

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **1 292 689**

21 Número de solicitud: 202132543

51 Int. Cl.:

G02F 1/39 (2006.01)

H01S 4/00 (2006.01)

12

SOLICITUD DE MODELO DE UTILIDAD

U

22 Fecha de presentación:

08.04.2020

43 Fecha de publicación de la solicitud:

08.07.2022

71 Solicitantes:

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA (100.0%)
Avda. los Castros s/n
39001 Santander (Cantabria) ES

72 Inventor/es:

LÓPEZ HIGUERA, José Miguel;
APORTA LITAGO, Iñaki y
QUINTELA INCERA, M^a Ángeles

54 Título: **OSCILADOR ÓPTICO PARAMÉTRICO SINTONIZABLE DE FIBRA ÓPTICA PARA MICROSCOPIA CARS**

ES 1 292 689 U

DESCRIPCIÓN

**OSCILADOR ÓPTICO PARAMÉTRICO SINTONIZABLE DE
FIBRA ÓPTICA PARA MICROSCOPIA CARS**

CAMPO DE LA INVENCION

5

La presente invención pertenece al campo de los láseres en fibra óptica y, más concretamente, al campo de los osciladores ópticos paramétricos basados en fibra óptica para microscopía CARS.

10

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

15

Las nuevas fuentes de luz que operan en la banda de longitudes de onda no convencionales (en las que los láseres tradicionales no pueden oscilar) han atraído mucha atención recientemente debido a su aplicabilidad en nuevos campos, como imagen biomédica, espectroscopía y otros [1].

20

Básicamente, el interés de este tipo de fuentes radica en su capacidad de proporcionar acceso a longitudes de onda de emisión láser que no nos pueden proporcionar los materiales de ganancia existentes basados en transiciones electrónicas, ya que es muy difícil desarrollar nuevos materiales que permitan emitir en la banda no convencional. Para ello, estas nuevas fuentes de luz utilizan una conversión no-lineal en longitud de onda.

25

Los osciladores ópticos paramétricos (OPO) son fuentes de luz que operan en la banda de longitudes de onda no convencionales basadas en una interacción óptico-paramétrica. Este tipo de interacción se puede conseguir mediante la respuesta óptica no lineal $\chi(2)$ en una amplia gama de cristales o la respuesta no lineal $\chi(3)$ en determinados tipos de fibras ópticas.

Desde hace muchos años, los OPOs han sido las fuentes láser más comunes para obtener imágenes de dispersión Raman anti-Stokes (CARS, por sus siglas en inglés). La microscopía CARS es una de las técnicas más potentes para la visualización rápida de la composición química de muestras biológicas complejas. Para ello, se necesitan dos señales láser sincronizadas y sintonizables entre ellas para poder obtener una separación espectral concreta equivalente a la frecuencia de resonancia del grupo o enlace molecular a visualizar, y aquí es donde entran en juego los OPOs. El problema radica en que pese a su alta flexibilidad y la capacidad de sintonizar señales láser de alta potencia, los OPOs tienen un tamaño considerable debido a su estructura basada en óptica de volumen, y además precisan de una intensa operación de alineado, lo que restringe bastante su uso fuera de un laboratorio especializado en láseres de este tipo.

Para lograr una reducción del tamaño y complejidad de estos sistemas, se comenzó a utilizar tecnología láser basada en fibra óptica, dando lugar a OPOs basados en fibra óptica (FOPOs). Estos sistemas generados parcial o íntegramente en fibra óptica, son particularmente atractivos debido al potencial que poseen para lograr estructuras láser compactas, libres de alineado y mantenimiento, y con un bajo costo. Además, este tipo de fuentes de luz pueden ofrecen un rango de sintonización muy amplio y un régimen de alta potencia. No obstante, uno de los grandes problemas de los FOPOS, es la sincronización de las señales generadas y la consecución de la cavidad resonante basada toda en fibra, sin uso de óptica de volumen. Con el objetivo de intentar solucionar este problema, existen técnicas de sincronización activas basadas en la inclusión de tecnología en fibra en un sistema en óptica de volumen para reducir el tamaño del sistema, sin embargo, siguen sin ser sistemas basados completamente en fibra, por lo que la problemática del tamaño y alineado de la óptica de volumen sigue presente. También existe algún método de sincronización activa basado todo en fibra óptica pero muy limitado por el rango de sintonización de las señales utilizadas, lo que restringe su aplicación en microscopía CARS.

