

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 685 501**

51 Int. Cl.:

G02F 1/39 (2006.01)

G02F 1/355 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.07.2005** **E 10010843 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **30.05.2018** **EP 2309325**

54 Título: **Generación paramétrica de radiación de terahercios**

30 Prioridad:

27.07.2004 GB 0416673

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

09.10.2018

73 Titular/es:

**THE UNIVERSITY COURT OF THE UNIVERSITY
OF ST ANDREWS (100.0%)
College Gate North Street St Andrews
Fife KY16 9AJ, GB**

72 Inventor/es:

**RAE, CAMERON FRANCIS;
DUNN, MALCOLM HARRY y
TERRY, JONATHAN A.C.**

74 Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

ES 2 685 501 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

Generación paramétrica de radiación de terahercios

5 La presente invención se refiere a la generación de radiación electromagnética a través de un proceso de generación de ondas paramétricas y, en particular, radiación que está fuera del intervalo de transparencia normalmente acentuado del material óptico no lineal utilizado.

10 **Antecedentes de la invención**

10 Los dispositivos paramétricos son fuentes flexibles y convenientes de radiación coherente ampliamente sintonizable, que abarca todas las escalas de tiempo del pulso de femtosegundo a la de onda continua. En estos, se usa un haz coherente de radiación electromagnética para estimular un proceso no lineal en un cristal óptico no lineal, lo que da como resultado la división de la potencia/energía en la onda de bombeo coherente en dos ondas generadas, normalmente denominadas ondas de señal y libres. La señal generalmente se define como aquella onda que proporciona la salida útil y, por lo tanto, a lo largo de este documento se identifica como la onda que tiene la longitud de onda más larga de las dos ondas generadas.

20 Los dispositivos paramétricos pueden funcionar en varias configuraciones, incluyendo amplificadores, osciladores y generadores. En un amplificador paramétrico se produce una onda de bombeo coherente intensa para interactuar con el cristal óptico no lineal para producir amplificación en la señal y en las longitudes de onda ópticas libres. Un oscilador paramétrico utiliza un amplificador paramétrico dentro de un resonador de cavidad óptica en una o ambas de la señal y las ondas libres. Aquí, la señal y las ondas libres son autoiniciadas a partir de fluorescencia paramétrica/ruido o la cavidad se siembra por inyección mediante una fuente adecuada que funciona a la señal y/o a la longitud de onda libre. Un generador paramétrico genera ondas ópticas mediante la interacción de una onda de bombeo intensa coherente con un cristal óptico no lineal para producir paraméricamente otras dos ondas ópticas. No se proporciona ninguna cavidad para las ondas convertidas de manera descendente, ya que la ganancia paramétrica es suficientemente alta como para permitir la transferencia adecuada de energía/potencia a estas ondas con solo paso no resonante (o múltiple) del bombeo y/o las ondas de señal y/o libres a través del medio no lineal. De nuevo, en este caso, la señal y/o las ondas libres son autoiniciadas a partir de fluorescencia paramétrica/ruido o el generador se siembra por inyección mediante una fuente adecuada que funciona a la señal y/o a la longitud de onda libre.

35 Existe un interés considerable en ampliar la cobertura espectral de dispositivos paramétricos. Esto se debe a que a menudo se utilizan como fuentes de radiación coherente en intervalos espectrales o no cubiertos por ninguna otra fuente, o cuando una sola fuente de onda paramétrica es capaz de reemplazar una cantidad de fuentes que de otro modo serían necesarias para proporcionar la cobertura espectral requerida. Sin embargo, una seria limitación de los dispositivos paramétricos conocidos es el efecto perjudicial de la absorción de una o más de las tres ondas implicadas en la interacción no lineal dentro del propio medio no lineal. Como resultado, la cobertura espectral alcanzable a través de un esquema de generación paramétrica particular a menudo está limitado solo por la presencia de absorción y no por las características no lineales o de coincidencia de fase del medio no lineal que se está empleando. La eliminación de la restricción impuesta por la absorción daría como resultado una cobertura espectral mejorada.

45 Se ha identificado una solución para superar los problemas debido a la absorción. Implica el uso de un ajuste de fase no colineal, de tal manera que la onda objeto de absorción, generalmente la onda de señal, salga rápidamente del medio no lineal en una dirección que es sustancialmente lateral a la dirección de propagación de la onda de bombeo. Ejemplos de esta técnica se describen en los artículos "Efficient, tunable optical emission from LiNbO3 without a resonator", de Yarborough et al, Applied Physics Letters 15(3), páginas 102-104 (1969); "Coherent tunable THz-wave generation from LiNbO3 with monolithic grating coupler", de Kawase et al, Applied Physics Letters 68(18), páginas 2483-2485 (1996), and "Terahertz wave parametric source", de Kawase et al, Journal of Physics D: Applied Physics 35 (3), páginas R1-14 (2002). El último documento describe un oscilador paramétrico óptico que comprende una fuente de láser externa que comprende un medio de ganancia para generar un bombeo; un medio no lineal que puede funcionar para generar una señal y una onda libre en respuesta a ser estimulado con la onda del bombeo, de modo que el bombeo, las ondas de señal y libres no sean colineales; y una cavidad de onda libre en la que se proporciona el medio no lineal, en el que el eje óptico de la cavidad de la onda libre está en un ángulo con respecto a la trayectoria de la onda de bombeo. La figura 1 es una ilustración del conocido proceso de coincidencia de fase no colineal. Más específicamente, la figura 1(a) ilustra la geometría de las ondas de bombeo 1, las ondas libres 2 y de señal 3 que interactúan en el medio no lineal 4. La figura 1(b) ilustra el proceso de coincidencia de fase a través del llamado diagrama de vector k , donde k_p , k_i y k_s son los vectores de onda de las ondas de bombeo, libres y de señal respectivamente, el ángulo Θ es el ángulo subtendido por las ondas de bombeo 1 y libres 2 forman un ángulo Φ , el ángulo subtendido por las ondas de bombeo 1 y de señal 3.

65 Como puede verse en la figura 1(b), en el proceso de coincidencia de fase no colineal conocido, la onda de bombeo 1 y la onda libre 2 no son en sí mismas colineales dentro del medio no lineal 4. Sin embargo, para mantener la interacción no lineal necesaria entre las a lo largo de la longitud del medio no lineal 4, deben ser de suficiente

extensión radial (transversal) para mantener una superposición entre las mismas a lo largo de la longitud del medio 4. Esto significa que no es posible emplear tamaños de haz pequeños (es decir, bien enfocados) para estas ondas. Tener tamaños de haz pequeños es deseable porque aumenta la intensidad de las ondas, para reducir la potencia o la energía necesaria para alcanzar un nivel de ganancia paramétrica requerida para el funcionamiento del dispositivo.

Sumario de la invención

Un objetivo de la presente invención es proporcionar un dispositivo paramétrico óptico mejorado.

Según un aspecto útil para la comprensión de la invención, se proporciona un dispositivo paramétrico óptico, por ejemplo un generador paramétrico óptico o amplificador u oscilador, que comprende un material no lineal que puede funcionar para generar una onda de señal y libre en respuesta a ser estimulado con una onda de bombeo, en el que el medio no lineal es tal que el bombeo y las ondas libres son colineales y la onda de señal no es colineal.

Al disponer que la onda de señal sea no colineal con las otras ondas, esto significa que la onda de señal se aleja de las otras ondas y sale del medio no lineal dentro de una distancia corta y, por lo tanto, con una absorción reducida. Debido a que el bombeo y los haces libres son colineales, ahora es posible enfocar firmemente estos haces. Por lo tanto, la ganancia paramétrica disponible para una potencia/energía de bombeo dada no está restringida, como se describió anteriormente, por el requisito de mantener tamaños de haz relativamente grandes para asegurar el solapamiento del haz en toda la longitud del medio no lineal. Una ventaja del enfoque firme de los haces de bombeo y libres es que estos haces ahora se pueden propagar más cerca del borde del medio no lineal, reduciendo aún más la trayectoria sobre la que el haz de señal debe propagarse antes de salir del medio. Esto reduce aún más las pérdidas de absorción a las que está sujeto este haz. Tener las ondas de bombeo y locas colineales significa que se pueden usar elementos comunes tales como, pero no restringidos a, espejos para guiar estas ondas. Esto puede simplificar disposiciones de otra manera complicadas.

