

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 885 203**

51 Int. Cl.:

H01S 3/082	(2006.01) H01S 5/04	(2006.01)
H01S 3/108	(2006.01) H01S 5/06	(2006.01)
H01S 5/14	(2006.01) H01S 5/183	(2006.01)
H01S 3/08	(2006.01) G02F 1/39	(2006.01)
H01S 3/081	(2006.01)	
H01S 3/094	(2006.01)	
H01S 3/0941	(2006.01)	
H01S 3/106	(2006.01)	
H01S 3/16	(2006.01)	
H01S 5/024	(2006.01)	

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **13.04.2010** **PCT/GB2010/000738**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **21.10.2010** **WO10119242**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **13.04.2010** **E 10719024 (1)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.05.2021** **EP 2419974**

54 Título: **Oscilador paramétrico óptico intracavidad**

30 Prioridad:

15.04.2009 GB 0906482

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
13.12.2021

73 Titular/es:

M SQUARED LASERS LIMITED (100.0%)
Venture Building, 1 Kelvin Campus, West of
Scotland Science Park, Maryhill Road
Glasgow, G20 0SP, GB

72 Inventor/es:

DUNN, MALCOLM H y
STOTHARD, DAVID

74 Agente/Representante:

PONS ARIÑO, Ángel

ES 2 885 203 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

Oscilador paramétrico óptico intracavidad

Campo de la invención

5 La presente invención hace referencia a un método para reducir o eliminar las oscilaciones de relajación en osciladores paramétricos ópticos de onda continua resonantes a una longitud de onda y en particular osciladores paramétricos ópticos de onda continua resonantes a una longitud de onda intracavidad.

Antecedentes de la invención

10 Los osciladores paramétricos ópticos (OPO por sus siglas en inglés) utilizan una conversión de frecuencia paramétrica en un material no lineal para convertir la radiación electromagnética de entrada de una longitud de onda corta en radiación electromagnética de salida sintonizable a longitudes de onda más largas. La onda electromagnética de entrada se denomina onda de bombeo y las dos salidas generadas de este modo se denominan habitualmente la onda de señal y la onda complementaria, donde por convención habitual la longitud de onda de la onda de señal es la más corta de las dos longitudes de onda. Estas dos salidas, cuando se consideran en conjunto, se denominan, por convención, como ondas reducidas en frecuencia o radiación reducida en frecuencia. 15 De esta manera, los OPO toman un fotón de alta energía, es decir, de longitud de onda corta y dividen su energía entre dos fotones recién generados de menor energía, es decir de una longitud de onda más larga.

Un oscilador paramétrico óptico en general consiste en un material ópticamente no lineal que se sitúa, de manera apropiada, dentro de una cavidad óptica donde (i) entra en resonancia la onda de señal o bien la onda complementaria (oscilador resonante a una longitud de onda), o (ii) entran en resonancia ambas ondas 20 simultáneamente (oscilador resonante a dos longitudes de onda). En este último caso, pueden emplearse dos cavidades, una para que entre en resonancia la onda de señal, la otra para que entre en resonancia la onda complementaria. Para los osciladores resonantes a una longitud de onda, habitualmente la cavidad tiene poca pérdida a la longitud de onda apropiada de la onda de señal o de la onda complementaria, y el material no lineal se ajusta en fase para generar luz de manera eficiente a la correcta longitud de onda. Un oscilador paramétrico óptico ha de ser bombeado por una onda o radiación desde un láser de bombeo. El láser de bombeo tiene en general un medio de ganancia para generar la onda de bombeo. El medio de ganancia se encuentra incorporado habitualmente dentro de la cavidad óptica del láser de bombeo que hace que entre en resonancia la onda de bombeo. El medio de 25 ganancia del láser de bombeo generalmente tiene que ser excitado por alguna fuente externa de energía, por ejemplo otro láser, tal como un láser de diodo.

30 Los OPO son fuentes flexibles de radiación coherente que pueden sintonizarse en considerables anchos de banda en las regiones espectrales ultravioleta, visible, infrarroja y de terahercios. Ha de apreciarse que el término genérico "óptico" tal como se utiliza a lo largo del documento, se considera que abarca todas estas regiones espectrales. Ejemplos de OPO se describen en los artículos "Continuous-wave, singly-resonant intra-cavity optical parametric oscillator based on periodically- poled LiNbO₃", por Turnbull et al, Electronics Letters 33(21), páginas 1817-1818 (1997); "Widely Tunable all-solid-state optical parametric oscillator for the visible and near infrared" por Cui et al, Optics Letters 18(2), páginas 122-124 (1993), y "Tunable ultraviolet optical parametric oscillator for differential absorption lidar measurements of tropospheric ozone" por Fix et al, Applied Physics B 75(2-3), páginas 153-163 (2002). 35

Los OPO han sido operados en muchas escalas de tiempo desde pulsos de femtosegundos hasta la propia onda continua. La llegada de nuevos materiales no lineales, en particular materiales no lineales de cuasi-ajuste de fase, ha contribuido de forma significativa a que estos dispositivos se conviertan en fuentes prácticas. En los materiales no lineales de cuasi ajuste de fase, la estructura del dominio cristalino se invierte periódicamente; donde a modo de ejemplos esto se lleva a cabo ya sea mediante la polarización periódica, en la que los dominios pueden invertirse periódicamente aplicando una alta tensión a través del cristal mediante un electrodo con un patrón, o a través del crecimiento de cristales orientados en cuanto a su configuración. Variando la periodicidad del patrón del domino en el cristal, pueden cambiarse las longitudes de onda de la onda de señal y la onda complementaria, que se encuentran en ajuste de fase con respecto a una determinada longitud de onda de bombeo. 40 45

A pesar de la llegada de materiales no lineales de cuasi ajuste de fase, aún existen problemas con la practicidad de los OPO, particularmente en el caso de dispositivos de onda continua. Un problema en particular, que restringe el desarrollo de dispositivos compactos/en miniatura, es que se requieren intensidades de la onda de bombeo y, por tanto, potencias de la onda de bombeo sustanciales para que el oscilador paramétrico alcance el umbral de oscilación. Una solución para el problema del umbral alto es poner el oscilador paramétrico óptico, y en particular el material no lineal del OPO, dentro de la cavidad del láser de bombeo. Bajo la condición en la que el medio de ganancia del láser de bombeo puede suministrar una determinada potencia de onda de bombeo, la intensidad de dicha onda de bombeo dentro de la cavidad del láser de bombeo puede ser significativamente más elevada, 50 55

habitualmente en factores mayores de diez, que la intensidad de la onda de bombeo que puede acoplarse fuera de la cavidad, y por lo tanto el umbral de oscilación puede alcanzarse con una potencia de la onda de bombeo mucho menor si se emplea la disposición intracavidad. Este tipo de dispositivo se conoce como un oscilador paramétrico óptico intracavidad. Tal dispositivo ha sido descrito por una serie de autores, ver en particular "Continuous-wave, singly-resonant, inter-cavity parametric oscillator" por Colville et al, Optics Letters 22(2), páginas 75-77 (1997); "Optical parametric devices and processes" por Ebrahimzadeh, JOSA B 16(9), página 1477 (1999); "Parametric generation of tunable light from continuous-wave to femtosecond pulses" por Dunn et al, Science 286(5444), páginas 1513-1517 (1999), y "Internal optical parametric oscillators", por Oshman et al, IEEE, J. Quantum Electronics QE-4, páginas 491-502 (1968). También se conoce un oscilador paramétrico óptico intracavidad de onda continua a partir del documento US 2007/0291801 A1.

La Figura 1 muestra un ejemplo de un oscilador paramétrico óptico intracavidad de onda continua conocido (ver por ejemplo, "Low-pump-threshold continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator", D. J. M. Stothard, M. Ebrahimzadeh, y M. H. Dunn, Optics Letters 23, 1895-97 (1998)). Este tiene un medio 14 de ganancia en el que la radiación procedente del diodo 10 láser semiconductor es dirigida mediante una disposición 12 de lentes con la finalidad de excitar el medio de ganancia. La lente 12 se encuentra prevista para ajustar de forma óptima el perfil espacial de la radiación del diodo 10 láser al tamaño del modo, preferiblemente el modo fundamental, de la radiación en el medio 14 de ganancia. Como un ejemplo específico, el medio 14 de ganancia es neodimio:vanadato, y el láser 10 de diodo se adapta para suministrar un vatio de potencia óptica a 809 nanómetros, una longitud de onda a la que existe una fuerte propiedad de absorción asociada con el neodimio:vanadato.

