

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **3 028 614**

51 Int. Cl.:

H04L 9/08 (2006.01)

H04B 10/70 (2013.01)

H04J 14/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.09.2021 E 21200138 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.03.2025 EP 4160976**

54 Título: **Enrutamiento de baja pérdida para comunicación cuántica**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
19.06.2025

73 Titular/es:

**FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR
FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN
FORSCHUNG E.V. (100.00%)
Hansastr. 27c
80686 München, DE**

72 Inventor/es:

**STEINLECHNER, FABIAN y
MARQUES MUNIZ, ANDRÉ LUIZ**

74 Agente/Representante:

PONTI & PARTNERS, S.L.P.

ES 3 028 614 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

Enrutamiento de baja pérdida para comunicación cuántica

5 **[0001]** La presente invención proporciona un procedimiento de enrutamiento de baja pérdida para comunicación cuántica según la reivindicación 1 y un sistema de enrutamiento de baja pérdida para comunicación cuántica según la reivindicación 8.

10 **[0002]** Estados cuánticos de luz, en particular los estados de fotón único, permiten la transmisión de información cuántica entre usuarios y, por lo tanto, permiten una comunicación segura, por ejemplo, a través de la distribución cuántica de claves (*Quantum Key Distribution*, QKD). Un desafío hacia la realización de redes de comunicación cuántica es el enrutamiento de estados cuánticos a múltiples usuarios.

15 **[0003]** La mayoría de los sistemas de comunicación cuántica conocidos en las redes son estáticos y apuntan desde la fuente a un receptor en particular, con la desventaja de que el sistema no se puede adaptar o cambiar, por ejemplo, para agregar nuevos receptores. En redes estáticas, el enrutamiento se realiza mediante una fuente con un amplio espectro de longitud de onda, la multiplexación de este amplio espectro en pequeñas bandas de longitud de onda para los receptores y una asignación fija de las bandas de longitud de onda a los receptores. El amplio espectro de la fuente se divide según el número de receptores, lo que conduce a una baja tasa de fotón único transmitida a
20 cada receptor y, por lo tanto, a una baja tasa de comunicación en el caso de múltiples receptores.

[0004] En los sistemas de red dinámica conocidos donde se pueden agregar o quitar receptores, se utilizan enrutadores ópticos controlados eléctricamente con la desventaja de altas pérdidas.

25 **[0005]** Otras soluciones de la técnica anterior se describen en los documentos US 2007/065154 A1 (LUO YUHUI [CN] ETAL) 22 Marzo 2007 y US 2009/180616 A1 (BRODSKY MIKHAIL [US] Y OTROS) 16 Julio 2009.

[0006] Un objeto de la presente invención es proporcionar un procedimiento y sistema más flexibles, mejorados y rentables para la comunicación cuántica con un alto ancho de banda de comunicación.

30 **[0007]** Según la presente invención, este objeto se logra mediante un procedimiento de enrutamiento de baja pérdida para comunicación cuántica según la reivindicación 1.

[0008] El objeto se logra mediante un procedimiento de enrutamiento de baja pérdida para la comunicación
35 cuántica, comprendiendo una fuente de par de fotones entrelazados, un enrutador, tres o más receptores y una red cuántica que conecta cada receptor a través de un canal cuántico con la fuente, por lo que el procedimiento comprende las etapas

- 40 i) generación de un estado cuántico en la fuente y transmisión del estado cuántico al enrutador, por lo que el estado cuántico es un par de fotones entrelazados con un fotón de señal y un fotón inactivo;
- ii) asignación del estado cuántico según las longitudes de onda del fotón de señal a un primer canal cuántico y el fotón inactivo a un segundo canal cuántico por el enrutador;
- iii) transmisión del estado cuántico a través de los canales cuánticos a los dos receptores, preferentemente un primer y un segundo receptor;
- 45 iv) detección del estado cuántico en los dos receptores para establecer una comunicación cuántica entre los dos receptores.

[0009] Según la invención, la fuente comprende un medio de modificación, y la fuente está conectada con el enrutador a través de un canal cuántico de múltiples longitudes de onda, y el medio de modificación establece la
50 longitud de onda del estado cuántico generado, preferentemente de la señal y/o el fotón inactivo, en la etapa i) para permitir una asignación específica de la señal y el fotón inactivo en la etapa ii) a dos canales cuánticos específicos a dos receptores específicos, para permitir una comunicación cuántica entre el primer receptor específico y el segundo receptor específico.

55 **[0010]** Según la presente invención, este objeto se logra mediante un sistema de enrutamiento de baja pérdida para comunicación cuántica según la reivindicación 8.

[0011] El objeto se logra además mediante un sistema de enrutamiento de baja pérdida para comunicación
60 cuántica, comprendiendo

- una fuente para la generación de un estado cuántico, preferentemente una única fuente de fotones, y/o una fuente de luz coherente débil para la distribución de claves cuánticas de estado señuelo, o
- una fuente de pares de fotones entrelazados y
- un enrutador para la asignación del estado cuántico a uno o más canales cuánticos según la longitud de onda del
65 estado cuántico, y

una red cuántica que conecta cada receptor a través de un canal cuántico con la fuente para la transmisión del estado cuántico, y dos o más receptores para la detección del estado cuántico.

5 **[0012]** Según la invención, la fuente comprende un medio de modificación para establecer la longitud de onda del estado cuántico generado, y la fuente está conectada con el enrutador a través de un canal cuántico de múltiples longitudes de onda.

10 **[0013]** La asignación significa aquí que el estado cuántico es redirigido o asignado a un canal cuántico por el enrutador según las longitudes de onda. Esto significa que el espectro del estado cuántico no se divide en múltiples bandas de longitud de onda como en los sistemas conocidos para permitir una comunicación entre diferentes receptores. La ventaja de una asignación son las tasas de comunicación más altas por el uso de todo el espectro de longitud de onda del estado cuántico para una comunicación entre la fuente y los receptores específicos o dos receptores específicos.