Preferiblemente, el material no lineal es un cristal periódicamente polarizado de tipo de banda oblicua, por ejemplo, niobato de litio. Los cristales no lineales de tipo de banda oblicua son conocidos y se han usado en un proceso de generación de frecuencia diferente, ver el artículo "Terahertz-wave surface-emitted difference frequency generation in slant-stripe-type periodically poled LiNbO3 crystal" de Sasaki et al. Applied Physics Letters 81 (18), páginas 3323 - 3325 (2002). Sin embargo, este tipo de cristal no se ha utilizado previamente en un dispositivo paramétrico en el que se usa una sola onda de bombeo para generar ondas de señal y libres. La figura 2 ilustra el proceso no lineal que se produce en un cristal polarizado de forma periódica de tipo de banda oblicua cuando se bombea con una sola onda de bombeo. En este caso, la onda de bombeo es colineal con la onda libre, pero la onda de señal se aleja en una dirección sustancialmente lateral a la onda de bombeo.

Preferiblemente, el dispositivo es un oscilador paramétrico individualmente resonante que tiene una cavidad para resonancia de la onda loca solamente. La onda libre puede generarse dentro de esta cavidad como resultado de la ganancia paramétrica que actúa inicialmente sobre el ruido paramétrico que se origina dentro del propio medio no lineal o cualquier onda de entrada (débil) desde una fuente externa que se emplea para sembrar la cavidad de las ondas libres.

El material no lineal puede estar situado dentro de una cavidad del láser de bombeo. Esto se conoce generalmente como una geometría intracavitaria. En esta configuración, el medio activo del láser de bombeo y el medio no lineal están ambos ubicados dentro de una cavidad común, y tanto la onda de bombeo como preferiblemente la onda libre resuenan mediante un conjunto común de espejos de cavidad, que simultáneamente forman la cavidad de bombeo y la cavidad del oscilador paramétrico. La generación de la onda de bombeo dentro de esta cavidad común significa que la onda de bombeo no tiene que acoplarse en la cavidad del oscilador paramétrico desde una fuente externa. Esto proporciona varias ventajas, particularmente cuando se utiliza un proceso de adaptación de fase de tipo de banda oblicua. En este caso, la onda de señal es generalmente de una longitud de onda mucho más larga que las ondas de bombeo y libres, y la onda libre es generalmente de una longitud de onda similar a la onda de bombeo. Las ondas libres y de bombeo tienen estados de polarización similares y están dispuestos para propagarse colinealmente. En el caso del oscilador paramétrico óptico con resonancia simple donde solo se oye la onda libre, se requiere una óptica de acoplamiento que idealmente tenga alta reflectividad para la onda libre y alta transmisión para la onda de bombeo, o viceversa. Esto puede ser difícil de fabricar cuando las ondas de bombeo y libres son de longitudes de onda similares, polarización similar y están dispuestas para propagarse colinealmente. Sin embargo, el uso de una configuración dentro de la cavidad puede eliminar estas dificultades, ya que se evita la necesidad de una óptica de acoplamiento. También evita la necesidad de coincidencia de haz y componentes del aislador. Además, dentro de la región de la cavidad de bombeo, la potencia de bombeo es mayor que la disponible fuera de una fuente de bombeo acoplada similar, pero óptimamente de salida, exponiendo así el cristal no lineal a una intensidad de onda de bombeo más alta que lo que sería fuera del resonador de la fuente de bombeo.

Aunque diversas geometrías intracavitarias se han descrito anteriormente, por ejemplo en "Low-pump-threshold continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator" de Stothard et al, Optics Letters 23 (24), páginas 1895-1897 (1998), estas no reconocen el beneficio de la técnica en el contexto de la propagación colineal de las ondas de

bombeo y locas cuando estas ondas tienen propiedades similares con respecto a la frecuencia, la polarización y la configuración espacial.

5 En otra configuración útil para la comprensión de la invención, el dispositivo puede tener una geometría de cavidad de mejora del bombeo, es decir, una geometría donde se encuentra el medio no lineal del generador/amplificador/oscilador paramétrico dentro de una cavidad que es capaz de resonar la onda de bombeo (proporcionada por un láser de bombeo externo), así como, preferiblemente, simultáneamente, la onda libre, formando así un oscilador paramétrico.

10 El uso de una geometría mejorada de bombeo proporciona un medio alternativo para superar las dificultades destacadas anteriormente que surgen debido a la propagación colineal de la onda de bombeo y la onda libre generada que tienen sustancialmente las mismas longitudes de onda y configuraciones espaciales y de polarización similares. Esto se debe a que cuando la onda de bombeo resuena y, por lo tanto, se mejora dentro de la cavidad de mejora de bombeo, la transmisión óptima de la óptica de acoplamiento de entrada para la onda de bombeo es normalmente de alrededor del 5 %. Cuando se encuentra en esta condición óptima, resulta en la transmisión completa de la onda de bombeo de entrada en la cavidad y el dispositivo recibe el nombre de impedancia combinada. Por lo tanto, incluso cuando las ondas de bombeo y libres son de longitudes de onda y polarizaciones similares, la fabricación de espejos del estado de la técnica de última generación permite que este espejo proporcione la alta reflectividad requerida (> 95 %) para la onda libre resonante, permitiendo así este espejo sirva como una óptica común para las ondas locas y de bombeo según sea necesario. Otra ventaja conocida del enfoque de mejora del bombeo es que el requerimiento de potencia de bombeo del láser de bombeo es menor de lo que se requeriría de otra manera sin cavidad de mejora del bombeo. El enfoque de mejora del bombeo es particularmente, pero no exclusivamente, apropiado para el caso de los dispositivos de onda continua.

25 Las disposiciones de mejora del bombeo están actualmente disponibles y son idealmente adecuadas para su uso en dicho dispositivo. Por ejemplo, varias geometrías de mejora del bombeo se describen en "Continuous-wave singly resonant pump-enhanced type II LiB3O5 optical parametric oscillator" de Robertson et al, Optics Letters 19, páginas 1735-1737 (1994). Sin embargo, estas disposiciones conocidas no reconocen el beneficio de la técnica, como se describió anteriormente, en el contexto de la propagación colineal de las ondas de bombeo y locas cuando estas ondas tienen propiedades similares con respecto a la frecuencia, la polarización y la configuración espacial.

35 Como una solución al problema de cómo reducir o superar los efectos de la absorción, de acuerdo con un aspecto de la invención, se proporciona un oscilador paramétrico óptico tal como se define en la reivindicación 1, es decir, entre otras características que comprende un medio no lineal que puede funcionar para generar una onda de señal y una libre en respuesta a ser estimulada con una onda de bombeo, en el que el medio no lineal es tal que las ondas de bombeo, libres y de señal son no colineales, y la fuente de onda de bombeo y el medio no lineal se proporcionan en la misma cavidad óptica.

40 Proporcionar la fuente de bombeo y el medio no lineal en la misma cavidad óptica significa que la onda de bombeo en el medio no lineal es mayor que de otro modo sería alcanzado si el medio no lineal estuviera situado fuera de la cavidad, limitando de este modo las dificultades asociadas con una superposición de onda reducida generalmente resultante de la propagación no colineal de los haces. Además, se elimina la necesidad de proporcionar ópticas de acoplamiento para acoplar la onda de bombeo en la cavidad óptica. De esta manera, aunque la absorción no se reduce necesariamente, sus efectos pueden mitigarse mediante la onda mejorada de la bomba de potencia que circula dentro de la cavidad óptica común.

50 De acuerdo con otro aspecto de la presente invención, se proporciona un oscilador paramétrico óptico, tal como se define en la reivindicación 2, es decir, entre otras características que comprende un material no lineal que puede funcionar para generar una onda de señal y una libre en respuesta a ser estimulado con una onda de bombeo, en la que el medio no lineal se proporciona en una cavidad óptica que está dispuesta para resonar la onda de bombeo, y la onda de bombeo y las ondas libres y de señal generadas son no colineales.