En una superficie trasera del medio 14 de ganancia, y de forma integral con el mismo, se encuentra un material reflector que define un primer espejo 16. Opuesto al medio 14 de ganancia se encuentra una superficie 18 reflectora. Entre el medio 14 de ganancia del láser y la segunda superficie 18 reflectora, y a lo largo de un eje óptico de la misma, se encuentran en secuencia una lente 20, un divisor 22 de haz y un material 24 no lineal, en este caso un cristal de niobato de litio periódicamente polarizado (PPLN) que tiene aproximadamente 50mm de longitud y tiene un periodo reticular de 29,3 micras. El propósito de la lente 20 es permitir los tamaños de modo apropiados que van a ser obtenidos en el medio 14 de ganancia del láser y el material 24 no lineal, cuando se utiliza en asociación con el primer y el segundo espejo 16 y 18. Fuera del eje óptico principal se encuentra previsto un tercer espejo 26, el cual está posicionado de manera que la luz reflejada del divisor 22 de haz se encuentre dirigida sobre el mismo.

Cada uno de entre el primer y el segundo espejo 16 y 18, que definen la cavidad del láser de bombeo, es altamente reflector a la longitud de onda de la luz, la onda de bombeo, emitida desde el medio 14 de ganancia del láser. El divisor 22 de haz es altamente transmisivo a la longitud de onda de la onda de bombeo, de manera que permite que la luz emitida desde el medio 14 de ganancia pase a través de él y al material 24 no lineal, mientras que al mismo tiempo es altamente reflector a ondas con reducción de frecuencia emitidas desde el material 24 no lineal para reflejar dicha radiación, ya sea en el tercer espejo 26 o nuevamente en el material 24 no lineal. Un número de combinaciones de reflectancias del segundo y del tercer espejo a las longitudes de onda de la onda de señal y de la onda complementaria, existen dependiendo de cuales sean las ondas resonantes o de si son ambas ondas. En este caso, el segundo espejo 18 es completamente reflector a la longitud de onda de la onda de señal, además de a la longitud de onda de la onda de bombeo tal como se ha mencionado anteriormente, mientras que es completamente transmisivo a la longitud de onda de la onda complementaria, de manera que puede ganarse una salida. El tercer espejo 26 es completamente reflectivo a la luz con reducción de frecuencia, tanto a las longitudes de onda de la onda de señal como de la onda complementaria, emitidas desde el material no lineal. Esta configuración hace referencia a un OPO resonante a una longitud de onda con respecto a las ondas con conversión de frecuencia, siendo resonante únicamente para la onda de señal, y en la que la onda complementaria realiza un doble paso por el medio no lineal. Son posibles una serie de variantes en el diseño descrito anteriormente, manteniendo aun así el concepto de un OPO intracavidad en el que el OPO en su totalidad o en parte, se sitúa dentro de la cavidad del láser de bombeo.

La disposición de la Figura 1 tiene dos cavidades acopladas, concretamente la cavidad del láser de bombeo definida por la trayectoria óptica entre el primer y el segundo espejo 16 y 18, en la se sitúa que el material 24 no lineal junto con el medio 14 de ganancia del propio láser de bombeo, y una segunda cavidad definida por la trayectoria óptica entre el segundo y el tercer espejo 18 y 16, en la que también se sitúa el material 24 no lineal y que está asociada con la onda resonante de la radiación coherente con reducción de frecuencia generada por este material 24 no lineal, y al que se ha hecho referencia previamente como la cavidad del OPO. Las dos cavidades se acoplan a través del material 24 no lineal.

Cuando se utiliza la disposición de la Figura 1, la estimulación continua del material 24 no lineal por la radiación generada por el medio 14 de ganancia hace que se inicie un proceso paramétrico óptico de conversión de reducción de frecuencia para iniciar, y de este modo genera un par de ondas de señal y complementarias de onda continua. En la práctica, se ha observado que la estabilidad de la intensidad, tanto la onda de campo de bombeo intracavidad como la onda de señal/de campo-complementaria, se ven comprometidas cuando el proceso de conversión de reducción de frecuencia se encuentra presente, extendiéndose sobre un rango de escalas de tiempo que incluyen: (i) un comportamiento oscilatorio, con periodos de oscilación habitualmente en el rango de 10-7 a 10-5s; (ii) un

rápido crecimiento acoplado con una lenta bajada de la envolvente de las oscilaciones, donde los tiempos de amortiguamiento pueden exceder 10-3 segundos; y (iii) donde las oscilaciones pueden volverse esencialmente continuas al ser repetidamente activadas en escalas de tiempo del orden del tiempo de amortiguamiento. Esto puede verse en la Figura 2, que muestra el perfil temporal del campo del bombeo intracavidad registrado por un fotodiodo que tiene un tiempo de respuesta que significativamente menor que el periodo de oscilación.

También se muestra en la Figura 2 el campo del bombeo intracavidad cuando se reduce el proceso de conversión de reducción de frecuencia proporcionado por el oscilador paramétrico óptico, por ejemplo, colocando un obturador entre el divisor 22 de haz y el tercer espejo 26. En este caso el campo del bombeo muestra una operación estable. Por tanto, la inclusión del oscilador paramétrico óptico intracavidad dentro de la cavidad del láser modifica significativamente la dinámica del campo del bombeo intracavidad en forma de un tipo de comportamiento de oscilación de relajación, más particularmente la magnitud, el periodo y el tiempo de extinción de estas oscilaciones. El campo de señal y el campo complementario del OPO muestran efectos similares.

Como es bien conocido, la aparición de oscilaciones de relajación puede resultar perjudicial para la operación de un oscilador paramétrico óptico de onda continua intracavidad, como fuente estable en términos tanto de estabilidad de la amplitud como de la frecuencia de la radiación coherente generada. Este concepto se trata en los artículos "Continuous-wave intracavity optical parametric oscillators: an analysis of power characteristics", por Turnbull et al, Applied Physics B 66, páginas 701-710 (1998) y "Transient dynamics of CW intracavity singly resonant optical parametric oscillators", por Turnbull et al, IEEE, Journal of Quantum Electronics 35(11), páginas 1666-1672 (1999).

Las oscilaciones de relajación son ampliamente conocidas en los dispositivos láser. Por ejemplo, dichas relajaciones son ampliamente conocidas en el caso de láseres de neodimio y láseres semiconductores, ver "Output fluctuations of CW-pumped Nd: YAG lasers", por Koechner, IEEE Journal of Quantum Electronics QE-8(7), páginas 656-661 (1972), y "Relaxation oscillations in quasisingle-mode semiconductor lasers", por Zaubel et al, IEEE Journal of Quantum Electronics 3(9), páginas 2081-2086 (1994).

En el caso de osciladores paramétricos ópticos intracavidad, en los que se encuentran implicadas dos cavidades acopladas, la dinámica del comportamiento oscilatorio es diferente en cuanto a su tipo de la que se encuentra en dispositivos láser básicos. A modo de ilustración, el periodo de las oscilaciones en el OPO intracavidad se determina predominantemente por el tiempo de extinción de la radiación de la onda de bombeo dentro de la cavidad pasiva del láser de bombeo, o el tiempo de extinción de la radiación de la onda de señal/complementaria dentro de la cavidad pasiva del OPO. Se ha mostrado, tanto experimentalmente como teóricamente, que los efectos de las oscilaciones de relajación son particularmente severos para los OPO intracavidad; ver las referencias previas a Turnbull et al. Estas oscilaciones de relajación pueden ser activadas por muchos mecanismos diferentes, por ejemplo efectos térmicos en el medio no lineal e interferometría por realimentación. Por tanto, presentan problemas significativos con respecto a la operación de osciladores paramétricos ópticos intracavidad de onda continua.