15 **[0014]** Una ventaja del procedimiento y sistema de la invención es la alta tasa de comunicación entre dos receptores, o la fuente y un receptor. Esto se realiza mediante la generación dinámica de la longitud de onda de los estados cuánticos en la fuente, además de la asignación estática y, por lo tanto, de baja pérdida en el enrutador y el uso de todo el espectro del estado de los fotones. Una ventaja es que no se debe ajustar o cambiar la red o el medio de asignación para permitir una comunicación a diferentes receptores, como en los sistemas conocidos, sino que la asignación se realiza mediante la generación dependiente de la longitud de onda del estado cuántico en la fuente por el medio de modificación.

20

[0015] El procedimiento y el sistema inventivos generan un estado cuántico con una longitud de onda específica y asignan el estado cuántico con una longitud de onda específica al receptor específico. En contraste con esto en los sistemas conocidos, se utiliza una fuente con una banda de longitud de onda ancha que divide la banda de longitud de onda ancha del estado cuántico mediante un multiplexor de longitud de onda en múltiples partes, lo que conduce a una pérdida drástica de la tasa de comunicación entre dos receptores específicos.

25

30 **[0016]** El objeto se logra además mediante un procedimiento de enrutamiento de baja pérdida para la comunicación cuántica, según una de las realizaciones anteriores, para una red dinámica con un nuevo receptor. Según la invención antes de las etapas i) a iv) según una de las realizaciones anteriores, el procedimiento comprende las etapas adicionales de:

- 35 a) adición de un nuevo receptor a la red mediante la conexión del enrutador con el nuevo receptor a través de un nuevo canal cuántico;
- b) asignación de una nueva longitud de onda en el enrutador para el nuevo receptor;
- c) etapa i) a iv) según una de las realizaciones anteriores con un estado cuántico con la nueva longitud de onda mediante los medios de modificación con el fin de establecer una comunicación entre la fuente y el nuevo receptor
- 40 o entre un receptor específico y el nuevo receptor.

[0017] Una ventaja del procedimiento para una red dinámica es la capacidad de agregar un nuevo receptor sin cambiar los componentes de la fuente y el enrutador y al mismo tiempo permitir la alta velocidad de comunicación del procedimiento y sistema de la invención, incluso para el nuevo receptor. Esto se realiza mediante el procedimiento y el sistema de la invención mediante una asignación de una nueva longitud de onda al nuevo receptor y la capacidad de la generación de estados cuánticos dependientes de la longitud de onda por la fuente y los medios de modificación. En los sistemas conocidos para redes dinámicas, los componentes de la fuente y/o el enrutador se cambian o se usa un multiplexor controlable que conduce a altas pérdidas. Una ventaja del procedimiento y sistema inventivos es que, al agregar un nuevo receptor, no se debe cambiar y adaptar todo el sistema de comunicación, por ejemplo, cambiando la fuente y el enrutador, sino que solo se asigna una nueva longitud de onda a los nuevos receptores y se genera un estado cuántico con la nueva longitud de onda por la fuente y los medios de modificación.

45

50

[0018] En una realización preferida de la invención, el fotón individual en la etapa i) se genera mediante un láser de fotón individual, preferentemente un punto cuántico. En una realización preferida de la invención, el fotón individual en la etapa i) es generado por un láser y un atenuador con el fin de atenuar el haz de láser generado a un nivel de fotón individual. En una realización preferida de la invención, el fotón individual en la etapa i) se genera mediante un efecto óptico no lineal, preferentemente mediante mezcla de cuatro ondas. En una realización preferida de la invención, la fuente de fotones individuales es un láser de fotones individuales, o un láser y un atenuador para generar fotones individuales, o una fuente de fotones individuales mediante la interacción de un láser de bombeo con un cristal no lineal, preferentemente mediante mezcla de cuatro ondas para generar fotones individuales.

55

60

[0019] En una realización preferida de la invención, el pulso de luz coherente débil en la etapa i) es generado por un láser y un atenuador con el fin de atenuar el haz de láser generado al pulso de luz coherente débil. En una realización preferida de la invención, la fuente de luz coherente débil es un láser y un atenuador para generar el pulso de luz coherente débil. El láser y el atenuador pueden usarse como la fuente de fotones individuales y/o la fuente de

65

luz coherente débil, por ejemplo, generando fotones individuales impulsando el láser a un nivel de energía bajo, o generando un pulso de luz coherente débil impulsando el láser a varios niveles de energía más altos o cambiando la atenuación del atenuador.

5 **[0020]** En una realización preferida de la invención, el par de fotones entrelazados en la etapa i) se genera por un efecto óptico no lineal, preferentemente por mezcla de cuatro ondas o por conversión descendente, preferentemente por conversión descendente paramétrica espontánea. En una realización preferida de la invención, la fuente de pares de fotones entrelazados es una fuente de conversión descendente paramétrica o una fuente de mezcla de cuatro ondas comprendiendo un láser de bombeo y un cristal no lineal.

10

[0021] En una realización preferida de la invención, el medio de modificación para la fuente de fotones individuales y/o la fuente de luz coherente débil es una cavidad óptica ajustable, por lo que la fuente está ubicada en o delante de la cavidad óptica. En una realización preferida de la invención, el conjunto de la longitud de onda por los medios de modificación para la fuente de fotones individuales y/o la fuente de luz coherente débil en la etapa i) se realiza mediante una cavidad óptica ajustable. La ventaja de estas realizaciones es la modificación precisa de la longitud de onda, el pequeño ancho de banda de longitud de onda del estado cuántico generado y que la fuente dentro de la cavidad óptica se excita para emitir fotones solo en la longitud de onda deseada, lo que conduce a una mayor tasa de emisión. El pequeño ancho de banda de longitud de onda permite la asignación de la longitud de onda de una manera muy precisa sin pérdidas.