55 Al hacer la cavidad óptica resonante a la longitud de onda de bombeo, la potencia de bombeo se mejora de manera que se mejora el proceso de generación paramétrica, a pesar de la limitada superposición entre las ondas de bombeo y libres.

60 Debido a los diversos osciladores paramétricos ópticos en los que la invención se realiza, se reducen, o incluso se evitan, al menos parcialmente, los efectos de las pérdidas por absorción, permiten la realización de fuentes de prácticas que pueden proporcionar radiación de frecuencia de terahercios (0,3-10 THz) y radiación infrarroja de onda larga (10-100 micrómetros de longitud de onda).

65 Estas bandas de frecuencia son útiles para el análisis espectroscópico de materiales, por ejemplo, detección de sustancias químicas y biológicas en aplicaciones biomédicas y de seguridad. THz también es de interés en el análisis estructural de materiales, por ejemplo, detección y análisis de defectos. Sin embargo, la explotación de estas bandas de frecuencia se ha visto perjudicada por la falta de fuentes prácticas.

Breve descripción de los dibujos

Varios aspectos de la invención se describirán ahora solamente como ejemplo, y en conjunción con los dibujos adjuntos, en los que:

- 5 La figura 3 es un oscilador paramétrico óptico intracavitario que no está de acuerdo con la invención, incorporando el oscilador un esquema híbrido de coincidencia de fase colineal/no colineal y funciona en un modo pulsado;
- 10 La figura 4 es un oscilador paramétrico óptico de bombeo mejorado no de acuerdo con la invención, incorporando el oscilador un esquema híbrido de coincidencia de fase colineal/no colineal y funcionando en un modo pulsado;
- 15 La figura 5 es un diagrama esquemático de un oscilador paramétrico óptico intracavitario de acuerdo con la invención, incorporando el oscilador un esquema de coincidencia de fase no colineal y funcionando en un modo pulsado, y
- La figura 6 es un diagrama esquemático de un oscilador paramétrico óptico de bombeo mejorado de acuerdo con la invención, incorporando el oscilador un esquema de coincidencia de fase no colineal y funcionando en un modo de onda continua.

Descripción de realizaciones

- 20 La figura 3 muestra un oscilador paramétrico óptico intracavitario que no está de acuerdo con la invención, comprendiendo el oscilador un láser de estado sólido bombeado con láser diodo con un conmutador Q activo para proporcionar pulsos de bombeo de duración corta (régimen de nanosegundos). Dentro del láser de estado sólido se incorpora un oscilador paramétrico óptico basado en un método híbrido de coincidencia de fase colineal/no colineal.
- 25 Más específicamente, se proporciona una disposición de excitación de láser que tiene un láser de diodo semiconductor 6, un sistema de lentes 7 y un medio de ganancia de láser 8 en el que está dirigida la radiación óptica 9 desde el láser de diodo semiconductor 6. El sistema de lentes 7 se proporciona para adaptar óptimamente el perfil espacial de la radiación desde el láser de diodo semiconductor 6 al tamaño del modo, preferiblemente el modo TEM₀₀ fundamental, de la radiación en el medio de ganancia de láser 8. Como ejemplo específico, el medio de ganancia de láser se basa en la clase de cristales de láser que contiene el ion activo de neodimio, y el diodo láser de semiconductor está adaptado para suministrar radiación óptica en el intervalo de 795 a 815 nm, dependiendo de la elección particular del cristal láser, donde existen fuertes características de absorción. El láser de diodo semiconductor también puede ser de tipo pulsado o de onda continua. Se apreciará que también pueden emplearse otros tipos de cristal láser y medios de excitación láser, que incluyen, por ejemplo, bombeo de lámpara de flash.
- 30 En una superficie posterior del medio de ganancia de láser 8, e integral con la misma, hay un revestimiento reflectante que define un primer espejo 10. Frente al medio de ganancia de láser 8 hay una segunda superficie reflectante 11, formando así una cavidad óptica. Entre el medio de ganancia de láser 8 y la segunda superficie reflectante 11, y a lo largo de un eje óptico del mismo, se encuentran en secuencia una lente 12, un cristal no lineal 13 de tipo de banda oblicua, un polarizador 14 y un cristal de conmutador Q electroóptico 15. La finalidad de la lente 12 es permitir que se obtengan los tamaños de modo apropiados en el medio de ganancia de láser 8 y el cristal no lineal 13, cuando se usa en asociación con el primer y el segundo espejos 10 y 11. La finalidad del polarizador 14 y del conmutador Q electroóptico 15 es modificar de forma controlable la Q (o finura) de la cavidad óptica, de tal manera que se genere una onda de bombeo que consiste en una secuencia de pulsos cortos. La finalidad del cristal no lineal 13 de tipo de banda oblicua es provocar que la onda de señal se desplace, mientras mantiene colineales las ondas de bombeo y libres. Se podría usar cualquier cristal adecuado de tipo de banda oblicua, pero como ejemplo específico, la disposición de la figura 3 incluye un niobato de litio polarizado periódicamente (PPLN) que tiene un período de rejilla de alrededor de 33,3- μ m y un vector de rejilla orientado a alrededor de 65,7 grados del eje x y está ubicado en un horno (no mostrado).
- 35 En una superficie posterior del medio de ganancia de láser 8, e integral con la misma, hay un revestimiento reflectante que define un primer espejo 10. Frente al medio de ganancia de láser 8 hay una segunda superficie reflectante 11, formando así una cavidad óptica. Entre el medio de ganancia de láser 8 y la segunda superficie reflectante 11, y a lo largo de un eje óptico del mismo, se encuentran en secuencia una lente 12, un cristal no lineal 13 de tipo de banda oblicua, un polarizador 14 y un cristal de conmutador Q electroóptico 15. La finalidad de la lente 12 es permitir que se obtengan los tamaños de modo apropiados en el medio de ganancia de láser 8 y el cristal no lineal 13, cuando se usa en asociación con el primer y el segundo espejos 10 y 11. La finalidad del polarizador 14 y del conmutador Q electroóptico 15 es modificar de forma controlable la Q (o finura) de la cavidad óptica, de tal manera que se genere una onda de bombeo que consiste en una secuencia de pulsos cortos. La finalidad del cristal no lineal 13 de tipo de banda oblicua es provocar que la onda de señal se desplace, mientras mantiene colineales las ondas de bombeo y libres. Se podría usar cualquier cristal adecuado de tipo de banda oblicua, pero como ejemplo específico, la disposición de la figura 3 incluye un niobato de litio polarizado periódicamente (PPLN) que tiene un período de rejilla de alrededor de 33,3- μ m y un vector de rejilla orientado a alrededor de 65,7 grados del eje x y está ubicado en un horno (no mostrado).
- 40 Cada uno del primer y segundo espejos 10 y 11 es muy reflectante a la longitud de onda de la luz emitida desde el medio de ganancia de láser 8, por lo que causa la radiación láser emitida por el medio de ganancia de láser 8 a ser, durante dicho período de tiempo como lo permite mediante la combinación de polarizador 14 y conmutador Q 15, reflejada hacia adelante y hacia atrás. Esto da como resultado una onda de bombeo con una potencia/energía circulante sustancialmente más alta que la potencia/energía de la salida lograda para un láser acoplado de salida óptima con medios de excitación de láser similares.
- 45 Cuando se utiliza la disposición de la figura 3, la estimulación del cristal no lineal 13 por la onda de bombeo provoca un proceso de conversión paramétrico óptico descendente para iniciar y así generar un par de ondas de señal y locas. Debido a que el cristal 13 es del tipo de banda oblicua, la onda libre generada es colineal con la onda de bombeo, mientras que la onda de señal generada 16 se aleja de las otras ondas. Preferiblemente, la onda de señal se desplaza en un ángulo obtuso y en el ejemplo específico dado es transversal a las ondas de bombeo y locas. Como ejemplo específico, para el cristal no lineal 13 descrito anteriormente, para una onda de bombeo de longitud de onda de 1,064 micrómetros, la onda libre está alrededor de una longitud de onda de 1,07 micrómetros y la onda de señal está alrededor de una longitud de onda de 0,19 milímetros (1,6 THz).
- 50 Cada uno del primer y segundo espejos 10 y 11 es muy reflectante a la longitud de onda de la luz emitida desde el medio de ganancia de láser 8, por lo que causa la radiación láser emitida por el medio de ganancia de láser 8 a ser, durante dicho período de tiempo como lo permite mediante la combinación de polarizador 14 y conmutador Q 15, reflejada hacia adelante y hacia atrás. Esto da como resultado una onda de bombeo con una potencia/energía circulante sustancialmente más alta que la potencia/energía de la salida lograda para un láser acoplado de salida óptima con medios de excitación de láser similares.
- 55 Cuando se utiliza la disposición de la figura 3, la estimulación del cristal no lineal 13 por la onda de bombeo provoca un proceso de conversión paramétrico óptico descendente para iniciar y así generar un par de ondas de señal y locas. Debido a que el cristal 13 es del tipo de banda oblicua, la onda libre generada es colineal con la onda de bombeo, mientras que la onda de señal generada 16 se aleja de las otras ondas. Preferiblemente, la onda de señal se desplaza en un ángulo obtuso y en el ejemplo específico dado es transversal a las ondas de bombeo y locas. Como ejemplo específico, para el cristal no lineal 13 descrito anteriormente, para una onda de bombeo de longitud de onda de 1,064 micrómetros, la onda libre está alrededor de una longitud de onda de 1,07 micrómetros y la onda de señal está alrededor de una longitud de onda de 0,19 milímetros (1,6 THz).
- 60 Cada uno del primer y segundo espejos 10 y 11 es muy reflectante a la longitud de onda de la luz emitida desde el medio de ganancia de láser 8, por lo que causa la radiación láser emitida por el medio de ganancia de láser 8 a ser, durante dicho período de tiempo como lo permite mediante la combinación de polarizador 14 y conmutador Q 15, reflejada hacia adelante y hacia atrás. Esto da como resultado una onda de bombeo con una potencia/energía circulante sustancialmente más alta que la potencia/energía de la salida lograda para un láser acoplado de salida óptima con medios de excitación de láser similares.
- 65 Cuando se utiliza la disposición de la figura 3, la estimulación del cristal no lineal 13 por la onda de bombeo provoca un proceso de conversión paramétrico óptico descendente para iniciar y así generar un par de ondas de señal y locas. Debido a que el cristal 13 es del tipo de banda oblicua, la onda libre generada es colineal con la onda de bombeo, mientras que la onda de señal generada 16 se aleja de las otras ondas. Preferiblemente, la onda de señal se desplaza en un ángulo obtuso y en el ejemplo específico dado es transversal a las ondas de bombeo y locas. Como ejemplo específico, para el cristal no lineal 13 descrito anteriormente, para una onda de bombeo de longitud de onda de 1,064 micrómetros, la onda libre está alrededor de una longitud de onda de 1,07 micrómetros y la onda de señal está alrededor de una longitud de onda de 0,19 milímetros (1,6 THz).