Por todo esto, la generación de señales separadas espectralmente mediante conversión de frecuencia en fibra óptica, se convierte en un método pasivo eficiente y adecuado para la sincronización de las propias señales.

5 Existen tres mecanismos básicos para la conversión de luz que pueden ser explotados para lograr una conversión de frecuencia sintonizable y sincronizada basada en fibra: desplazamiento auto-frecuencial de solitón (SSFS), generación de supercontinuo (SC) y mezcla degenerada de cuatro ondas (FWM). Estos procesos requieren de fibras ópticas con una alta no-linealidad para obtener una conversión en frecuencia eficiente mediante
10 los métodos mencionados. Por ello, las fibras de cristal fotónico (PCF) son ideales por su alto coeficiente no-lineal y su capacidad de modificar el perfil de dispersión de las mismas mediante la geometría de la estructura de agujeros de las propias fibras PCF.

En comparación con SSFS y SC, FWM permite una alta resolución espectral y una
15 intensidad de pico de las señales ideal para la generación de imágenes CARS. La mezcla de cuatro ondas en fibras PCF [2,3] es un proceso óptico paramétrico no lineal que implica la interacción de 4 ondas electromagnéticas o fotones. En el caso de los FOPOs íntegramente en fibra que utilizan fibras PCF, se denomina mezcla de cuatro ondas degenerada porque dos de los fotones que interactúan en el proceso de FWM
20 tienen la misma frecuencia. En este proceso se generan un fotón *signal* y un fotón *idler* que es como se denominan las señales generadas paraméricamente. Las frecuencias de generación de los mencionados fotones *signal* e *idler* vienen definidas por la condición de coincidencia de fase que depende de la longitud de onda de bombeo, la potencia de ésta, y el perfil de dispersión de la fibra óptica PCF del FOPO donde se produce el
25 FWM.

En cuanto a la utilización de láseres de bombeo en FOPOs, existen dos métodos significativamente comunes para realizar dicho bombeo. El primero consiste en utilizar una fuente continua, que aunque puede generar una resolución frecuencial elevada, se
30 presenta menos eficiente y con un coste más elevado para generar paraméricamente las señales necesarias. El segundo método se basa en el bombeo síncrono del FOPO

mediante una fuente de bombeo pulsada. Los láseres de bombeo pulsados en torno a las decenas de picosegundos y tasas de repetición de unos pocos MHz, son ideales para su uso en FOPOs puesto que permiten alcanzar potencias de pico razonablemente altas de varios kW, y conseguir una eficiencia de conversión en la generación paramétrica muy elevada, además del solapamiento temporal adecuado de las señales generadas necesario para realizar microscopía CARS.

La técnica más utilizada en la consecución de fuentes de bombeo pulsadas ultrarrápidas (fuentes de femtosegundos) o cuasi-continuas (fuentes de picosegundos) es el bloqueo de modo pasivo de onda continua, ya que las técnicas de bloqueo de modo activo requieren de dispositivos de modulación externos que incurren en mayores costes, tamaño, etc. Este método es muy efectivo para la consecución de láseres pulsados en torno a los picosegundos/femtosegundos en fibra, y se basa en el efecto de absorción saturable requerido en el propio oscilador que bombea el FOPO. Actualmente existen múltiples componentes para lograr este efecto de absorción saturable, entre los que se encuentran los absorbentes saturables basados en grafeno, los absorbentes saturables de nanotubos de carbono y por último, el espejo semiconductor absorbente saturable (SESAM) que es el más utilizado a nivel comercial y el que más madurez industrial presenta. Como se puede observar en [4], se pueden desarrollar osciladores pulsados basados en fibras dopadas con iterbio, con las características espectrales y temporales deseadas para ser utilizados como láser semilla de un FOPO. En este caso, los láseres en fibra ultrarrápidos basados en iterbio con tecnología SESAM han demostrado que este tipo de fibras dopadas son la mejor opción como medio de ganancia para la generación y amplificación de pulsos ultrarrápidos de modo bloqueado en torno a la región de 1 μm , gracias a su banda de absorción y emisión, y su alta eficiencia de conversión óptica.