20

[0022] En una realización preferida de la invención, el medio de modificación para la fuente de fotones individuales es un calentador ajustable o enfriador ajustable para el láser que genera los fotones individuales y/o el pulso de luz coherente débil. En una realización preferida de la invención, el conjunto de la longitud de onda mediante los medios de modificación para la fuente de fotones individuales y/o la fuente de luz coherente débil en la etapa i) se realiza mediante el conjunto de la temperatura del láser de la fuente que permite que la fuente genere un fotón con la longitud de onda para el receptor específico. La ventaja de estas realizaciones es la implementación económica y rentable de los medios de modificación.

25

[0023] En una realización preferida de la invención, el medio de modificación para la fuente de fotones individuales es un láser de bombeo ajustable para la mezcla de cuatro ondas, y/o un calentador ajustable o enfriador ajustable para el cristal no lineal para la mezcla de cuatro ondas con el fin de generar fotones individuales. En una realización preferida de la invención, el conjunto de la longitud de onda mediante los medios de modificación para la fuente de fotones individuales en la etapa i) se realiza mediante el conjunto de la longitud de onda de la bomba mediante un láser de bombeo ajustable para la mezcla de cuatro ondas, y/o mediante el conjunto de la temperatura del cristal no lineal para la mezcla de cuatro ondas para generar fotones individuales. La ventaja de estas realizaciones es el ajuste preciso de la longitud de onda del estado cuántico generado.

30

35

[0024] En una realización preferida de la invención, el medio de modificación para la fuente de fotones individuales y/o la fuente de luz coherente débil es un elemento dispersivo, preferentemente un elemento dispersivo reflectante o transitivo, más preferentemente una rejilla, y/o una rejilla de difracción, y/o un filtro, y/o una rejilla de Bragg. En una realización preferida de la invención, el elemento dispersivo está dispuesto dentro o detrás de la fuente. En una realización preferida de la invención, el conjunto de la longitud de onda por los medios de modificación para la fuente de fotones individuales y/o la fuente de luz coherente débil en la etapa i) se realiza mediante un elemento dispersivo. La ventaja de estas realizaciones son los bajos costos y las posibilidades precisas de modificación de longitudes de onda.

40

45

[0025] En una realización preferida de la invención, el medio de modificación para la fuente de fotones entrelazados es un láser de bombeo ajustable de la fuente para bombear un cristal no lineal para la conversión descendente o para la mezcla de cuatro ondas. En una realización preferida de la invención, el medio de modificación para la fuente de fotones entrelazados es un calentador ajustable o un enfriador ajustable para el cristal no lineal o para el láser de bombeo. En una realización preferida de la invención, el conjunto de la longitud de onda para la fuente de fotones entrelazados en la etapa i) se realiza mediante el conjunto de la longitud de onda de la bomba para el cristal no lineal mediante un láser de bombeo ajustable para la conversión descendente o la mezcla de cuatro ondas o se realiza mediante el conjunto de la temperatura del cristal no lineal para la conversión descendente o la mezcla de cuatro ondas. La conversión descendente o mezcla de cuatro ondas son efectos ópticos no lineales, por lo que la interacción del cristal no lineal con una o dos longitudes de onda produce fotones con nuevas longitudes de onda. Las longitudes de onda de los fotones generados dependen de la condición de coincidencia de fase en estos procesos no lineales, por ejemplo, dependen de la longitud de onda de la bomba y/o de la temperatura del cristal no lineal. Una ventaja de esta realización es la generación dependiente de la longitud de onda de ambos fotones del par de fotones entrelazados.

50

55

60

[0026] En una realización preferida de la invención, el medio de modificación para la fuente de fotones entrelazados, y/o la fuente de fotones individuales, y/o la fuente de luz coherente débil es un modulador acústico-óptico, y/o un modulador electro-óptico, y/o un modulador de fase, y/o un modulador de fase de niobato de litio (LN) en la fuente con el fin de realizar un desplazamiento de frecuencia de un fotón generado en la fuente mediante una

65

rampa de fase lineal del modulador. En una realización preferida de la invención, el conjunto de la longitud de onda para la fuente de fotones entrelazados, y/o la fuente de fotones individuales, y/o la fuente de luz coherente débil en la etapa i) se realiza mediante un desplazamiento de frecuencia de la longitud de onda del estado cuántico debido a una modulación de fase del estado cuántico, preferentemente mediante una rampa de fase lineal del modulador. Una
5 ventaja de esta realización es la posibilidad de un cambio de longitud de onda separado de cada fotón del estado cuántico detrás de la etapa de producción de pares en la fuente.

[0027] Establecer la longitud de onda del estado cuántico generado significa aquí que el medio de modificación influye en la longitud de onda en el proceso de generación del estado cuántico en la fuente o influye en la longitud de
10 onda mediante un cambio de la longitud de onda del estado cuántico generado en la fuente. El primer caso puede realizarse, por ejemplo, mediante un láser de fotón único con una cavidad óptica ajustable o un medio de temperatura, o mediante una fuente de fotones entrelazados cambiando la longitud de onda de la bomba y/o la temperatura del cristal no lineal. Eso significa que los medios de modificación son un componente de la fuente que influye en la longitud de onda del estado cuántico en el proceso de generación. El segundo caso puede ser realizado, por ejemplo, por uno
15 de los moduladores mencionados anteriormente en una única fuente de fotones o una fuente de pares de fotones entrelazados. Eso significa que los medios de modificación son un componente de la fuente que influye en la longitud de onda del estado cuántico después del proceso de generación.

[0028] En una realización preferida de la invención, el ancho de banda de longitud de onda del estado cuántico de la fuente es menor que el ancho de banda de longitud de onda de los canales del enrutador, preferiblemente menor
20 que el ancho de banda de longitud de onda de cada canal del enrutador. En una realización preferida de la invención, el ancho de banda de longitud de onda de los fotones individuales generados, o el pulso de luz coherente débil, o el fotón de señal y el fotón inactivo es menor que el ancho de banda de longitud de onda de los canales del enrutador. La ventaja de esta realización es que no se pierden fotones en el enrutador mediante la asignación de los estados
25 cuánticos según la longitud de onda a los receptores previstos para la comunicación cuántica. En contraste con eso, en los sistemas conocidos el ancho de banda de la fuente se divide en múltiples partes para múltiples receptores que introducen altas pérdidas, reduciendo el ancho de banda de comunicación por las pérdidas y el número de receptores.