El proceso de generación de ondas paramétricas tiene asociado con el mismo un nivel umbral de intensidad de la onda de bombeo para un conjunto dado de condiciones de funcionamiento. Para reducir este nivel de umbral, el cristal no lineal 13 está ubicado en una cavidad óptica que es resonante en una o ambas longitudes de onda de las ondas de señal y libre, formando así un oscilador paramétrico óptico. En la disposición mostrada en la figura 3, cada uno de los primeros y segundos espejos 10 y 11 es también muy reflectante a la longitud de onda de la radiación de onda idónea generada en el cristal no lineal 13, formando así una cavidad resonante para esta onda también. Debido a que las ondas de bombeo y libres son colineales, la sección transversal del haz puede hacerse pequeña y, por lo tanto, se puede lograr una alta intensidad de circulación y, en consecuencia, una ganancia no lineal mejorada. Otra ventaja de la pequeña sección transversal del haz es permitir que las ondas de bombeo y libres se propaguen cerca de la cara lateral del cristal no lineal 13. Por lo tanto, la onda de señal 16 puede salir del cristal no lineal 13 después de solo una corta distancia de propagación y, por lo tanto, una absorción mínima. Otra ventaja es que, como las ondas de bombeo y libres son de longitud de onda similar, la cavidad óptica tiene un efecto similar en cada una de estas ondas y, por lo tanto, son intrínsecamente coincidentes.

La figura 4 muestra otra disposición en la que la invención no está incorporada, siendo este un oscilador paramétrico óptico con bombeo mejorado. Esto incluye una disposición de láser 17 que proporciona una onda de bombeo para un cristal no lineal 13 que está en una cavidad óptica 18 común en la que resuenan tanto la onda de bombeo, obtenida en este caso desde una fuente externa, como la onda libre paramétrica. La onda de bombeo se acopla en la cavidad óptica 18 por medio de una lente, que se elige de modo que la onda de bombeo se ajuste a un modo en un modo transversal de la cavidad. Normalmente, este es el modo fundamental (TEM₀₀) de la cavidad. Se podría usar cualquier bombeo láser adecuado, aunque preferiblemente se emplea un láser de diodo semiconductor o láser de diodo bombeado de estado sólido. El generador de ondas de bombeo debe generar una radiación de alta pureza espectral, es decir, modo longitudinal único y de alta calidad espacial, es decir, modo transversal único.

El cristal no lineal 13 de la figura 4 puede ser de cualquier tipo adecuado, pero como ejemplo es de niobato de litio polarizado periódicamente (PPLN) que tiene un periodo de rejilla de alrededor 33,3- μ m y vector de rejilla orientado a alrededor de 65,7 grados desde el eje x. Esto está situado en un horno (no mostrado). Para este cristal en particular, y la radiación de onda de bombeo y libre que se propaga a lo largo del eje x cristalográfico y sus campos eléctricos polarizados a lo largo del eje z, para una longitud de onda de bombeo de 1,064 micrómetros, la longitud de onda será de 1,07 micrómetros y la longitud de onda de la señal de alrededor de 0,19 milímetros (1,6 THz).

La cavidad óptica 18 está definida por los espejos 19 y 20. Preferiblemente, la reflectividad del espejo 20 para la longitud de onda de bombeo es unitaria, mientras que la transmisión del espejo 19 para la longitud de onda de bombeo es equivalente a la pérdida total, tanto lineal como no lineal, excluyendo la transmisión del propio espejo 19, experimentada por la onda de bombeo en el recorrido de ida y vuelta de la cavidad óptica 18. En estas condiciones, se dice que la cavidad 18 coincide con la impedancia y luego se optimiza la eficiencia de la conversión descendente. Preferiblemente, los espejos 19 y 20 son muy reflectantes en la longitud de onda libre con el propósito de resonar la onda libre en la cavidad común 18 con baja pérdida de recorrido de ida y vuelta, por lo tanto, minimizando el umbral interno del oscilador.

Se apreciará que aunque las ondas de bombeo y libres son de longitud de onda similares, el estado de polarización y la configuración espacial en el caso de la propagación colineal de estas dos ondas está dentro del estado actual de la técnica con respecto a un diseño de espejo para poder fabricar un espejo que tenga las propiedades requeridas del espejo 19, como se describió anteriormente. Por lo tanto, la adopción de la geometría de bombeo mejorado como se describe con referencia a la figura 4 es una solución al problema resaltado anteriormente cuando se adopta una geometría de propagación colineal para las ondas libres y de bombeo.

Los espejos 19 y 20 están posicionados de modo que la cavidad óptica 18 es resonante a la longitud de onda de bombeo. Para cumplir esta condición, los espejos de la cavidad, es decir, los espejos 19 y 20, deben estar separados por un número entero de medias longitudes de onda de la onda, en este caso, la onda de bombeo. Para asegurar que se pueda mantener una condición resonante, conectado al primer espejo 19 hay un mecanismo de accionamiento, por ejemplo, un transductor piezoeléctrico (no mostrado), que puede mover el espejo de forma controlable a lo largo de la dirección del eje óptico de la cavidad. Controlando el mecanismo de accionamiento usando un sistema de control 24 adecuado, el primer espejo 19 se puede mover, de modo que la longitud de la cavidad sea ajustable. De esta manera, es posible ajustar la longitud de la cavidad de modo que la frecuencia de la onda de bombeo de frecuencia única sea un modo axial de la cavidad, y de modo que la onda de bombeo resuene dentro de la cavidad óptica 18.

