o algunos fotones.

15 De manera general, las telecomunicaciones ópticas tradicionales ponen en ejecución equipos que, como las fuentes de láser, se diseñan para permitir la utilización de fotones en gran concentración, esto para obtener una energía luminosa máxima y una mayor distancia de comunicación.

20 Sin embargo, se realizan actualmente trabajos en la dirección de los sistemas de comunicación óptica de bajo flujo de fotones, yendo incluso hasta los sistemas de un fotón único (véase los artículos de J.P. Goedgebuer, L. Larger y D. Delorme, Phys. Rev. Lett., 82, 8, 1656, 1999 y de A. Muller, H. Zbinden y de N. Gisin, Europhys. Lett., 33, 335, 1995). De hecho, estos dispositivos de pocos fotones son particularmente requeridos para el estudio de la criptografía cuántica, la que reposa sobre las modificaciones de firma de los fotones cuando son detectados, de conformidad con el principio de incertidumbre de Heisenberg. Es entonces necesario poder manejar e identificar los fotones únicos y, por lo tanto, disponer de fuentes verdaderas de un fotón o atenuar flujos de fotones y trabajar sobre las estadísticas.

25 Las fuentes de pocos fotones estudiadas hoy parten generalmente de estructuras relativamente complicadas: estructuras complejas III-V en microcavidades o moléculas cromóforas muy diluidas. Pero, en cualquier caso, estos sistemas conocidos no conducen a fuentes de pocos fotones que serían utilizables en las telecomunicaciones ópticas para el despliegue de la criptografía cuántica.

30 También, el problema técnico a solucionar por el objeto de la presente invención es proponer una fuente de pocos fotones gobernable y de longitud de onda predeterminada, que tendrían una estructura simple, cuyo flujo sería bajo y gobernable, y que podría funcionar a la temperatura ambiente con las longitudes de onda que interesan para las telecomunicaciones ópticas en fibra, particularmente próximo al infrarrojo alrededor de $1.5 \mu\text{m}$.

35 La solución al problema técnico planteado consiste, según la presente invención, en que dicha fuente comprende un material sólido en el cual son introducidos en concentración diluida elementos luminiscentes a dicha longitud de onda predeterminada, un dispositivo de excitación de dichos elementos luminiscentes, y una sonda apta para capturar, por acoplamiento en el campo próximo, al menos un fotón emitido por uno de los elementos luminiscentes.

40 Así, en la fuente conforme a la invención, los fotones son emitidos por los elementos luminiscentes introducidos en el material sólido en cantidad conocida y controlada según la concentración requerida. Luego, son capturados por la sonda según los procesos físicos relacionados con la óptica de campo próximo.

45 Para obtener una fuente de pocos fotones conforme a la invención, se prevé que la concentración superficial de los elementos luminiscentes en material sólido es inferior a 10 por μm^2 . Más particularmente, la concentración superficial es inferior a 1 por μm^2 para una fuente de fotón único.

50 La fuente de pocos fotones gobernable, objeto de la invención, permite por lo tanto realizar comunicaciones totalmente protegidas por la criptografía cuántica, tanto sobre fibra o inalámbrica en espacio abierto. En el primer caso, el fotón capturado por dicha sonda es emitido en el espacio abierto, y después detectado por los transductores ópticos. Este tipo de puesta en práctica es apropiada para las comunicaciones a cortas distancias, del orden de algunas decenas de metros. En el segundo caso, una fibra óptica es acoplada a dicha sonda para el transporte del fotón capturado, hasta un dispositivo de detección. Este modo de realización permite comunicaciones sobre sitios más extendidos, de 20 kilómetros de radio máximo, o en edificios de negocios por ejemplo.

55 De manera ventajosa, el elemento luminiscente es un ión de tierra rara particularmente tomado de la lista constituida por el erbio, praseodimio, neodimio e iterbio. Se seleccionará más particularmente el ión Er^{3+} cuya longitud de onda de emisión situada a $1,5 \mu\text{m}$ es ampliamente utilizada en las telecomunicaciones ópticas sobre fibra. Los iones erbio son de preferencia introducidos bajo concentración diluida en un material sólido que presenta una gran banda de energía prohibida, los aislantes eléctricos en particular, ya que ha sido establecido (Electronics Letters, 25, 11, 718, 1989) que la emisión del erbio con $1,5 \mu\text{m}$ a la temperatura ambiente es obtenida bajo una excitación superior a 0,8 eV, lo que impone materiales-hospederos cuya banda de energía prohibida sea al menos igual a este valor.