Además de los problemas con las oscilaciones de relajación, un OPO con un láser de bombeo basado en un medio de ganancia de neodimio, o de hecho otro medio de ganancia en estado sólido, se enfrenta a una serie de diferentes desventajas. Por ejemplo, los láseres de bombeo a base de neodimio muestran el fenómeno conocido como "spatial hole burning" (quemado de portadores o efecto SHB) que conduce a un problema significativo a la hora de obtener una oscilación de única frecuencia (modo axial único) cuando se emplea una cavidad de onda estacionaria. Además, carecen de flexibilidad con respecto a la cobertura espectral, ya que las transiciones láser se encuentran restringidas al rango de 0,9 a 1,5 μm . Adicionalmente, muestran efectos de lente térmica a potencias altas, lo que conduce a problemas de estabilidad y fiabilidad, y tienen un rango restringido de sintonización continua para las ondas con reducción de frecuencia, cuando se realiza utilizando sintonización continua de la onda de bombeo, debido a su estrecho ancho de banda de ganancia.

Resumen de la invención

De acuerdo con un aspecto de la presente invención, se proporciona un método para reducir significativamente o eliminar las oscilaciones de relajación en un OPO intracavidad de onda continua resonante a una longitud de onda, según se define en la reivindicación 1.

Un ejemplo de utilidad para la comprensión de la invención es un oscilador paramétrico óptico intracavidad de onda continua que presenta:

una cavidad óptica;

un medio de ganancia semiconductor situado dentro de la cavidad óptica, de tal manera que juntos formen un láser semiconductor; y

un material no lineal situado dentro de la cavidad de tal manera que el material no lineal genere, de forma continua, ondas de señal y complementarias con reducción de frecuencia, en respuesta a una onda de bombeo generada de forma continua por el medio de ganancia semiconductor,

- 5 en donde la onda de bombeo es resonante dentro de una cavidad óptica de bombeo, y la una o la otra, pero no ambas, de las ondas con reducción de frecuencia es resonante dentro de la cavidad óptica de bombeo u otra cavidad, caracterizada por que el medio de ganancia semiconductor es tal que el tiempo de vida t_U de su estado láser superior, en ausencia de emisión estimulada, es del orden de, o menor que el más pequeño de:

(i) un tiempo de vida t_P de la radiación de bombeo en la cavidad óptica de bombeo del láser de bombeo, o

- 10 (ii) un tiempo de vida t_S de aquel componente de la radiación con reducción de frecuencia que sea resonante en la cavidad óptica de bombeo o la cavidad óptica adicional del OPO.

Los inventores han observado que cumplir con estos criterios da como resultado un OPO de onda continua en el que se suprimen las oscilaciones de relajación. Por tanto, utilizando un medio de ganancia semiconductor como fuente de bombeo, se proporciona un oscilador paramétrico óptico resonante a una longitud de onda de onda continua robusto y fiable. Esta característica es altamente ventajosa.

- 15 Las condiciones para que las oscilaciones de relajación queden considerablemente amortiguadas y por consiguiente ausentes, se determinan a partir de la ecuación cúbica:

$$\alpha^3 + \frac{(1+k)}{\tau_u} \alpha^2 + \frac{k}{\tau_p} \left[\frac{(k+1)}{\tau_u} + \frac{1}{\tau_s} \right] \alpha + \frac{k(k+1)}{\tau_u \tau_s \tau_p} = 0$$

para la variable α , donde α puede expresarse como el número complejo:

$$\alpha = \alpha^r + i\alpha^i$$

- 20 cuando las condiciones para las oscilaciones de relajación que van a ser extremadamente, o más que extremadamente, amortiguadas se convierten en:

$$\frac{\pi|\alpha^r|}{2|\alpha^i|} \geq 1,$$

con el requerimiento de que α^r sea negativo.

- 25 En la anterior ecuación t_U , t_P , y t_S son tiempos de extinción característicos asociados con la población en el nivel láser superior del medio de ganancia, la onda de bombeo en la cavidad pasiva del láser de bombeo, y cualquiera de entre las ondas de señal/complementaria que sea resonante en la cavidad del OPO respectivamente. También, $(1+k)$ es el número de veces, por encima del umbral del OPO, que el OPO intracavidad es excitado por la fuente de bombeo primaria.

- 30 El anterior análisis se aplica únicamente en el caso en el que el umbral del propio láser de bombeo ha sido ajustado para una conversión de reducción de frecuencia óptima, de acuerdo con el criterio estándar y bien conocido para los OPO intracavidad (ver por ejemplo, Handbook of Optics (segunda edición), McGraw-Hill, Volumen IV, 2001, Capítulo 22 "Optical Parametric Oscillators" por M. Ebrahimzadeh y M. H. Dunn), y cuando la población en el nivel láser inferior del medio de ganancia es insignificante.

- 35 La aplicación de las anteriores condiciones durante el diseño del oscilador paramétrico óptico intracavidad de onda continua significa que las oscilaciones de relajación pueden eliminarse y la salida del OPO intracavidad puede estabilizarse. Esto es ventajoso.

- 40 El medio de ganancia del láser semiconductor puede ser tal que el tiempo de vida de su estado láser superior es del orden de, o menor que el más pequeño de: (i) el tiempo de vida de la radiación de bombeo en la cavidad (pasiva) del láser de bombeo, o (ii) el tiempo de vida del componente de la radiación con reducción de frecuencia que es resonante en la cavidad (pasiva) del OPO.

El tiempo o tiempos de extinción de la radiación asociados con la cavidad pasiva del láser de bombeo y/o la cavidad pasiva del OPO puede ser: (a) del orden del tiempo de vida del estado superior de la transición láser en el medio de ganancia, o (b) mayor que una décima parte del tiempo de vida del estado superior de la transición láser, de tal manera que las oscilaciones de relajación se suprimen de forma adecuada.

5 Breve descripción de los dibujos

Diversos aspectos de la invención se describirán a continuación únicamente a modo de ejemplo, y en referencia a los dibujos anexos, de los cuales:

La Figura 3 es un diagrama esquemático de un OPO intracavidad de onda continua que tiene un láser de disco semiconductor (SDL) como láser de bombeo;

10 La Figura 4 muestra un perfil espectral de la onda de bombeo generada por el SDL como láser de bombeo;

La Figura 5(a) muestra el perfil temporal mostrado por la onda de bombeo del OPO intracavidad de la Figura 3 cuando el OPO se activa en el tiempo cero;

La Figura 5(b) muestra el perfil temporal de la onda de bombeo del OPO de la Figura 3 cuando el SDL es reemplazado por una bomba a base de neodimio:vanadato, y

15 La Figura 6 muestra el rendimiento del OPO en función de la potencia primaria de la matriz de diodos láser utilizada para excitar el medio de ganancia del SDL.

Descripción detallada de los dibujos

En el presente documento se describe un oscilador paramétrico óptico intracavidad de onda continua resonante a una longitud de onda, en el que el medio no lineal del oscilador paramétrico óptico se sitúa dentro de la cavidad de un láser de disco semiconductor que actúa como el láser de bombeo para el oscilador paramétrico óptico. El oscilador está designado para reducir las oscilaciones de relajación y mantener una óptima eficiencia de conversión de reducción de frecuencia en presencia de un láser de bombeo con un ancho de banda de ganancia ancha.

25 Las oscilaciones de relajación pueden reducirse significativamente o eliminarse del todo, siempre que el medio de ganancia empleado en el OPO intracavidad de onda continua resonante a una longitud de onda sea tal que el tiempo de vida de su estado láser superior, en ausencia de una emisión estimulada, sea del orden de, o menor que el más pequeño de: (i) el tiempo de vida de la radiación de bombeo en la cavidad (pasiva) del láser de bombeo, o (ii) el tiempo de vida de aquel componente de la radiación con reducción de frecuencia que sea resonante en la cavidad (pasiva) del OPO. Una ecuación para deducir estos criterios se tratará más adelante en mayor detalle. La aplicación de uno u otro de estos criterios significa que las oscilaciones de relajación pueden eliminarse, y la salida del OPO intracavidad puede estabilizarse. De manera ventajosa, esto puede lograrse de forma sencilla y efectiva utilizando un láser de disco semiconductor SDL como el láser de bombeo, por ejemplo un láser semiconductor de cavidad externa vertical VECSEL (por sus siglas en inglés).

35 La Figura 3 muestra un oscilador paramétrico óptico de onda continua dentro de la cavidad de un láser de disco semiconductor SDL. El SDL puede ser un láser semiconductor de cavidad externa vertical (VECSEL), por ejemplo, como es éste el caso, en la presente realización un VECSEL de InGaAs. La fuente de excitación es un láser 10 de diodo, aunque puede utilizarse cualquier otra fuente adecuada. El chip SDL se une a un difusor térmico de diamante sin recubrir, a través del cual es excitado y se propaga el campo del bombeo circulante. Todo el conjunto se sitúa en un espacio anular de latón a través del cual se hace circular agua de refrigeración en el mismo circuito que el bloque de refrigeración del láser 10 de diodo (no se muestra).