La causa de la resonancia de la onda de bombeo aumenta la intensidad de esa onda dentro de la cavidad óptica 18 hasta un nivel que está por encima de la onda de bombeo incidente, de modo que se mejora la onda de bombeo. La intensidad de la onda de bombeo generalmente aumenta en un factor de 10 o más. Como ya se ha descrito, la transmisión mostrada por el primer espejo 19 a la onda de bombeo se elige generalmente de modo que cuando el oscilador paramétrico está funcionando en las condiciones especificadas, entonces la cavidad de la bomba está adaptada a la impedancia. Esto significa que no hay onda de bombeo reflejada desde el primer espejo 19 y que toda la onda incidente de la bomba entra en la cavidad óptica 18, donde además de las pérdidas parásitas, se convierte en ondas de señal y libres convertidas de manera descendente.

Cuando el cristal no lineal 13 se estimula con la onda de bombeo, un intervalo de pares de longitudes de onda de señal y libres, todas con diferentes frecuencias, se generan. Solo aquellos pares para los cuales la frecuencia libre es resonante dentro de la cavidad óptica común experimenta suficiente retroalimentación para sobrevivir y crecer. Esto significa que estos generadores buscan una condición resonante. La importancia de esto es que la longitud real de la cavidad óptica con respecto a las ondas convertidas de manera descendente no es crítica, porque la onda convertida de manera descendente (la onda libre en este ejemplo) buscará por sí misma una frecuencia resonante.

Debido a que las ondas de bombeo y libre son colineales, la sección transversal del haz se puede hacer pequeña y, por lo tanto, una alta intensidad de circulación de la onda de bombeo en la cavidad común 18 se puede alcanzar y, por lo tanto, lograr mejorar la ganancia no lineal. Una ventaja adicional de la sección transversal del haz pequeño es permitir que las ondas de bombeo y libres se propaguen cerca de la cara lateral del cristal no lineal 13 y así la onda de señal 16 pueda salir del cristal no lineal 13 después de una distancia de propagación corta y, por lo tanto, mínima absorción.

La figura 5 muestra como una primera realización un oscilador paramétrico óptico intracavitario. Tiene un láser de estado sólido bombeado con diodo láser con un interruptor Q activo para proporcionar pulsos de bombeo de duración corta (régimen de nanosegundos) y dentro del cual dicho láser de estado sólido incorpora un oscilador paramétrico óptico basado en el método de coincidencia de fase no colineal. Más específicamente, se proporciona una disposición de excitación de láser que tiene un láser de diodo semiconductor 6, un sistema de lentes 7 y un medio de ganancia de láser 8 en el que está dirigida la radiación óptica 9 desde el láser de diodo semiconductor 6. El sistema de lentes 7 se proporciona para adaptar óptimamente el perfil espacial de la radiación desde el láser de diodo semiconductor 6 al tamaño del modo, preferiblemente el modo TEM₀₀ fundamental, de la radiación en el medio de ganancia de láser 8. Como ejemplo específico, el medio de ganancia de láser se basa en la clase de cristales de láser que contiene el ion activo de neodimio, y el diodo láser de semiconductor está adaptado para suministrar radiación óptica en el intervalo de 795 a 815 nm, dependiendo de la elección particular del cristal láser, donde existen fuertes características de absorción. El láser de diodo semiconductor también puede ser de tipo pulsado o de onda continua. Se apreciará que también pueden emplearse otros tipos de cristal láser y medios de excitación láser, que incluyen, por ejemplo, bombeo de lámpara de flash.

En una superficie posterior del medio de ganancia de láser 8, e integral con la misma, hay un revestimiento reflectante que define unos primeros espejos 26. Frente al medio de ganancia de láser 8 hay una segunda superficie reflectante 28, formando así una cavidad óptica para la onda de bombeo. Entre el medio de ganancia de láser 8 y la segunda superficie reflectante 28, y a lo largo de un eje óptico del mismo, se encuentran en secuencia una lente 12, un cristal no lineal 30 diseñado para coincidencia de fase no colineal, un polarizador 14 y un cristal de conmutador Q electroóptico 15. La finalidad de la lente 12 es permitir que se obtengan los tamaños de modo apropiados en el medio de ganancia de láser 8 y el cristal no lineal 30, cuando se usa en asociación con el primer y el segundo espejos 26 y 28. La finalidad del polarizador 14 y del conmutador Q electroóptico 15 es modificar de forma controlable la Q (o finura) de la cavidad óptica, de tal manera que se genere una onda de bombeo que consiste en una secuencia de pulsos cortos. El objetivo del esquema de coincidencia de fase no colineal es provocar que la onda de señal se desplace en un ángulo grande, mientras que las ondas de bombeo y libres se propagan en un ángulo pequeño y distinto de cero en relación entre sí.

Para que la onda libre generada se propague en el pequeño ángulo requerido a la onda de bombeo, el eje de la cavidad de onda libre, definida por los espejos 32 y 34, está dispuesto para estar en este pequeño ángulo requerido con el eje de la cavidad de la onda de bombeo, colocando adecuadamente dichos espejos como se muestra en la figura 5. Los espejos 32 y 34 están hechos para ser muy reflectantes a la longitud de onda de la radiación de onda idónea generada en el cristal no lineal 30 y alineados para tener un eje óptico común, formando así una cavidad resonante para esta onda, pero inclinada al eje óptico de la cavidad de bombeo. Se podría utilizar cualquier esquema de coincidencia de fase no colineal adecuado, pero como ejemplo específico, la disposición de la figura 5 incluye un cristal de niobato de litio que se corta de modo que las ondas de bombeo y libres se propaguen a lo largo de una dirección cercana a coaxial con el eje x cristalográfico del cristal, donde el ángulo subtendido entre las ondas es entre 1 y 2 grados. La onda de señal se propaga en un ángulo de alrededor de 65 grados con respecto a la dirección de bombeo. El estado de polarización de todas las ondas es paralelo al eje z cristalográfico.

Cada uno del primer y segundo espejos 26 y 28 es muy reflectante a la longitud de onda de la luz emitida desde el medio de ganancia de láser 8, por lo que causa la radiación láser emitida por el medio de ganancia de láser 8 a ser, durante dicho período de tiempo como lo permite mediante la combinación de polarizador 14 y conmutador Q 15, reflejada hacia adelante y hacia atrás. Esto da como resultado una onda de bombeo con una potencia/energía circulante sustancialmente más alta que la potencia/energía de la salida lograda para un láser acoplado de salida óptima con medios de excitación de láser similares.

Cuando se utiliza la disposición de la figura 5, la estimulación del cristal no lineal 30 por la onda de bombeo provoca un proceso de conversión paramétrica óptica descendente para iniciar y así generar un par de ondas de señal y locas. Como ejemplo específico, para el cristal no lineal 30 descrito anteriormente, para una onda de bombeo de longitud de onda de 1,064 micrómetros, la onda libre está alrededor de una longitud de onda de 1,068-1,072 micrómetros. La onda de señal correspondiente es alrededor de una longitud de onda de 0,15-0,29 milímetros (1-2

THz) y se propaga en un ángulo de alrededor de 65 grados respecto a la dirección de la bomba, por lo tanto, sale del cristal no lineal a través de una cara lateral.

5 El proceso de generación de ondas paramétricas tiene asociado con el mismo un nivel umbral de intensidad de la onda de bombeo para un conjunto dado de condiciones de funcionamiento. Al ubicar el cristal no lineal 30 en una cavidad óptica que resuena en la longitud de onda de la onda libre, formando así un oscilador paramétrico óptico, este nivel umbral puede reducirse.