[0029] En una realización preferida de la invención, el sistema comprende un medio de control, mientras que
30 el medio de control establece la longitud de onda del estado cuántico para permitir una comunicación entre la fuente y un receptor específico, o entre dos receptores específicos. En una realización preferida de la invención, la fuente y/o los medios de modificación están controlados por los medios de control.

[0030] En una realización preferida de la invención, todo el ancho de banda de longitud de onda de la fuente
35 se utiliza para la comunicación entre la fuente y un receptor específico, o entre dos receptores específicos. La ventaja de esta realización es las tasas de transmisión más altas mediante el uso de todo el ancho de banda de la longitud de onda.

[0031] En una realización preferida de la invención, la asignación en la etapa ii) se realiza mediante
40 enrutamiento estático. En una realización preferida de la invención, el enrutador es un enrutador estático. Estático significa aquí, que el enrutamiento no se realiza por un interruptor o un elemento móvil o cambiante, sino por una separación espacial fija y/o determinada del estado cuántico según su longitud de onda. La ventaja de esa realización es el menor coste del enrutador y la mayor velocidad de transmisión en el enrutador.

[0032] En una realización preferida de la invención, el enrutador es una rejilla, preferentemente una rejilla de
45 fibra o una rejilla de espacio libre, preferentemente una rejilla de Bragg.

[0033] En una realización preferida de la invención, la asignación en la etapa ii) se realiza por difracción. En
50 una realización preferida de la invención, el enrutador es un elemento óptico difractivo.

[0034] En una realización preferida de la invención, los canales cuánticos son canales guiados,
preferentemente canales de fibra o los canales cuánticos son canales no guiados, preferentemente canales de espacio libre. En una realización preferida de la invención, en la etapa iii) la transmisión se realiza mediante la guía del estado
cuántico en un canal cuántico guiado, preferentemente en una fibra. En una realización preferida de la invención, en
55 la etapa iii) la transmisión se realiza mediante la alineación del estado cuántico en el enrutador y una transmisión no guiada en un canal no guiado, preferentemente en un canal de espacio libre.

[0035] En una realización preferida de la invención, el enrutador es un elemento óptico difractivo para dividir
un ancho de banda espectral amplio en múltiples anchos de banda de canal espectral y un espejo un sistema de
60 espejo, y/o una lente o un sistema de lentes. El elemento óptico difractivo realiza la separación de longitudes de onda, el sistema de espejo o lente realiza la guía de alineación del estado cuántico para transmitir el estado cuántico en un canal no guiado.

[0036] Añadir un nuevo canal para un canal guiado significa que el enrutador está conectado con el canal.
65 Añadir un nuevo canal para un canal no guiado significa que el enrutador se ajusta para permitir una transmisión del

estado cuántico hacia los nuevos receptores mediante alineación. Este ajuste se puede realizar, por ejemplo, mediante un elemento óptico difractivo, y/o un espejo o sistema de espejos, y/o lente o sistema de lentes.

5 **[0037]** En una realización preferida de la invención, la detección en la etapa iv) se realiza mediante un medio de medición y un medio de detección, por lo que el medio de medición establece la propiedad a medir y el medio de detección detecta el fotón. Una propiedad a medir para la comunicación podría ser, por ejemplo, la polarización, y/o el tiempo, y/o el momento angular orbital (*Orbital Angular Momentum*, OAM) o el momento angular de espín (*Spin Angular Momentum*, SAM).

10 **[0038]** En una realización preferida de la invención, el estado de fotón entrelazado está entrelazado en la polarización, y/o el tiempo, y/o el momento angular orbital (OAM) o el momento angular de espín (SAM).

15 **[0039]** En una realización preferida de la invención, los medios de medición comprenden un polarizador, y/o un divisor de haz de polarización, y/o un modulador electroóptico, y/o un modulador acústico-óptico, y/o una o más placas de onda, y/o un interferómetro, y/o un Modulador de Luz Espacial.

20 **[0040]** En una realización preferida de la invención, el medio de detección es un detector de fotones individuales, preferentemente detectores de fotones individuales de germanio (Ge), o silicio (Si), o germanio sobre silicio (Ge sobre Si), diodo de avalancha de fotones individuales (*Single-Photon Avalanche Diode*, SPAD), o detectores de fotones únicos de arseniuro de galio e indio (InGaAs/Inp), o diodo de avalancha de fotones individuales basado en semiconductores (*Semiconductor-Based Single-Photon Avalanche Diode*, SPAD), o detector de fotones individuales de nanohilos superconductores (*Superconducting Nanowire Single-Photon Detector*, SNSPD), o fotodiodos de avalancha de silicio (*Silicon Avalanche Photodiodes*, Si APD).

25 **[0041]** En una realización preferida de la invención, los medios de detección comprenden uno o más detectores para medir los fotones en al menos dos bases de medición mutuamente imparciales, y/o para medir los fotones en al menos uno o más estados ortogonales.

30 **[0042]** Los aspectos, características y ventajas anteriores y otros de la presente invención se harán más evidentes a partir de la siguiente descripción detallada cuando se toma en conjunto con los dibujos adjuntos.

Breve descripción de los dibujos:

35 **[0043]**

Fig. 1: diagrama esquemático del sistema inventivo para enrutamiento de baja pérdida;

Fig. 2: diagrama esquemático de la influencia de los medios de modificación en la longitud de onda de un solo fotón;

Fig. 3: diagrama esquemático de la influencia de los medios de modificación en la longitud de onda de un par de fotones;

40 Fig. 4: diagrama esquemático del sistema inventivo con un elemento óptico difractivo y un sistema de lentes como medios de modificación;

Fig. 5: cambio del canal para el sistema inventivo de la Fig. 4.

45 **[0044]** La Fig. 1 muestra el sistema inventivo para el enrutamiento de baja pérdida para la comunicación cuántica comprendiendo una fuente 1 con un medio de modificación 2, un enrutador 3, una red cuántica que conecta cada receptor 5 a través de un canal cuántico 4 con la fuente 1.