Por otro lado, es necesario la generación de una señal espectralmente estrecha para ser selectivo a la hora de bombear el FOPO y generar con precisión las señales en las fibras PCF a través de FWM y que tengan la anchura espectral adecuada para su aplicación en microscopía CARS. Por ello, es necesario el uso de un filtro espectral estrecho incluido

en la cavidad del oscilador, como puede ser una red de bragg en fibra (FBG) como en [4] (aunque no permite una amplia sintonización del oscilador), o un filtro óptico paso banda en fibra óptica con un filtrado muy estrecho. En el artículos [5] se puede observar una fuente de luz basada en FWM con estrechamiento espectral del oscilador mediante una FBG y en el artículo [6] podemos observar un FOPO en el que aplican una técnica de estrechamiento espectral del oscilador mediante un filtro paso banda. Podemos ver un ejemplo de un FOPO basado en otra técnica de generación paramétrica en [7], patente N° US 9557626 B2.

Como se ha mencionado anteriormente, la microscopia CARS es una técnica muy potente para la obtención de imágenes de tejidos con selectividad química [8]. Durante la detección de las resonancias vibratorias de las moléculas, la información química se obtiene sin ningún tipo de etiquetado químico. Por lo tanto, CARS permite la microscopia de células vivas y es una técnica prometedora para imágenes en vivo en tiempo real. Como ya hemos explicado con anterioridad, la generación de la señal CARS requiere dos trenes de pulsos de picosegundos sincronizados con una diferencia frecuencial que coincida con la frecuencia de resonancia de interés. Por ello, el desarrollo en los últimos años de técnicas para la consecución de este objetivo, ha cobrado especial relevancia en la aplicación de FOPOs todo en fibra óptica, ya que para un uso más amplio de CARS en aplicaciones del mundo real (como las imágenes médicas en entornos clínicos) depende fundamentalmente del desarrollo de fuentes compactas, fiables y fáciles de manejar. En el caso de los FOPOs, la sincronización de la señal de bombeo y las señales generadas en el proceso de FWM en fibras PCF es inherente al propio proceso, lo que representa una gran ventaja frente a otros sistemas más complejos donde se deben introducir líneas de retardo para sincronizar las señales. Por otro lado, las señales utilizadas para generar CARS son los fotones *signal* (denominados *CARS pump*) generados paraméricamente mediante el láser fundamental que bombea el FOPO, y el propio residual del láser fundamental (denominado *CARS Stokes*) después del proceso de FWM en PCF.

Uno de los grandes problemas derivados del diseño de FOPOs para su aplicación en microscopía CARS, es la realización de un sistema que permita trabajar en todo el espectro Raman (NIR). Para ello, existe la necesidad de obtener un oscilador sintonizable (láser semilla) para bombear el FOPO que sea muy estable, con una banda ancha que permita generar paraméricamente las señales necesarias para cubrir toda la banda CARS en el espectro Raman, y que la potencia de pico en las diferentes longitudes de onda de emisión del oscilador estén ecualizadas para lograr una relación adecuada en potencia en la generación paramétrica de las señales por FWM.