40 El SDL de la Figura 3 tiene un medio de ganancia en el interior del cual se dirige la radiación del láser 10 de diodo, mediante un par de lentes 12 esféricas con recubrimiento anti-reflexión, que ajustan de manera óptima el perfil espacial de la radiación del láser 10 de diodo al tamaño del modo, preferiblemente el modo fundamental, de la radiación en el medio de ganancia. Las propiedades de absorción muy amplias de los medios de ganancia del SDL eliminan la necesidad de precisión en la longitud de onda y en el control de temperatura del láser de diodo. La salida de la fuente 10 es colimada y se focaliza en la superficie de la región activa del SDL a través de las lentes 12. La iluminación por parte del láser 10 de diodo causa que el SDL emita luz desde la misma superficie externa en la cual es incidente la radiación procedente del láser de diodo. Esta luz emitida se utiliza como la onda de bombeo para el OPO. Dentro de un sustrato del SDL se encuentra formado un reflector de Bragg alto, que es altamente reflector en la longitud de onda de salida del SDL.

50 Opuesto al SDL y descentrado con respecto al eje óptico, a lo largo del cual se dirige la luz del láser 10 de diodo, se encuentra una primera superficie 28 reflectora que está posicionada para dirigir luz emitida desde el SDL a lo largo

del eje óptico de un OPO. Opuesta a la primera superficie 28 reflectora se encuentra una segunda superficie 18 reflectora. Cada uno de entre el primer y el segundo espejo 28 y 18 es altamente reflector a la longitud de onda de bombeo emitida desde el SDL. El reflector de Bragg y los espejos 28, 18 altamente reflectores forman una cavidad del láser de bombeo con un ángulo cerrado de alta precisión, dentro de la cual es resonante la onda de bombeo emitida por el SDL.

Entre la primera y la segunda superficie 28 y 18 reflectoras, y a lo largo de un eje óptico de las mismas, se encuentran en secuencia dos placas 40 de sílice fundida, un filtro 30 birrefractivo, una lente 20, un divisor 22 de haz y un material 24 no lineal. La lente 20 se elige para permitir que se obtengan los tamaños de modo apropiados en el SDL y el material 24 no lineal, cuando se utiliza en asociación con el primer y el segundo espejo 28 y 18.

El divisor 22 de haz, habitualmente un divisor de haz dicróico, es altamente transmisivo a la longitud de onda de la bomba de manera que la luz emitida desde el SDL pasa a través del mismo y hacia el material 24 no lineal, siendo al mismo tiempo altamente reflector para ondas con reducción de frecuencia emitidas desde el material 24 no lineal para reflejar dicha radiación ya sea sobre un tercer espejo 26 o de nuevo en el material 24 no lineal. Los espejos 19 y 26 forman la cavidad de la onda de señal. Los dos son altamente reflectantes en banda ancha para la onda de señal. La onda de señal es resonante dentro de la cavidad de la onda de señal. La onda de señal puede emitirse de salida acoplada desde el OPO reduciendo la reflectancia de uno de los espejos 18 o el 26. Debido a que éste es un dispositivo resonante a una longitud de onda, la disposición es tal que la onda complementaria es no resonante.

El material 24 no lineal es un cristal que tiene un diseño de retícula en abanico a través de su dimensión lateral. El diseño de retícula en abanico de la polarización periódica permite una sintonización rápida y amplia de las ondas con reducción de frecuencia mediante la traslación lateral del cristal a través del haz de bombeo. Para este fin, el cristal se monta en una platina de traslación (no se muestra) para facilitar la sintonización automática y repetible. El cristal tiene recubrimiento anti-reflexión para las ondas de bombeo, de señal y complementaria.

La disposición de la Figura 3 tiene dos cavidades acopladas, concretamente la cavidad del láser de bombeo definida por la trayectoria óptica entre el primer y el segundo espejo 28 y 18, en el que el material 24 no lineal se sitúa junto con el SDL, y una segunda cavidad, definida por la trayectoria óptica entre el segundo y el tercer espejo 18 y 26, en el que también se sitúa el material 24 no lineal y que está asociado con la onda resonante de la radiación coherente con reducción de frecuencia generada por el material 24 no lineal. Las dos cavidades se acoplan a través del material 24 no lineal.

Cuando es bombeado de forma continua por el SDL, el oscilador de la Figura 3 excede el umbral de oscilación, es decir, la ganancia del estado estacionario del medio de ganancia excede las pérdidas de la cavidad óptica. No se incluye ningún componente en la cavidad para inducir un comportamiento pulsado, y de esta manera el oscilador opera como un oscilador intracavidad de onda continua resonante a una longitud de onda.

Las dos placas 40 de sílice fundido y el filtro 30 birrefractivo se encuentran previstos para controlar el perfil espectral. El filtro 30 birrefractivo (BRF) se sitúa en la cavidad en el ángulo de Brewster. Esto define tanto la polarización como la longitud de onda operativa del láser de bombeo. Su presencia estrecha la onda de bombeo del láser de bombeo para oscilar en un grupo estable de modos longitudinales situados bajo una única banda de paso de un etalon (o calibre patrón) formado por el difusor térmico de diamante. En el caso de un medio de ganancia en el que su ancho de banda de ganancia excede el ancho de banda de ajuste de fase del cristal no lineal intracavidad, como es éste el caso con el SDL y láseres relacionados, se requieren medios para fijar la longitud de onda de la onda de bombeo en presencia de una conversión con reducción de frecuencia paramétrica, en este caso, las dos placas 40 de sílice fundida.

El sistema de la Figura 3 ha sido probado experimentalmente. En la disposición sometida a ensayo, el chip del SDL tenía una región activa de un grosor habitual de 1-2 μm y estaba unido a un difusor térmico de diamante sin recubrir de 500 μm de grosor que formó un etalon de 125GHz. La fuente 10 utilizada fue una matriz de diodos láser de 808nm acoplada a fibra capaz de suministrar hasta 8,5W de salida desde un núcleo de 100 μm . El BRF 30 comprendía una única placa de cuarzo de 4mm de grosor. El láser operó a una longitud de onda fija de -1050nm, cerca del pico del ancho de banda de ganancia. Se formó una cintura del haz de un diámetro de 160 μm para la onda de bombeo en el centro del cristal 24 no lineal (NLC), mediante una lente 20 intracavidad con una longitud focal de 38,1 mm con recubrimiento anti-reflexión y el espejo 18 de extremo. El cristal 24 no lineal utilizado fue un cristal de $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ periódicamente polarizado (PPLN) de 30mm de longitud. El divisor 22 de haz (BS) dicróico presentó una reflectancia de >99% a 1,45-1,6 μm . La onda de señal se emitió de salida acoplada desde el OPO, reduciendo la reflectancia del espejo 18, y la onda complementaria se emitió de salida acoplada reduciendo la reflectancia del espejo 26.

Cuando el dispositivo de la Figura 3 realiza su operación por encima del umbral de oscilación del OPO, la conversión con reducción de frecuencia paramétrica no lineal debido al OPO intracavidad introduce un mecanismo de pérdida significativa dependiente de la longitud de onda para el láser de bombeo. Bajo tales circunstancias, el láser de bombeo puede superar la selectividad del BRF 30 y hacer saltar la longitud de onda a otro modo del etalon del

difusor térmico de diamante, hasta tal punto que la operación del OPO se ve comprometida. Sin embargo, la presencia de las dos placas 40 de sílice fundida en la única sección de bombeo de la cavidad entre el espejo (M1) 28 y el BRF 30 mejora sustancialmente la selectividad del BRF, fijando la longitud de onda del láser de bombeo en presencia del efecto de acoplamiento paramétrico de la salida. La efectividad de las placas 40 de Brewster a la hora de proporcionar la fijación requerida resulta evidente en la Figura 4, en la que se muestra el perfil de longitud de onda del láser de bombeo antes (línea discontinua) y después de la inserción de las placas 40 de Brewster (línea continua gruesa), además del perfil en el momento en el que el OPO se encuentra no operativo y en ausencia de las placas 40 de Brewster (línea continua fina).