50 **[0045]** La fuente 1 en la Fig. 1 puede ser una única fuente de fotones y/o una fuente de luz coherente débil o una fuente de fotones entrelazados. La fuente 1 genera un estado cuántico, por lo que la longitud de onda del estado cuántico es establecida por los medios de modificación 2 y la fuente 1. El estado cuántico de la fuente de un solo fotón es un solo fotón. El estado cuántico de la fuente de luz coherente débil es un pulso de luz coherente débil. El estado cuántico de la fuente de fotones entrelazados es un par de fotones entrelazados. El estado cuántico se guía entonces a través de un canal de múltiples longitudes de onda 6 desde la fuente 1 al enrutador 3.

55 **[0046]** Establecer la longitud de onda del estado cuántico generado significa aquí que el medio de modificación 2 influye en la longitud de onda en el proceso de generación del estado cuántico en la fuente 1 o influye en la longitud de onda mediante un cambio de la longitud de onda del estado cuántico en la fuente 1.

60 **[0047]** El medio de modificación 2 para la fuente de fotones individuales y/o la fuente de luz coherente débil puede ser una cavidad óptica ajustable, o un calentador ajustable o enfriador ajustable para el láser que genera los fotones individuales o el pulso de luz coherente débil, o un láser de bombeo ajustable para la mezcla de cuatro ondas, y/o un calentador ajustable o enfriador ajustable para el cristal no lineal para la mezcla de cuatro ondas, o un elemento dispersivo, o un modulador acústico-óptico, y/o un modulador electro-óptico, y/o un modulador de fase, y/o un modulador de fase de niobato de litio (LN).

65

5 **[0048]** El medio de modificación 2 para la fuente de fotones entrelazados puede ser un láser de bombeo ajustable de la fuente para bombear un cristal no lineal para la conversión descendente o para la mezcla de cuatro ondas, o un calentador ajustable o un enfriador ajustable para el cristal no lineal o para el láser de bombeo, o un modulador acústico-óptico, y/o un modulador electroóptico, y/o un modulador de fase, y/o un modulador de fase de niobato de litio (LN).

10 **[0049]** El enrutador 3 asigna el estado cuántico según la longitud de onda del estado cuántico a un canal cuántico específico 4 para transmitir el estado cuántico a un receptor específico 5, o en el caso de un par de fotones entrelazados a dos receptores específicos 5. La asignación se realiza mediante una correlación fija de la salida del enrutador 3 con cada canal cuántico 4 y mediante una redirección fija del estado cuántico según su longitud de onda en el enrutador 3.

15 **[0050]** Como se muestra en la Fig. 1, tres receptores 5 están conectados a través de los canales cuánticos 4 con el enrutador 3 representado por las líneas continuas. Se puede añadir un nuevo receptor 5 a la red a través de un nuevo canal cuántico 4 representado por líneas discontinuas, sin cambiar ningún componente en el enrutador 3 o la fuente 1. La comunicación al nuevo receptor 5 (discontinuo) se realiza mediante la generación del estado cuántico en la fuente 1 con la nueva longitud de onda por la fuente 1 y los medios de modificación 2.

20 **[0051]** La Fig. 2 muestra un ejemplo de la influencia de los medios de modificación 2 en la longitud de onda de un estado cuántico como un solo fotón. La línea continua muestra el espectro de longitud de onda de un estado cuántico generado, en el caso de la Fig. 2 para el canal cuántico C3. El ancho de banda de longitud de onda del estado cuántico de la fuente 1 es menor que el ancho de banda de longitud de onda de los canales del enrutador 3. En una nueva etapa, se debe realizar la comunicación con el canal cuántico C4.

25 **[0052]** Para eso, los medios de modificación 2 y la fuente 1 generan por la influencia de los medios de modificación 2 los estados cuánticos con un espectro de longitud de onda para el canal cuántico 4 C4 como se representa por la línea discontinua.

30 **[0053]** La Figura 3 muestra un ejemplo de la influencia de los medios de modificación 2 en la longitud de onda de un estado cuántico como un par de fotones entrelazados. Las longitudes de onda de los fotones generados dependen de la condición de coincidencia de fase en procesos no lineales como la conversión descendente o la mezcla de cuatro ondas, por ejemplo, dependiendo de la longitud de onda de la bomba y/o de la temperatura del cristal no lineal. La Fig. 3 muestra el desplazamiento simétrico por las condiciones de coincidencia de fase del fotón de señal en el canal cuántico C_s1 y el fotón inactivo en el canal cuántico C_i1 hacia los canales cuánticos C_s3 y C_i3 por la influencia
35 de los medios de modificación 2 en la fuente 1.

40 **[0054]** Los medios de modificación 2 están influyendo en la generación del par de fotones entrelazados y, por lo tanto, en la longitud de onda de ambos fotones entrelazados. Esto se puede realizar mediante el medio de modificación 2 como un láser de bombeo ajustable de la fuente para bombear un cristal no lineal para la conversión descendente o para la mezcla de cuatro ondas, o un calentador ajustable o un enfriador ajustable para el cristal no lineal o para el láser de bombeo. También es posible establecer la longitud de onda para ambos fotones de un par de fotones entrelazados separados por un modulador acústico-óptico, y/o un modulador electro-óptico, y/o un modulador de fase, y/o un modulador de fase de niobato de litio (LN) para cada fotón.

45 **[0055]** Las Figs. 4 y 5 muestran el sistema inventivo con un enrutador 3 como elemento óptico difractivo y un sistema de lentes. El elemento óptico difractivo realiza la separación de longitudes de onda, el sistema de lentes realiza la alineación o guía del estado cuántico para transmitir el estado cuántico en un canal cuántico no guiado 4 a los receptores 5. Como en la Fig. 1 en la Fig. 4, se puede agregar un receptor adicional 5 (discontinuo) a la red para una comunicación entre el nuevo receptor 5 y un receptor ya existente 5 (Fig. 5), mediante la generación de un estado
50 cuántico con una nueva longitud de onda en la fuente 1 y los medios de modificación 2 y una asignación del estado cuántico según su longitud de onda al nuevo receptor 5.