El perfil de ganancia del medio activo no es plano y varía en función de la longitud de onda de emisión, por lo que es necesario controlar los valores de potencia de pico en cada longitud de onda para mantener la eficiencia de conversión en toda la banda. Una tasa de repetición baja en torno a 1 MHz sería adecuada para conseguir la potencia de pico necesaria sin generar una potencia promedio demasiado elevada, pero además esta tasa de repetición debe ser variable para ajustar dicha potencia de pico a la hora de sintonizar el oscilador que bombea el FOPO, y compensar las variaciones de potencia derivadas del desajuste del perfil de ganancia generado. También se debe trabajar en torno a las decenas de picosegundos de duración de pulso para conseguir un buen compromiso entre la resolución espectral y el solapamiento temporal de las señales generadas.

Por último, está la necesidad de obtener una fuente sintonizable que sea estable a las variaciones ambientales de temperatura y vibración, y que no necesite de control de la polarización cuando la longitud de onda de emisión del oscilador varíe puesto que supondría un proceso tedioso debido a la necesidad de modificar constantemente la polarización en el oscilador para mantener el estado de bloqueo de modo y por lo tanto el carácter pulsado de la fuente.

El artículo “Alignment-free, all-spliced fiber laser source for CARS microscopy based on four-wave-mixing” es una publicación de un láser aplicado a microscopía CARS siguiendo el principio de la generación paramétrica en una fibra PCF mediante FWM,

aunque en este caso el oscilador que bombea la fibra PCF no es sintonizable sino que emite a una longitud de onda fija, de manera que apenas cubre una banda de todo el espectro Raman, teniendo un uso limitado en su aplicación a microscopia CARS, y tampoco se podría considerar un FOPO puesto que la generación paramétrica no se lleva a cabo en una cavidad resonante, con todas las mejoras que esto proporciona, como es un umbral menor de generación de las señales, una anchura espectral menor que se traduce en una mayor resolución espectral, mayor eficiencia de conversión y un rango de sintonización más amplio.

En resumen, el punto crítico en la generación de un FOPO todo en fibra sigue siendo la sintonización de los dos trenes de pulsos para cubrir todo el espectro Raman, y la propia generación basada en fibra óptica de un tren de pulsos sincronizados con una segunda longitud de onda sin hacer uso de un sistema con óptica de volumen y que permita la sintonización en longitud de onda. Normalmente, todas estas fuentes se basan en configuraciones de espacio libre para adaptar los pulsos en ambas longitudes de onda al proceso CARS, pero recientemente, se ha demostrado que la generación paramétrica por FWM en un sistema todo de fibra óptica es un nuevo enfoque para generar el bombeo pasivamente sincronizado con los pulsos Stokes para su aplicación en microscopia CARS [9].

REFERENCIAS

1. Goda, K., Tsia, K. K., & Jalali, B. (2009). Serial time-encoded amplified imaging for real-time observation of fast dynamic phenomena. *Nature*, *458*(7242), 1145.

2. Lavoute, L., Knight, J. C., Dupriez, P., & Wadsworth, W. J. (2010). High power red and near-IR generation using four wave mixing in all integrated fibre laser systems. *Optics Express*, *18*(15), 16193-16205.

3. Nodop, D., Jauregui, C., Schimpf, D., Limpert, J., & Tünnermann, A. (2009). Efficient high-power generation of visible and mid-infrared light by degenerate four-

wave-mixing in a large-mode-area photonic-crystal fiber. *Optics letters*, 34(22), 3499-3501.

5 4. Baumgartl, M., Abreu-Afonso, J., Díez, A., Rothhardt, M., Limpert, J., & Tünnermann, A. (2013). Environmentally stable picosecond Yb fiber laser with low repetition rate. *Applied Physics B*, 111(1), 39-43.

10 5. Baumgartl, M., Gottschall, T., Abreu-Afonso, J., Díez, A., Meyer, T., Dietzek, B., ... & Tünnermann, A. (2012). Alignment-free, all-spliced fiber laser source for CARS microscopy based on four-wave-mixing. *Optics express*, 20(19), 21010-21018.