Tal como puede verse por la Figura 4, con el OPO no operativo y sin placas 40, se observa un perfil espectral estrecho centrado alrededor de la longitud de onda de 1050nm; donde esta longitud de onda se selecciona utilizando el filtro birrefractivo (BRF). La operación del OPO tiene como resultado que el perfil espectral de la onda de bombeo se extiende hacia el exterior para cubrir de aproximadamente 1049 a 1052 nm, a medida que el láser de bombeo se reajusta a través de su ancho de banda de ganancia amplio para minimizar la pérdida por conversión con reducción de frecuencia (línea discontinua negra); donde esto ocurre en detrimento de la operación efectiva del OPO. Tal como puede verse por la Figura 4, se evita este re-ajuste del perfil de la onda de bombeo con la inclusión de las placas 40 de Brewster para mantener una operación efectiva del OPO.

La estabilidad transitoria del sistema de la Figura 3 se evaluó perturbando la condición operativa de estado estacionario del láser con un modulador óptico situada en la sección única de onda de bombeo de la cavidad, entre el primer espejo 28 y el BRF 30. El campo del bombeo circulante fue monitorizado con un fotodetector de alta velocidad. Los resultados se muestran en la Figura 5(a).

Por la Figura 5(a) puede observarse que el tiempo de vida del estado láser superior asociado con el medio de ganancia (1-10 ns) semiconductor, es más corto que los tiempos de extinción de la onda de bombeo resonante y la onda de señal en sus respectivas cavidades (40 ns), y de este modo las oscilaciones de relajación están ausentes y se alcanza la condición de estado estacionario suavemente. El borde de elevación del campo del bombeo no se eleva instantáneamente, ya que rastrea el incremento de la cavidad Q que se obtiene como resultado de la velocidad finita de la rueda de modulación. No son evidentes signos de comportamiento de oscilación de relajación, lo que indica la viabilidad de la combinación de SDL/OPO intracavidad.

En contraste, la Figura 5(b) muestra el perfil temporal de la onda de bombeo del OPO cuando el medio de ganancia semiconductor del SDL se reemplaza por el medio de ganancia de neodimio:vanadato, manteniendo los otros parámetros del OPO intracavidad esencialmente sin cambios con respecto a la disposición que se muestra en la Figura 3. En este caso, las oscilaciones de relajación que muestran una modulación profunda, alta frecuencia y amortiguación débil están ahora presentes. Esto ocurre debido a que el tiempo de vida del estado superior asociado con el ion de neodimio es significativamente mayor que los tiempos de extinción de las radiaciones resonantes en las dos cavidades implicadas.

La Figura 6 muestra características habituales de la potencia de la conversión con reducción de frecuencia del OPO intracavidad. En este caso, el dispositivo ha sido configurado para (estar cerca de) una conversión con reducción de frecuencia óptima cuando el medio de ganancia del SDL se bombea a 8,5W mediante la matriz de diodos láser utilizada para excitar el medio de ganancia mencionado anteriormente. Además de la potencia de la onda complementaria (de un único paso) extraída obtenida del dispositivo, se indica el total de potencia con reducción de frecuencia (es decir, teniendo en cuenta la generación en dirección dual de la onda complementaria y el defecto cuántico de la onda de señal/complementaria). A una potencia de excitación primaria de la matriz de diodos láser de 8,5W, se obtuvo una onda complementaria de 205mW a una longitud de onda de 3055nm (en una dirección únicamente), lo que corresponde a una potencia de reducción de frecuencia total de 1,25W. Esto ha de contrastarse con el caso en el que el campo del bombeo se emite de salida acoplado de forma óptima desde la cavidad del láser de bombeo reemplazando el espejo (M2) 18 con un acoplador de salida óptimo, esta vez con la conversión con reducción de frecuencia suprimida a través del mal alineamiento del espejo (M3) 26, y con el SDL operando a la misma potencia de excitación primaria de 8,5W, cuando se extrae una radiación de bombeo de 1,5W (a $\sim 1050\text{nm}$), lo que indica una eficiencia de conversión con reducción de frecuencia para el OPO de 83%. Reemplazando el reflector 26 alto de la onda de señal por un espejo, que mostró 95% de transmisión para la onda de señal, se logró un acoplamiento de salida del campo de señal. Bajo esta condición, se obtuvo 323mW de la onda de señal a una longitud de onda de 1600nm, y la potencia de la onda complementaria extraída a través del espejo 26 cayó de 205 a 110mW.

También se muestra en la Figura 6 la potencia en la onda de bombeo circulante dentro de la cavidad del láser de bombeo, donde el caso en el que se suprime la oscilación paramétrica (OPO desactivado, línea continua fina) se contrasta con el caso en el que se permite la oscilación paramétrica (OPO activado, línea discontinua). Estas curvas muestran la clásica ejecución anticipada para un OPO intracavidad, en cuanto a que, por encima del umbral del OPO, la potencia de la onda de bombeo intracavidad circulante se fija a su valor en el umbral del OPO. Dicho comportamiento clásico indica el mantenimiento de una geometría estable de la cavidad ya que la potencia de

bombeo se incrementa, proporcionando por tanto más evidencias de que los efectos de lente térmica en el medio de ganancia están ausentes.

5 Cuando se diseña un oscilador paramétrico óptico resonante de onda continua a una longitud de onda, pueden seleccionarse unos parámetros apropiados para evitar las oscilaciones de relajación. La solución de la siguiente ecuación cúbica:

$$\alpha^3 + \frac{(1+k)}{\tau_u} \alpha^2 + \frac{k}{\tau_p} \left[\frac{(k+1)}{\tau_u} + \frac{1}{\tau_s} \right] \alpha + \frac{k(k+1)}{\tau_u \tau_s \tau_p} = 0$$

para la variable α , donde α puede expresarse como el número complejo: $\alpha = \alpha^r + i\alpha^i$, identifica las condiciones para que las oscilaciones de relajación sean considerablemente amortiguadas o más que considerablemente amortiguadas y por tanto estén ausentes, concretamente que:

$$\frac{\pi |\alpha^r|}{2 |\alpha^i|} \geq 1,$$

10 con el requerimiento de que α^r sea negativo. Debe apreciarse que dicha amortiguación extrema puede no requerirse en la práctica para una adecuada supresión de las oscilaciones de relajación.

15 En la anterior ecuación t_u , t_p , y t_s son los tiempos de extinción característicos asociados con la población en el nivel láser superior del medio de ganancia, la onda de bombeo en la cavidad pasiva del láser de bombeo, y cualquiera de entre las ondas de señal/complementarias que sea resonante en la cavidad del OPO respectivamente. También, $(1+k)$ es el número de veces, por encima del umbral del OPO, que el OPO intracavidad es excitado por la fuente de bombeo primaria.

20 El anterior análisis se aplica cuando el umbral del propio láser de bombeo ha sido ajustado para una conversión con reducción de frecuencia óptima, de acuerdo con el criterio estándar y bien conocido para los OPO intracavidad y cuando la población en el nivel láser inferior del medio de ganancia es insignificante. Sin embargo, el análisis podría extenderse para eliminar restricciones. La anterior ecuación cúbica puede resolverse fácilmente mediante el uso de un paquete informático técnico, tal como "Mathematica".

25 En términos generales, pueden eliminarse las oscilaciones de relajación si el medio de ganancia del láser semiconductor es de tal modo que el tiempo de vida de su estado láser superior sea del orden de, o menor que el más pequeño de: (i) el tiempo de vida de la radiación de bombeo en la cavidad (pasiva) del láser de bombeo, o (ii) el tiempo de vida del componente de la radiación con reducción de frecuencia que es resonante en la cavidad (pasiva) del OPO. Adicionalmente o alternativamente, el tiempo o tiempos de extinción de la radiación asociados con la cavidad pasiva del láser de bombeo y/o la cavidad pasiva del OPO pueden disponerse para ser: (a) del orden del tiempo de vida del estado superior de la transición láser en el medio de ganancia, o (b) mayor que una décima parte del tiempo de vida del estado superior de la transición láser, de tal manera que las oscilaciones de relajación se supriman de forma adecuada.