Signos de referencia:

- 55 **[0056]**
- 1 fuente
 - 2 medios de modificación
 - 3 enrutador
 - 60 4 canal cuántico
 - 5 receptor
 - 6 canales cuánticos de longitud de onda múltiple

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de enrutamiento de baja pérdida para comunicación cuántica, comprendiendo una fuente de par de fotones entrelazados (1), un enrutador (3), tres o más receptores (5) y una red cuántica que conecta cada receptor a través de un canal cuántico (4) con la fuente (1), y la fuente (1) está conectada con el enrutador (3) a través de un canal cuántico de longitud de onda múltiple (6), por lo que el procedimiento comprende las etapas

- i) generación de un estado cuántico en la fuente (1) y transmisión del estado cuántico al enrutador (3), por lo que el estado cuántico es un par de fotones entrelazados con un fotón de señal y un fotón inactivo;
- ii) asignación del estado cuántico según las longitudes de onda del fotón de señal a un primer canal cuántico (4) y el fotón inactivo a un segundo canal cuántico (4) por el enrutador (3);
- iii) transmisión del estado cuántico a través de los canales cuánticos (4) a los dos receptores (5), preferiblemente un primer y un segundo receptor (5);
- iv) detección del estado cuántico en los dos receptores (5) para establecer una comunicación cuántica entre los dos receptores (5);

caracterizado porque

la fuente (1) comprende un medio de modificación (2), y los medios de modificación (2) establecen la longitud de onda del estado cuántico generado, preferentemente de la señal y/o el fotón inactivo, en la etapa i) para permitir una asignación específica de la señal y el fotón inactivo en la etapa ii) a dos canales cuánticos específicos (4) a dos receptores específicos (5), para permitir una comunicación cuántica entre el primer y el segundo receptores específicos (5).

2. Procedimiento de enrutamiento de baja pérdida para comunicación cuántica, según la reivindicación 1, para una red dinámica con un nuevo receptor (5),

caracterizado porque

antes de las etapas i) a iv), el procedimiento comprende para una red dinámica las etapas adicionales de:

- a) adición de un nuevo receptor (5) a la red conectando el enrutador (3) con el nuevo receptor (5) a través de un nuevo canal cuántico (4);
- b) asignación de una nueva longitud de onda en el enrutador (3) para el nuevo receptor (5);
- c) etapa i) a iv) según una de las reivindicaciones 1 o 2 con un estado cuántico con la nueva longitud de onda por los medios de modificación (2) para establecer una comunicación entre la fuente (1) y el nuevo receptor (5) o entre un receptor específico (5) y el nuevo receptor (5).

3. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 o 2,

caracterizado porque

el par de fotones entrelazados en la etapa i) se genera mediante un efecto óptico no lineal, preferentemente mediante mezcla de cuatro ondas o mediante conversión descendente, preferentemente mediante conversión descendente paramétrica espontánea.

4. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 3,

caracterizado porque

el conjunto de la longitud de onda para la fuente de fotones entrelazados (1) en la etapa i) se realiza mediante el conjunto de la longitud de onda de bombeo para el cristal no lineal mediante un láser de bombeo ajustable para la conversión descendente o la mezcla de cuatro ondas, o mediante el conjunto de la temperatura del cristal no lineal para la conversión descendente o la mezcla de cuatro ondas, y/o mediante un desplazamiento de frecuencia de la longitud de onda del estado cuántico debido a una modulación de fase del estado cuántico, preferentemente mediante una rampa de fase lineal de un modulador detrás del proceso de generación de pares.

5. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 4,

caracterizado porque

la asignación en la etapa ii) se realiza mediante enrutamiento estático, preferentemente una rejilla en fibra o una rejilla en espacio libre, preferentemente una rejilla de Bragg, o la asignación en la etapa ii) se realiza mediante difracción.

6. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 5,

caracterizado porque

en la etapa iii) la transmisión se realiza mediante la guía del estado cuántico en un canal cuántico guiado (4), preferentemente en una fibra, y/o en la etapa iii) la transmisión se realiza mediante la alineación del estado cuántico en el enrutador (3) y una transmisión no guiada en un canal no guiado (4), preferentemente en un canal de espacio libre (4).

7. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 6,
caracterizado porque
la detección en la etapa iv) se realiza mediante un medio de medición y un medio de detección.
- 5
8. Sistema de enrutamiento de baja pérdida para comunicación cuántica, comprendiendo
una fuente de par de fotones entrelazados (1) para la generación de un estado cuántico, y
un enrutador (3) para la asignación del estado cuántico a uno o más canales cuánticos (4) según la longitud de
onda del estado cuántico, y
una red cuántica que conecta cada receptor (5) a través de un canal cuántico (4) con la fuente (1) para la
transmisión del estado cuántico, y
dos o más receptores (5) para la detección del estado cuántico, y
la fuente (1) está conectada con el enrutador (3) a través de un canal cuántico de múltiples longitudes de onda (6)
donde
la fuente (1) comprende un medio de modificación (2) para permitir una comunicación cuántica entre dos primeros
y segundos receptores específicos (5) según la reivindicación 1 del procedimiento independiente.
- 10
- 15
9. Sistema según la reivindicación 8,
caracterizado porque
la fuente de par de fotones entrelazados (1) es una fuente de conversión descendente paramétrica (1) o una fuente
de mezcla de cuatro ondas (1) comprendiendo un láser de bombeo y un cristal no lineal.
- 20
10. Sistema según una de las reivindicaciones 8 o 9,
caracterizado porque
el medio de modificación (2) para la fuente de fotones entrelazados (1) es un láser de bombeo ajustable de la fuente
(1) para bombear un cristal no lineal para conversión descendente o para mezcla de cuatro ondas, o un calentador
ajustable o enfriador ajustable para el cristal no lineal o para el láser de bombeo, y/o un modulador acústico-óptico,
y/o un modulador electro-óptico, y/o un modulador de fase, y/o un modulador de fase de niobato de litio (LN) en la
fuente (1) para realizar un desplazamiento de frecuencia de un fotón generado en la fuente (1) por una rampa de fase
lineal del modulador.
- 25
- 30
11. Sistema según una de las reivindicaciones 8 a 10,
caracterizado porque
el enrutador (3) es un enrutador estático (3), preferentemente una rejilla de fibra o una rejilla de espacio libre,
preferentemente una rejilla de Bragg o un elemento óptico difractivo.
- 35