10 La figura 6 muestra otra disposición en la que se realiza la invención, que es un oscilador paramétrico óptico de bombeo mejorado que incorpora una geometría de coincidencia de fase no colineal. Esto incluye una disposición láser 17 que proporciona una onda de bombeo para un cristal no lineal 30 que está en una cavidad óptica 36 que permite resonar a la onda de bombeo, obtenida en este caso desde una fuente externa, y una cavidad óptica 38 que permite resonar a la onda libre paramétrica y está dispuesta en cierto ángulo con la primera cavidad óptica 36. La onda de bombeo se acopla en la cavidad óptica 36 por medio de una lente, que se elige de modo que la onda de bombeo se adapte en modo a un modo transversal de la cavidad óptica 36. Normalmente, este es el modo fundamental (TEM_{00}) de la cavidad. Se podría usar cualquier bombeo láser adecuado, aunque preferiblemente se emplea un láser de diodo semiconductor o láser de diodo bombeado de estado sólido. El generador de ondas de bombeo debe generar una radiación de alta pureza espectral, es decir, modo longitudinal único y de alta calidad espacial, es decir, modo transversal único.

20 Se podría utilizar cualquier esquema de coincidencia de fase no colineal adecuado, pero como ejemplo específico, la disposición de la figura 6 incluye un cristal de niobato de litio que se corta de modo que las ondas de bombeo y libres se propaguen a lo largo de una dirección cercana a coaxial con el eje x cristalográfico del cristal, donde el ángulo subtendido entre las ondas es entre 1 y 2 grados. La onda de señal se propaga en un ángulo de alrededor de 65 grados con respecto a la dirección de bombeo. El estado de polarización de todas las ondas es paralelo al eje z cristalográfico. Para una longitud de onda de bombeo de 1,064 micrómetros y cristal no lineal 30 descrito anteriormente, la onda libre está alrededor de una longitud de onda de 1,068-1,072 micrómetros y la onda de señal está alrededor de una longitud de onda de 0,15-0,29 milímetros (1-2 THz) y sale del cristal a través de una cara lateral.

30 La cavidad óptica 36 de la onda de bombeo está definida por los espejos 40 y 42. Preferiblemente, la reflectividad del espejo 42 para la longitud de onda de bombeo es unitaria, mientras que la transmisión del espejo 40 para la longitud de onda de bombeo es equivalente a la pérdida total, tanto lineal como no lineal, excluyendo la transmisión del propio espejo 40, experimentada por la onda de bombeo en el recorrido de ida y vuelta de la cavidad óptica 36. En estas condiciones, se dice que la cavidad 36 coincide con la impedancia y luego se optimiza la eficiencia de la conversión descendente. Los espejos 44 y 46 son muy reflectantes en la longitud de onda libre con el propósito de resonar la onda libre en otra cavidad óptica 38 con baja pérdida de recorrido de ida y vuelta, por lo tanto, minimizando el umbral interno del oscilador.

40 Los espejos 40 y 42 están posicionados de modo que la cavidad óptica 36 es resonante a la longitud de onda de bombeo. Como es bien conocido, para cumplir esta condición, los espejos de la cavidad, es decir, los espejos 40 y 42, deben estar separados por un número entero de medias longitudes de onda de la onda, en este caso, la onda de bombeo. Para asegurar que se pueda mantener una condición resonante, conectado al primer espejo 40 (o alternativamente este puede ser el segundo espejo 42) hay un mecanismo de accionamiento, por ejemplo, un transductor piezoeléctrico (no mostrado), que puede mover el espejo de forma controlable a lo largo de la dirección del eje óptico de la cavidad. Controlando el mecanismo de accionamiento usando un sistema de control 24 adecuado, el primer espejo 40 se puede mover, de modo que la longitud de la cavidad sea ajustable. De esta manera, es posible ajustar la longitud de la cavidad de modo que la frecuencia de la onda de bombeo de frecuencia única sea un modo axial de la cavidad, y de modo que la onda de bombeo resuene dentro de la cavidad óptica 36.

50 La causa de la resonancia de la onda de bombeo aumenta la intensidad de esa onda dentro de la cavidad óptica 36 hasta un nivel que está por encima de la onda de bombeo incidente, de modo que se mejora la onda de bombeo. La intensidad de la onda de bombeo generalmente aumenta en un factor de 10 o más. Como ya se ha descrito, la transmisión mostrada por el primer espejo 19 a la onda de bombeo se elige generalmente de modo que cuando el oscilador paramétrico está funcionando en las condiciones especificadas, entonces la cavidad de la bomba está adaptada a la impedancia. Esto significa que no hay onda de bombeo reflejada desde el primer espejo 40 y que toda la onda incidente de la bomba entra en la cavidad óptica 36, donde además de las pérdidas parásitas, se convierte en ondas de señal y libres convertidas de manera descendente.

60 Cuando el cristal no lineal 30 se estimula con la onda de bombeo, un intervalo de pares de longitudes de onda de señal y libres, todas con diferentes frecuencias, se generan. Solo aquellos pares para los cuales la frecuencia libre es resonante dentro de la cavidad óptica común experimenta suficiente retroalimentación para sobrevivir y crecer. Esto significa que estos generadores buscan una condición resonante. La importancia de esto es que la longitud real de la cavidad óptica con respecto a las ondas convertidas de manera descendente no es crítica, porque la onda convertida de manera descendente (la onda libre en este ejemplo) buscará por sí misma una frecuencia resonante.

- Al proporcionar un mecanismo simple y eficaz para reducir los efectos perjudiciales causados por la absorción de onda de la señal, la presente invención permite extender el intervalo espectral de dispositivos paramétricos. Las regiones espectrales importantes que se beneficiarían de la eliminación de la restricción debida a la absorción incluyen las regiones espectrales de infrarrojo medio y lejano, la región espectral de terahercios y las regiones espectrales de ultravioleta cercano y lejano, pero estas son solo a modo de ejemplo y tales beneficios bien podrían aplicarse a otras regiones espectrales no identificadas específicamente. Para proporcionar dispositivos que funcionan en estos intervalos, el diseño genérico del dispositivo sería similar al descrito anteriormente. Sin embargo, el diseño detallado de los componentes utilizados cambiaría. Por ejemplo, el material no lineal debe mostrar ganancia para las condiciones de funcionamiento deseadas de la longitud de onda de bombeo y las longitudes de onda generadas paramétricamente. Esto se logra mediante una elección adecuada de material de cristal no lineal y fabricación de cristales, es decir, coincidencia de fase, por ejemplo, dirección de propagación en el cristal y en el caso del esquema híbrido de alineamiento de fase colineal/no colineal descrito con referencia a las figuras 3 y 4, el período de inversión de dominio periódico y el ángulo.
- Un experto apreciará que son posibles variaciones de las disposiciones divulgadas sin apartarse de la invención. Por ejemplo, aunque no se describe en detalle en el presente documento, para las realizaciones dentro de la cavidad, se puede usar una fuente externa de radiación de una longitud de onda correspondiente a la longitud de onda libre para sembrar la cavidad de onda libre/de bombeo común. Por consiguiente, la descripción anterior de una realización específica se realiza a modo de ejemplo solamente y no por motivos de limitación. Será evidente para la persona experta que pueden realizarse modificaciones menores dentro del alcance de la presente invención como se define en las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un oscilador paramétrico óptico, que comprende:

5 un medio de ganancia (8) para generar una onda de bombeo;
un medio no lineal (30) que puede funcionar para generar una onda de señal y una onda libre en respuesta a ser
estimulado con la onda de bombeo, de modo que las ondas de bombeo, libre y de señal no son colineales;
una cavidad de onda de bombeo en la que se proporcionan el medio de ganancia (8) y el medio no lineal (30), y
10 una cavidad de onda libre en la que se proporciona el medio no lineal (30),
en donde el eje óptico de la cavidad de onda libre está en un ángulo con respecto al eje óptico de la cavidad de
onda de bombeo.

2. Un oscilador paramétrico óptico con bombeo mejorado, que comprende:

15 una fuente de láser de onda de bombeo (17) para generar una onda de bombeo;
un medio no lineal (30) que puede funcionar para generar una onda de señal y una onda libre en respuesta a ser
estimulado con la onda de bombeo, de modo que las ondas de bombeo, libre y de señal no son colineales;
una cavidad óptica (36) en la que se proporciona el medio no lineal (30) y que permite resonar a la onda de
bombeo, y
20 una cavidad de onda libre (38) en la que se proporciona el medio no lineal (30),
en donde la fuente de láser de onda de bombeo (17) es externa a la cavidad óptica (36) que permite resonar a la
onda de bombeo, y
en donde el eje óptico de la cavidad de onda libre (38) forma un ángulo con respecto a un eje óptico de la
cavidad óptica (36) que permite resonar a la onda de bombeo.