30 El sistema de la Figura 3 es solo un ejemplo de cómo puede ser implementado un oscilador paramétrico óptico intracavidad de onda continua resonante a una longitud de onda. Son posibles variaciones de esto. Por ejemplo, la onda resonante con reducción de frecuencia puede ser una única frecuencia (modo axial único) y estar fijada en cuanto a la frecuencia, posiblemente mediante el uso de un etalon, y donde la onda de bombeo también es una frecuencia única, pero se proporcionan medios para una sintonización suave de su frecuencia a través del ancho de banda del medio de ganancia del SDL, dando como resultado de este modo una onda no resonante que es de frecuencia única y que se sintoniza suavemente a través de un rango determinado por el ancho de banda de ajuste de fase del medio no lineal.

35 Pueden proporcionarse unos medios para ajustar las condiciones de ajuste de fase dentro del medio no lineal, de tal manera que la onda no resonante se sintonice suavemente a través de un rango determinado mediante el ancho de banda de ganancia del medio de ganancia.

Pueden proporcionarse unos medios para hacer saltar la frecuencia de la onda no resonante de un modo axial a otro para extender, o modificar de otro modo, el rango de sintonización de la onda no resonante.

Pueden proporcionarse unos medios en donde la frecuencia de bombeo sea una frecuencia única y está fijada, y se proporcionan medios sintonizar suavemente la frecuencia de la onda con reducción de frecuencia resonante a la vez que se mantiene como una onda de única frecuencia, y donde la onda resonante puede ser la onda de señal o la onda complementaria.

- 5 Pueden proporcionarse unos medios, en el caso en el que la onda de bombeo sea multi-frecuencia, para sintonizar suavemente la frecuencia de la onda resonante a la vez que se mantiene como una onda de frecuencia única, y donde la onda resonante puede ser la onda de señal o la onda complementaria, y donde la onda no resonante ajusta las diferencias de frecuencia entre la onda de bombeo multi-frecuencia y la onda resonante en una sola frecuencia.
- 10 Una persona experta apreciará que son posible las variaciones de las disposiciones divulgadas. Por ejemplo, aunque en la Figura 3 la onda de señal se describe siendo resonante, este puede ser también el caso para la onda complementaria. Además, la onda con reducción de frecuencia no resonante puede realizar un doble paso a través del medio no lineal. Se proporcionan medios para variar el ajuste de fase relativo entre la onda de bombeo, la onda de señal y la onda complementaria. Opcionalmente, una cavidad de onda progresiva (o en anillo) puede utilizarse en lugar de una cavidad de onda estacionaria de la onda con reducción de frecuencia resonante. Resultará evidente para una persona experta que las salidas de onda de señal y/o de onda complementaria de onda continua desde el dispositivo pueden modularse en cuanto a su intensidad, o de otro modo mediante la inclusión de un modulador adecuado dentro de una u otra de las cavidades del dispositivo, o mediante modulación directa de la potencia primaria de bombeo o de otro modo, y que siempre que los periodos de modulación excedan los tiempos de extinción característicos asociados con las cavidades o con el medio de ganancia, podrán mantenerse las ventajas de la invención. Por consiguiente, la anterior descripción del oscilador paramétrico óptico intracavidad de onda continua resonante a una longitud de onda se realiza a modo de ejemplo únicamente y no con una finalidad de limitación.
- 15
- 20

REIVINDICACIONES

- 5 1. Un método para reducir de manera significativa o eliminar las oscilaciones de relajación en un OPO intracavidad de onda continua resonante a una longitud de onda, donde el método comprende utilizar un medio (14) de ganancia para generar una radiación de bombeo en el OPO intracavidad, siendo el medio (14) de ganancia de tal manera que el tiempo de vida t_u de su estado láser superior, en ausencia de una emisión estimulada, es del orden de, o menor que el más pequeño de:

(i) un tiempo de vida t_p de la radiación de bombeo en la cavidad (18, 28) de un láser (14) de bombeo, o

(ii) un tiempo de vida t_s de aquel componente de la radiación con reducción de frecuencia que sea resonante en una cavidad (18, 22 o 18, 22, 26) del OPO

10 en donde

las condiciones para reducir significativamente o bien eliminar las oscilaciones de relajación se determinan a partir de la ecuación cúbica:

$$\alpha^3 + \frac{(1+k)}{\tau_u} \alpha^2 + \frac{k}{\tau_p} \left[\frac{(k+1)}{\tau_u} + \frac{1}{\tau_s} \right] \alpha + \frac{k(k+1)}{\tau_u \tau_s \tau_p} = 0$$

para la variable α , donde α se expresa como:

15
$$\alpha = \alpha^r + i\alpha^i$$

en donde las condiciones para que las oscilaciones de relajación sean considerablemente o más que considerablemente amortiguadas son:

$$\frac{\pi|\alpha^r|}{2|\alpha^i|} \geq 1,$$

- 20 donde α^r es negativo, $(1+k)$ es el número de veces, por encima del umbral del OPO, que el OPO intracavidad es excitado por la fuente de bombeo primaria, la población en el nivel láser inferior del medio de ganancia es insignificante.

2. OPO intracavidad de onda continua resonante a una longitud de onda que comprende:

un láser semiconductor que comprende un medio (14) de ganancia semiconductor y un reflector de Bragg;

25 una cavidad de láser de bombeo definida por una trayectoria óptica entre el reflector de Bragg y una segunda superficie (18) reflectora a través de una primera superficie (28) reflectora;

una segunda cavidad definida por una trayectoria óptica entre una tercera superficie (26) reflectora y la segunda superficie (18) reflectora;

el medio (14) de ganancia semiconductor y un material (24) no lineal situado dentro de la cavidad del láser de bombeo;

30 en donde el material (24) no lineal está también situado dentro de la segunda cavidad para acoplar la segunda cavidad a la cavidad del láser de bombeo;

en donde

el OPO intracavidad de onda continua resonante a una longitud de onda está configurado para reducir significativamente, o eliminar, las oscilaciones de relajación empleando el método de la reivindicación 1.