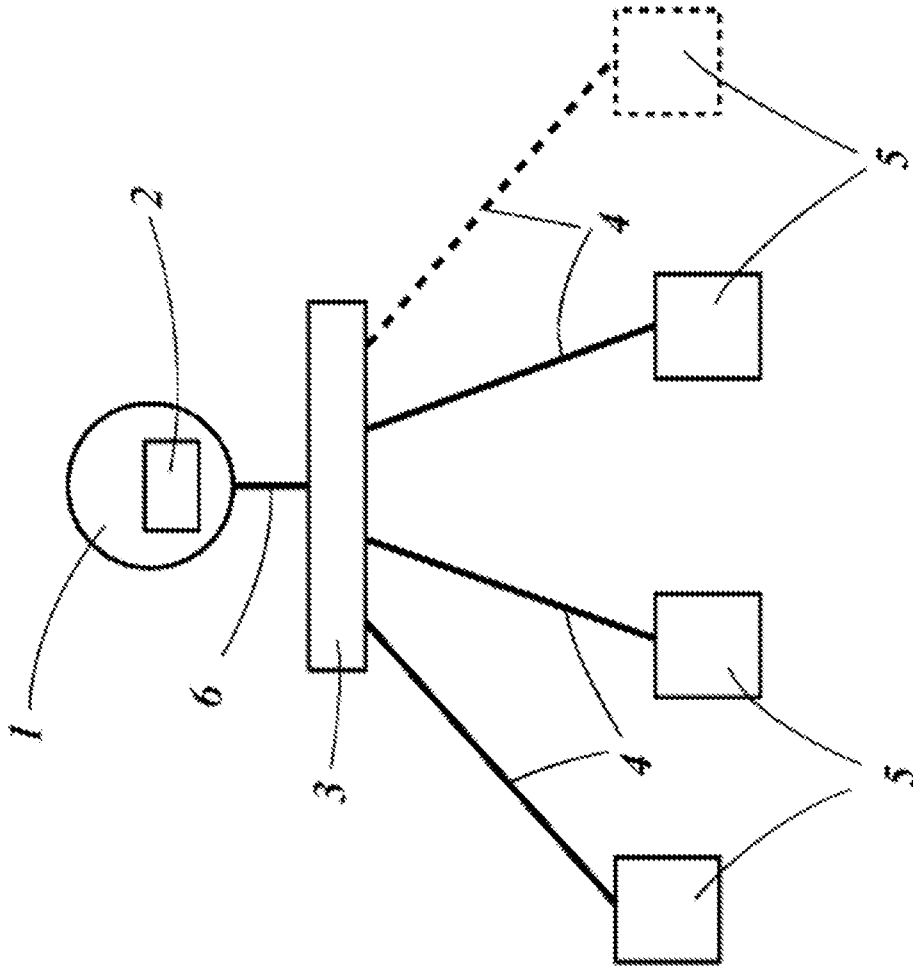


Fig. 1

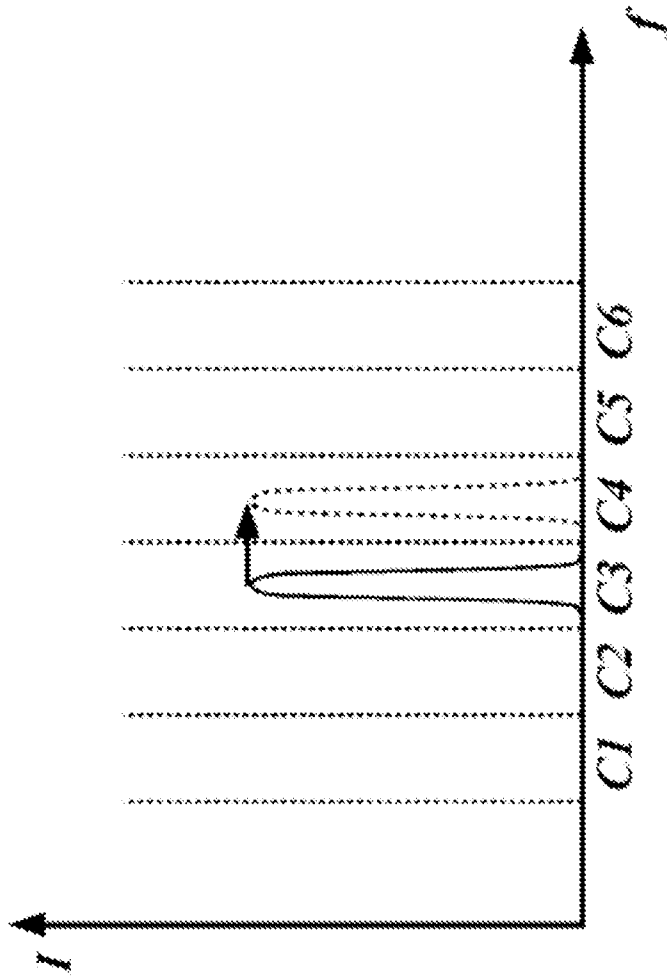


Fig. 2

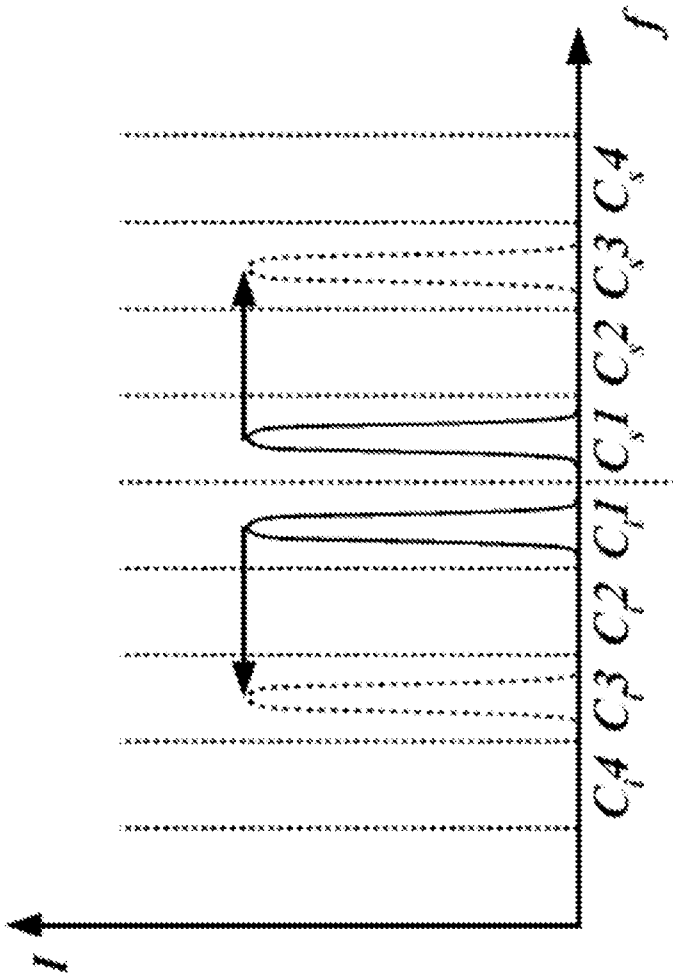