25 3. Un oscilador paramétrico óptico según la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en el que la onda de señal tiene
una frecuencia en el intervalo de 0,3-10 THz o una longitud de onda en el intervalo de 10-100 micrómetros.

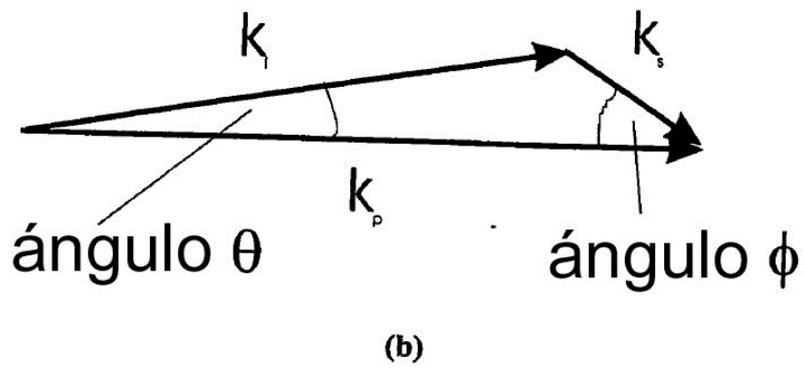
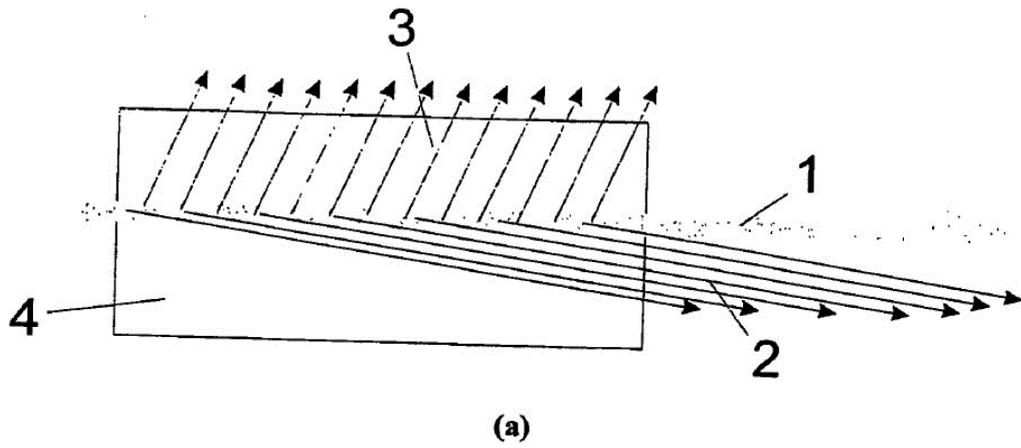
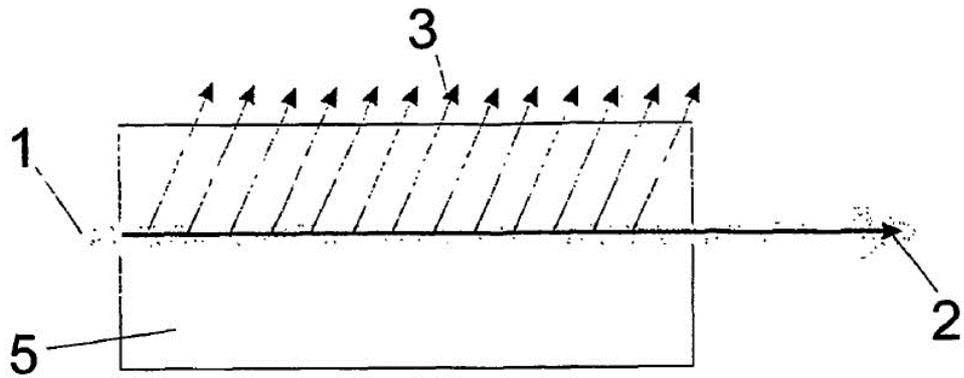
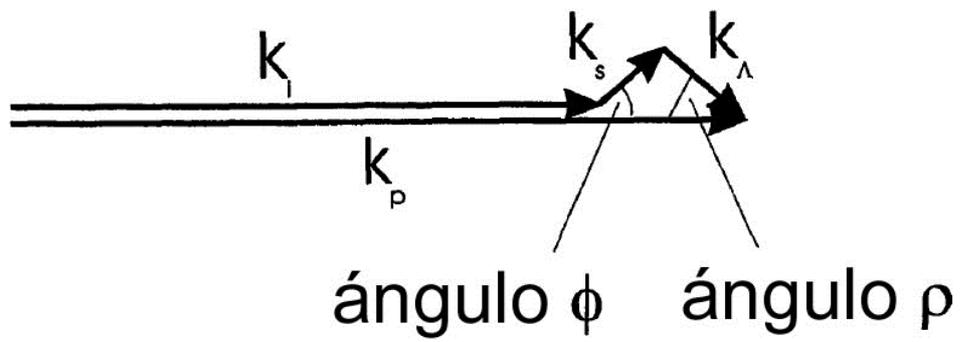


FIGURA 1



(a)



(b)