35

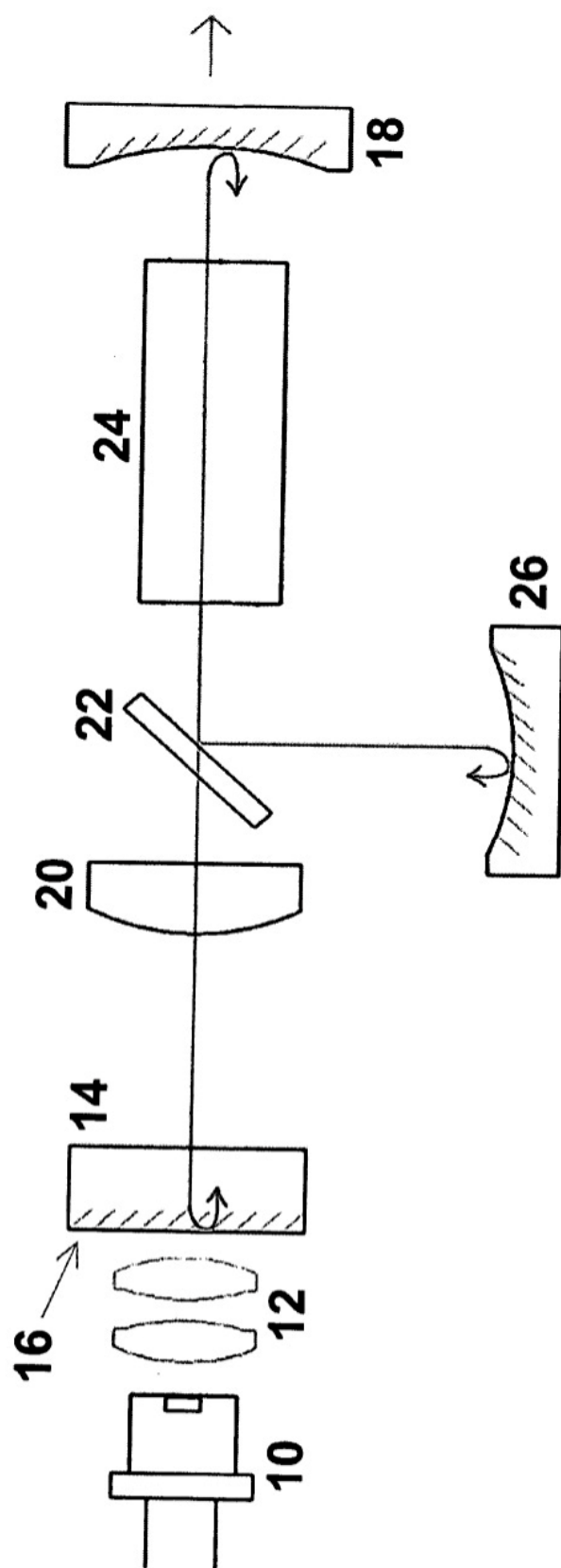


Figura 1

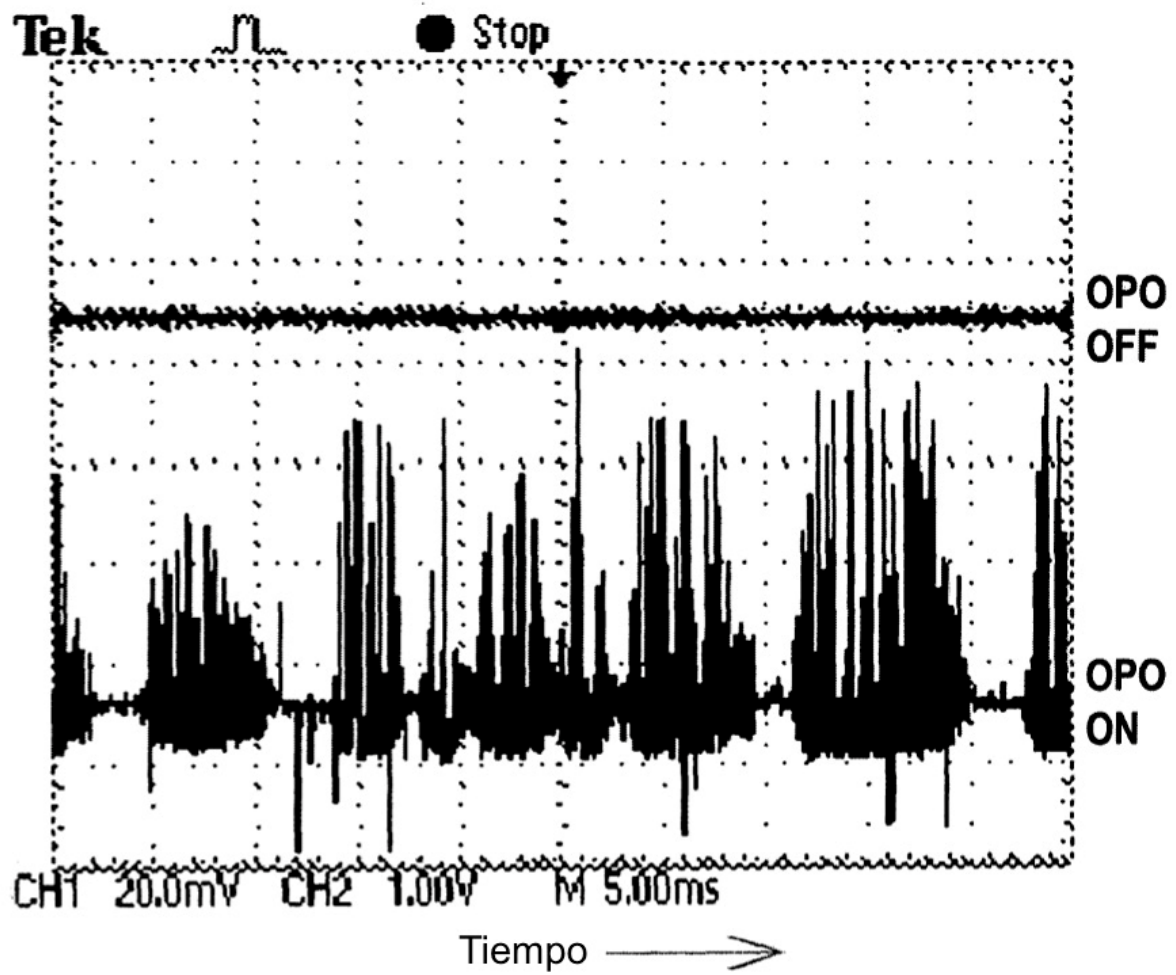


Figura 2

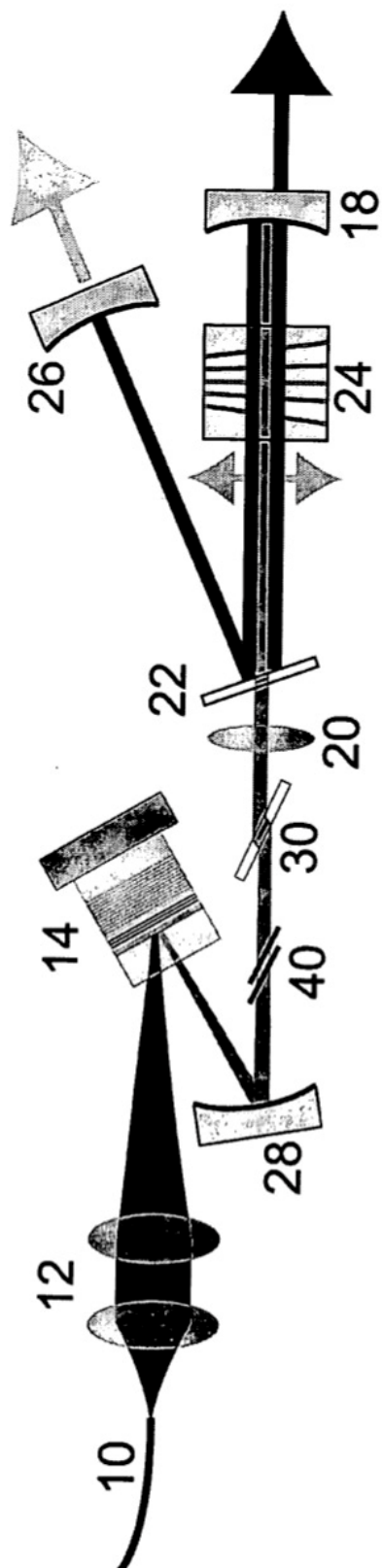


Figura 3