Fig. 3

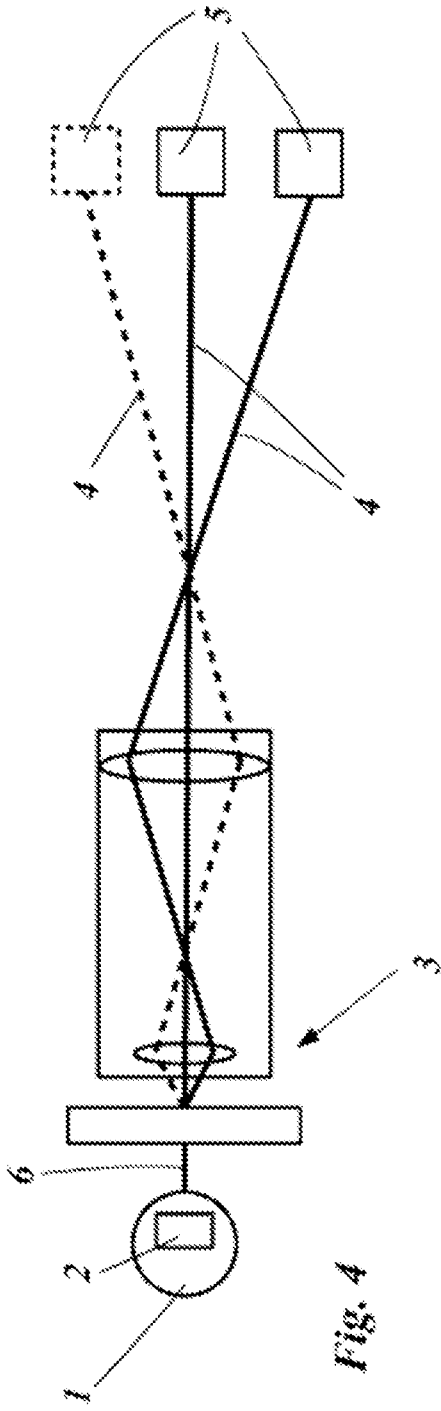


Fig. 4

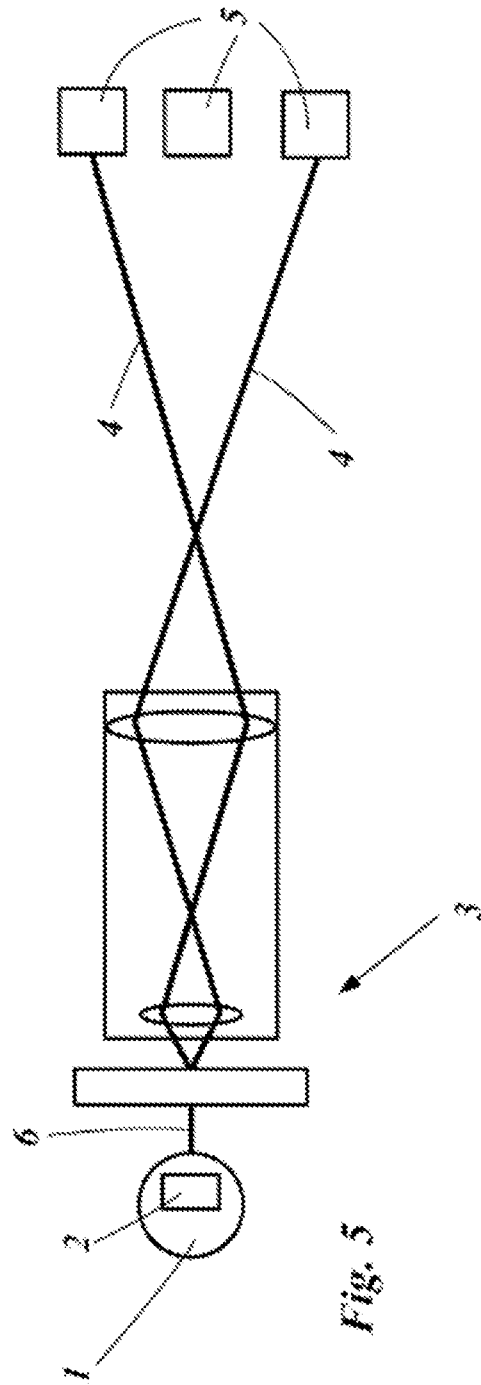


Fig. 5