FIGURA 2

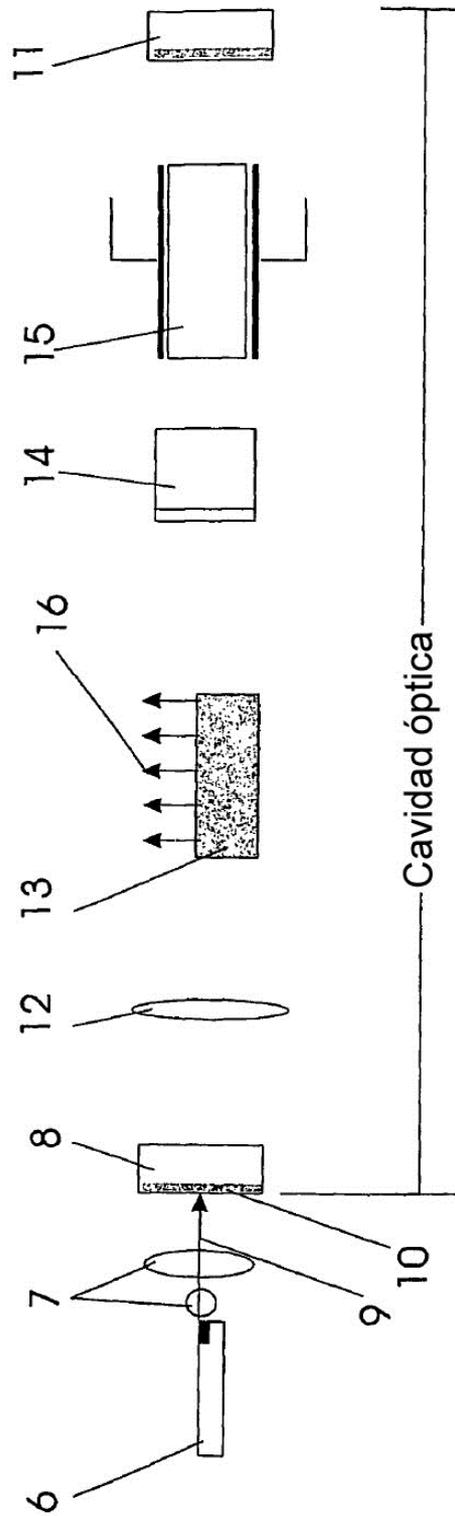


Figura 3

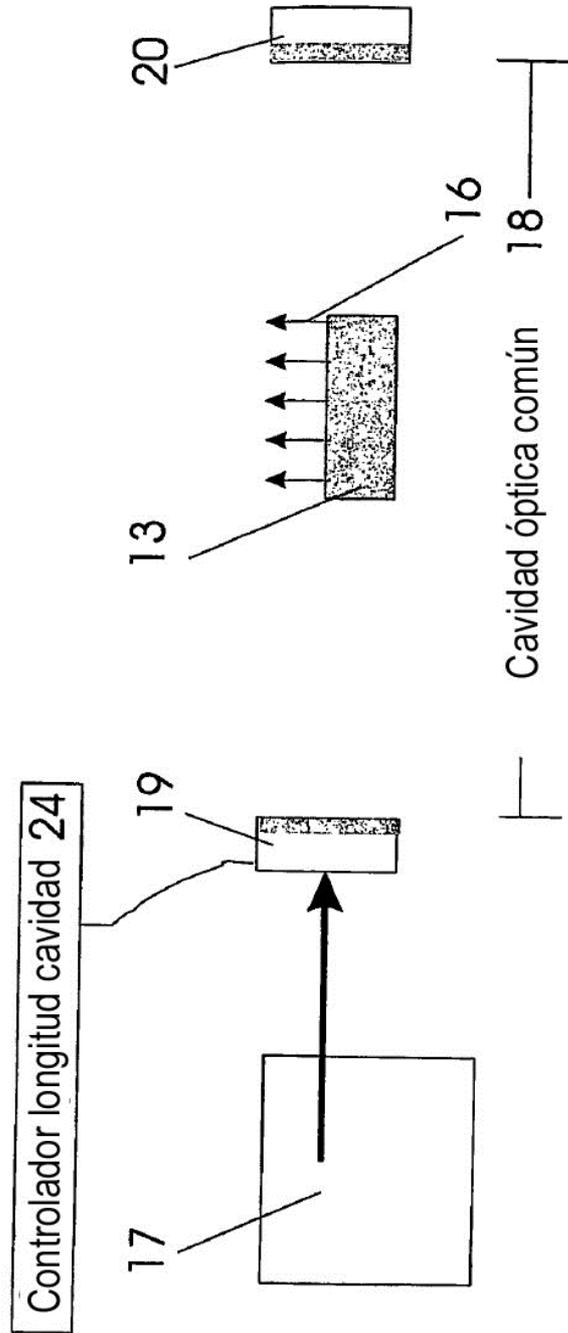


Figura 4

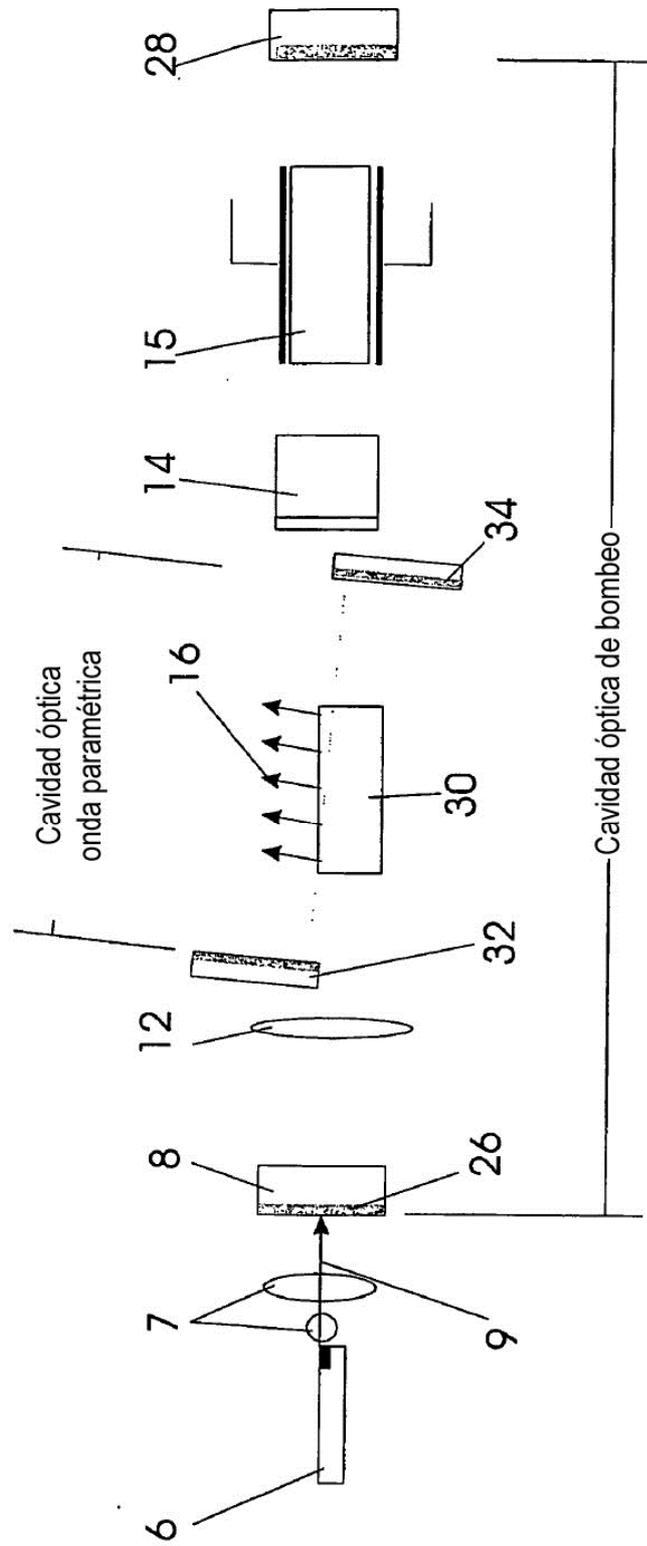


Figura 5

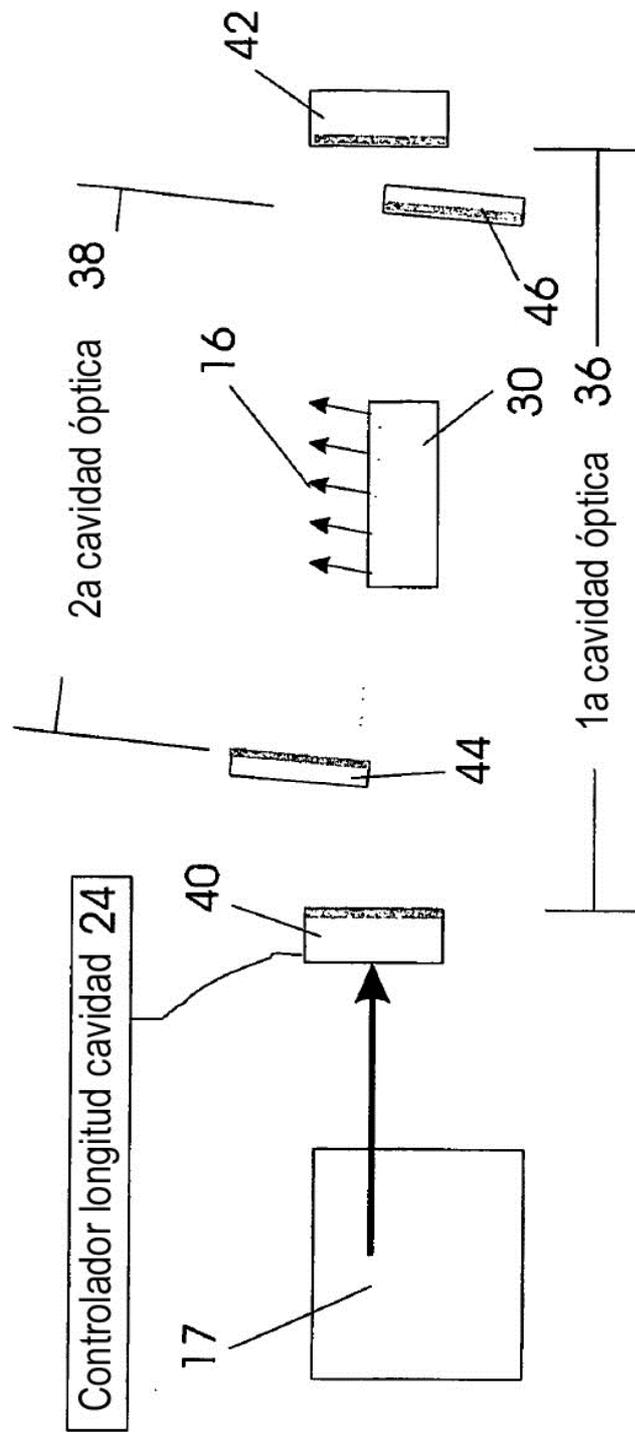


Figura 6