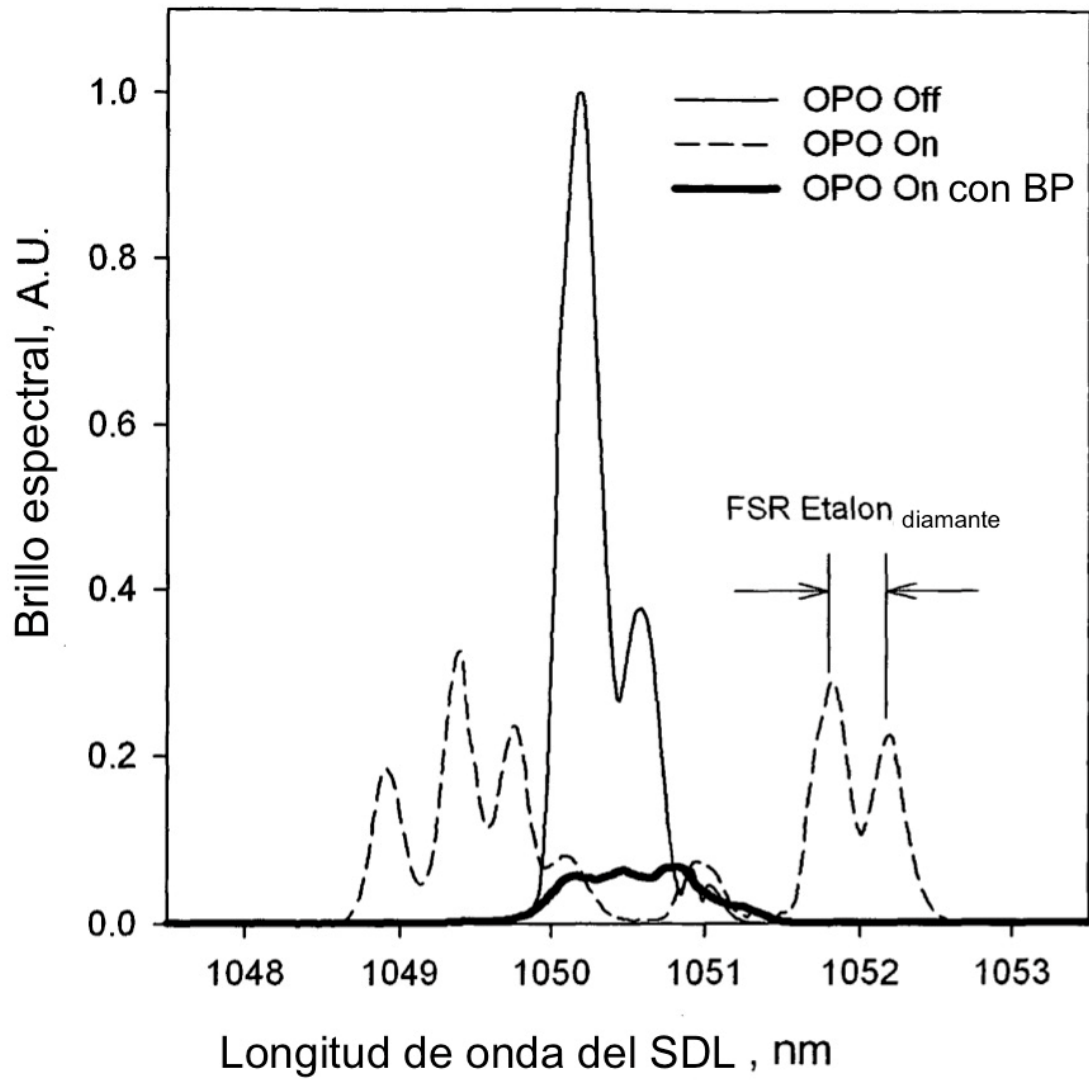


Figura 4

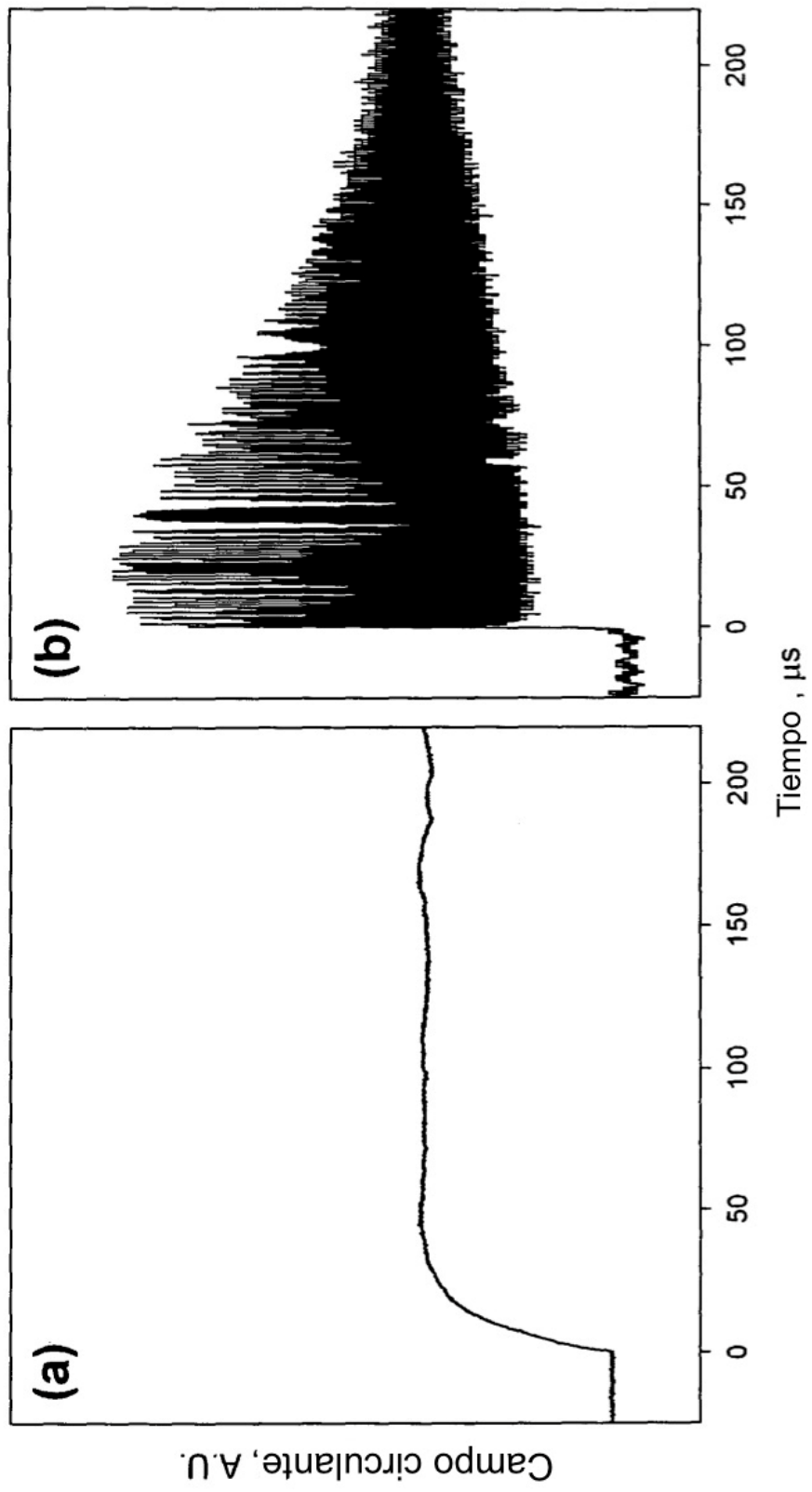


Figura 5

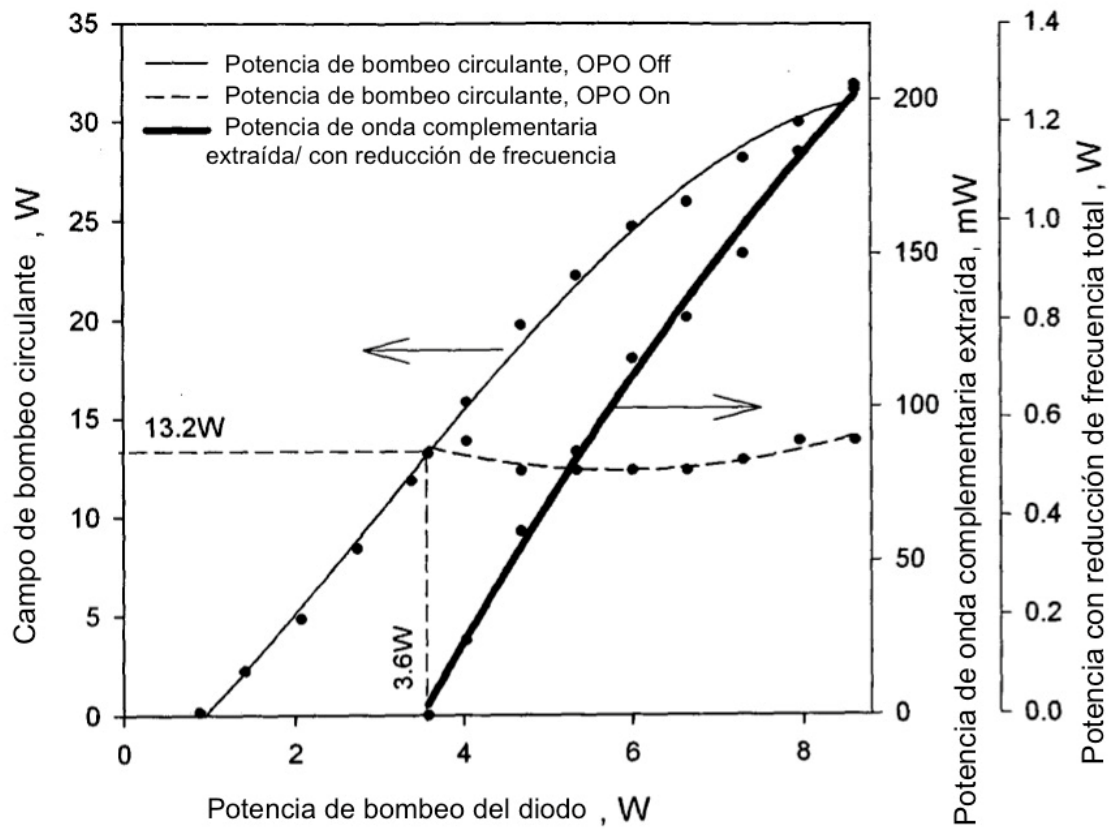


Figura 6