65 De una manera práctica, dicha sonda está formada por una punta fina de tamaño inferior a $1 \mu\text{m}$. A título de ejemplo, la misma está constituida por el extremo de una fibra óptica, en cristal o en sílice.

ES 2 292 562 T3

Finalmente, la fuente de pocos fotones según la invención tiene la ventaja de poder ser gobernada. Para este propósito, se prevé que la misma comprenda medios de control de la captura por la sonda del fotón emitido. Estos medios pueden ser medios de control de la distancia entre la sonda y el elemento luminiscente.

5 En la conclusión, la fuente de pocos fotones gobernable, objeto de la invención, abre la vía a los sistemas de comunicación ópticos cuánticos sobre fibra o inalámbricos, a cortas distancias y altamente protegidos por la utilización de la criptografía cuántica.

La descripción que seguirá con relación a los dibujos anexados, dados a título de ejemplos no limitativos, hará comprender bien en qué consiste la invención y de cómo puede ser realizada.

La figura 1 es un esquema de un modo de realización de una fuente de fotón único gobernable conforme a la invención.

15 La figura 2 es un esquema de un modo de realización de una fuente de algunos fotones conforme a la invención.

En la figura 1 se representa una fuente de fotón único gobernable y de longitud de onda predeterminada, por ejemplo $1,5 \mu\text{m}$, que comprende un material sólido 10, o material-hospedero, en el cual son introducidos los elementos luminiscentes 11 que emiten a $1,5 \mu\text{m}$ cuando están sometidos a la radiación producida por un dispositivo 20 de excitación. El elemento luminiscente de selección a esta longitud de onda es el ión erbio Er^{3+} .

El material-hospedero 10 será de preferencia sílice presentándose bajo la forma de placa, fácilmente manipulable, dieléctrica y por lo tanto con la amplia banda de energía prohibida, favorable a la luminiscencia de la tierra rara a temperatura ambiente. La sílice tiene por otra parte la ventaja de tener oxígeno como componente principal. Fue demostrado de hecho que, para aumentar la eficacia óptica de la impureza del erbio, era preferible utilizar material-hospederos que tenían como elementos principales el oxígeno o el flúor (*Japanese Journal of Applied Physics*, 29, L524, 1990). Por otra parte, este material es estable químicamente, puede ser fácilmente introducido y recocido hasta temperaturas de 900°C sin degradación.

La introducción se realiza de acuerdo con los resultados del trabajo de P.-N. Favennec y de sus colaboradores (véase "La introducción iónica para la microelectrónica y la optoelectrónica", Colección Técnica y Científica de Telecomunicaciones, Ediciones Masson, 1993).

Los parámetros de introducción propiamente dichos y los recocidos son condicionados por la selección de la sílice. La energía de los iones utilizada puede variar a partir de 10 keV con 800 keV. Las cantidades introducidas deberán ser compatibles con el resultado requerido. Para una fuente de fotón único, la concentración del erbio en la superficie del material sólido 10 será de preferencia inferior a 1 por μm^2 . Los recocidos son necesarios para activar ópticamente los iones erbio, es decir para ponerlos en sitio estable en el material-hospedero, y para cambiar la sílice perturbada por el bombardeo iónico evitando así una absorción de los fotones por defectos inducidos. La optimización de las condiciones del recocido de las placas de sílice introducidas da las condiciones siguientes: de 600 a 900°C para las temperaturas y de algunos segundos a algunas decenas de minutos para los tiempos de recocido.

Si el erbio fue mencionado explícitamente más arriba, es porque su longitud de onda de emisión a $1,5 \mu\text{m}$ presenta un fuerte interés en la telecomunicación óptica. Pero se entiende claramente que otras especies químicas son susceptibles de ser utilizadas. Entre las tierras raras, se puede citar, además del erbio, el praseodimio ($1,3 \mu\text{m}$), el neodimio ($1,06 \mu\text{m}$) y el iterbio ($1 \mu\text{m}$). También se menciona el uranio para una emisión de $2,5 \mu\text{m}$. Finalmente, las moléculas orgánicas luminiscentes pueden también ser apropiadas.

El material sólido 10 no está limitado a la sílice sino que se puede extender a otros materiales, la regla para la selección del par material-hospedero/elemento luminiscente es que la banda de energía prohibida del material sea inferior a la energía de transición radiactiva del elemento luminiscente.

Entre los materiales aislantes eléctricos, se puede seleccionar, además de la sílice, la alúmina, un nitruro, un polímero, un cristal de sílice o fluorado, un cristal fluorado, un sol-gel. Son también apropiados los semiconductores cristalinos (GaN , GaAs , GaP , GaSb , InP y sus derivados) o no cristalinos como el silicio amorfo o policristalino.

El dispositivo 20 de excitación debe proporcionar fotones de longitud de onda inferior a la longitud de onda de la luminiscencia deseada. Así, si uno desea una emisión de fotones a $1,5 \mu\text{m}$ por excitación de los iones erbio, el rayo excitante tendrá que contener fotones de longitud de onda inferior a $1,5 \mu\text{m}$, éste puede así ser un rayo luminoso situado próximo al infrarrojo, al visible o al rayo ultravioleta.

La excitación se hace para cualquier dispositivo 20 gobernable electrónicamente en impulsos cortos cuya radiación es fotónica y resultado de un láser, de una fuente de luz blanca, u obtenida por bombardeo electrónico por medio de un cañón de electrones por ejemplo.

65 Como lo muestra la figura 1, un fotón emitido por un elemento luminiscente es capturado por una sonda 30 según el mecanismo físico del acoplamiento en campo próximo. Generalmente, la óptica de campo próximo resulta de la interacción, a una distancia inferior a la longitud de onda utilizada, entre un elemento nanométrico y el campo total

ES 2 292 562 T3

generado en la vecindad de la especie luminiscente (“Las ondas evanescentes en óptica y en optoelectrónica” por F. de Fornel Colección Técnica y Científica de las Telecomunicaciones, Ediciones Eyrolles, 1997). En la figura 1, dicho elemento nanométrico está constituido por la sonda 30, que está formada por una punta deshilachada 31 de tamaño inferior a $1\ \mu\text{m}$ colocada a menos de 100 nm de la superficie del material sólido 10. La función de la sonda 30 es por lo tanto capturar el fotón emitido por un elemento luminiscente y dirigirlo hasta una fibra óptica 40 terminada por un detector 50.

La punta deshilachada 31 de la sonda 30 puede ser un extremo de fibra óptica de sílice, del cristal fluorado, de sílice dopada con erbio o de otra tierra rara. Puede ser también dieléctrica o semiconductor, en carbón o de silicio. Finalmente, puede estar revestida totalmente o superficialmente de otros materiales dieléctricos o metálicos.

La fuente de la figura 1 es gobernada en intensidad por medios de control de la captura por la sonda 30 del fotón emitido. Estos medios pueden ser medios de control de la distancia entre la sonda 30 y el elemento luminiscente, como componentes piezoeléctricos, fotoelásticos, microelectromecánicos.

La fuente de la figura 2 difiere de la de la figura 1 en que se trata de una fuente de algunos fotones en la cual la concentración en la superficie de los elementos luminiscentes es más alta pero inferior a $10\ \text{por}\ \mu\text{m}^2$. Otra diferencia reside en el hecho de que los fotones capturados por la sonda 30 son emitidos sin alambre al aire libre hasta el detector 50. El alcance de tal fuente es por supuesto inferior que el de una fuente dirigida por la fibra como en el caso de la figura 1.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Fuente de pocos fotones gobernable y de longitud de onda predeterminada, **caracterizada** porque dicha fuente comprende un material sólido (10) en el cual son introducidos en concentración diluida elementos luminiscentes (11) con dicha longitud de onda predeterminada, un dispositivo (20) de excitación de dichos elementos luminiscentes, y una sonda (30) apta para capturar, por acoplamiento en campo próximo, al menos un fotón emitido por uno de los elementos luminiscentes.
- 10 2. Fuente según la reivindicación 1, **caracterizada** porque la concentración superficial de los elementos luminiscentes en el material sólido es inferior a 10 por μm^2 .
3. Fuente según la reivindicación 2, **caracterizada** porque la concentración superficial es inferior a 1 por μm^2 para una fuente de fotón único.
- 15 4. Fuente según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, **caracterizada** porque el fotón capturado por dicha sonda (30) se emite en espacio abierto.
- 20 5. Fuente según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, **caracterizada** porque una fibra óptica (40) es acoplada a dicha sonda (30) para el transporte del fotón capturado.
6. Fuente según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, **caracterizada** porque dicho elemento luminiscente es un ión de tierra rara.
- 25 7. Fuente según la reivindicación 6, **caracterizada** porque dicha tierra rara es seleccionada de la lista constituida por el erbio, el praseodimio, el neodimio, y el iterbio.
8. Fuente según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, **caracterizada** porque dicho elemento luminiscente es el uranio.
- 30 9. Fuente según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, **caracterizada** porque dicho elemento luminiscente es una molécula orgánica.
10. Fuente según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, **caracterizada** porque dicho material sólido (10) es un aislante eléctrico.
- 35 11. Fuente según la reivindicación 10, **caracterizada** porque dicho aislante eléctrico es seleccionado de la lista constituida por la sílice, la alúmina, un nitruro, un polímero, un cristal, un cristal fluorado, un sol-gel.
- 40 12. Fuente según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, **caracterizada** porque dicho material sólido (10) es un semiconductor.
13. Fuente según la reivindicación 12, **caracterizada** porque dicho semiconductor es seleccionado de la lista constituida por el silicio amorfo, silicio policristalino, así como por GaN, GaAs, GaP, GaSb, InP y sus derivados.
- 45 14. Fuente según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 13, **caracterizada** porque comprende medios de control de la captura por la sonda (30) del fotón emitido.
- 50 15. Fuente según la reivindicación 14, **caracterizada** porque dichos medios de control son medios de control de la distancia entre la sonda (30) y el elemento luminiscente.
16. Fuente según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 15, **caracterizada** porque dicha sonda (30) está formada por una punta deshilachada (31) de tamaño inferior a $1 \mu\text{m}$.
- 55 17. Fuente según la reivindicación 16, **caracterizada** porque dicha punta deshilachada (31) es de un material dieléctrico o semiconductor.
18. Fuente según la reivindicación 16, **caracterizada** porque dicha punta deshilachada (31) es de carbón o de silicio.
- 60 19. Fuente según cualquiera de las reivindicaciones 16 a 18, **caracterizada** porque dicha punta deshilachada (31) está constituida por el extremo de una fibra óptica.

FIG. 1

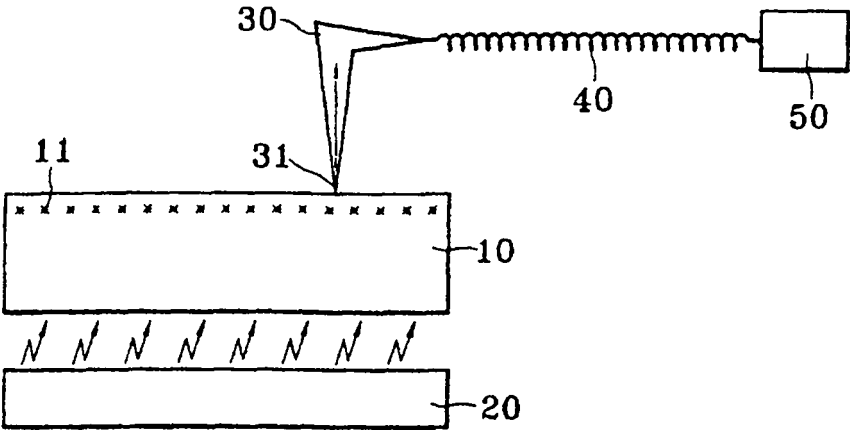


FIG. 2