15 6. Zhang, L., Yang, S., Wang, X., Gou, D., Chen, H., Chen, M., & Xie, S. (2014). High-efficiency all-fibre optical parametric oscillator based on photonic crystal fibres pumped by ytterbium-doped fibre laser. *Electronics Letters*, 50(8), 624-626.

7. N° US 9557626 B2 – Stable, high efficiency, wavelength tunable fiber optic parametric oscillator.

20 8. Evans, C. L., & Xie, X. S. (2008). Coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy: chemical imaging for biology and medicine. *Annu. Rev. Anal. Chem.*, 1, 883-909.

25 9. Baumgartl, M., Chemnitz, M., Jauregui, C., Meyer, T., Dietzek, B., Popp, J., ... & Tünnermann, A. (2012). All-fiber laser source for CARS microscopy based on fiber optical parametric frequency conversion. *Optics express*, 20(4), 4484-4493.

30 RESUMEN DE LA INVENCION

La presente invención trata de resolver los inconvenientes mencionados anteriormente mediante un oscilador óptico paramétrico sintonizable todo en fibra óptica configurado

para generar paraméricamente en fibras de cristal fotónico, las señales necesarias para cubrir el espectro Raman (NIR) con la resolución espectral, y el solapado temporal y espacial requeridos en su aplicación a microscopía CARS, que comprende:

- 5 - Un oscilador pulsado sintonizable (láser semilla), que comprende a su vez:
 - un absorbente saturable con una saturación de fluencia comprendida entre 30 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ y 300 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$, un tiempo de relajación comprendido entre 100 fs y 100 ps, un coeficiente de absorción comprendido entre un 5% y un 40% y una profundidad de modulación comprendida entre un 5% y un 50%;
 - 10 - un elemento polarizador o controlador de la polarización para la región de trabajo de una fibra dopada con tierras raras;
 - un multiplexor por división de longitud de onda adaptado a las longitudes de onda utilizadas en el oscilador;
 - Un medio de ganancia consistente en una fibra dopada con tierras raras;
 - 15 - Al menos una fuente de bombeo adaptada para activar al menos parte de la mencionada fibra dopada con tierras raras y generar el láser semilla, tal que dicha fuente de bombeo está conectada al multiplexor por división de longitud de onda por el puerto correspondiente a la longitud de onda de la propia fuente de bombeo, y dicho multiplexor por división de longitud de onda debe estar comprendido entre el elemento absorbente saturable y la fibra dopada con
 - 20 tierras raras;
 - un filtro óptico sintonizable (filtro paso banda) configurado para seleccionar la longitud de onda de emisión del láser semilla;
 - Un acoplador óptico configurado para realizar la salida del láser semilla por el
 - 25 puerto que desacopla menor potencia, utilizando el puerto con el mayor porcentaje de relación de acoplo para realimentar la cavidad del láser semilla;
- Un aislador óptico conectado al puerto con menor relación de acoplo del acoplador óptico, con una relación de aislamiento de al menos 25 dB;

30

5 - Un amplificador formado por al menos una etapa amplificadora basada en fibra dopada con tierras raras, donde cada etapa comprende a su vez una fibra dopada con tierras raras bombeada por una fuente de bombeo, tal que dicha fibra y la fuente de bombeo están conectadas entre sí a través de un multiplexor por división de longitud de onda, y tal que la señal a amplificar, que proviene del láser semilla, se acopla al multiplexor por división de longitud de onda del amplificador;

10 - Una etapa de generación paramétrica donde se produce la generación paramétrica de los fotones *signal* e *idler* que comprende un multiplexor de longitud de onda conectado a la salida del amplificador, tal que dicho multiplexor por división de longitud de onda se conecta por su puerto común al extremo de una fibra de cristal fotónico, y tal que el otro extremo de dicha fibra se conecta a un conector que funciona como un espejo con una reflectancia mínima del 4%, y tal que el puerto restante del multiplexor de longitud de onda está conectado al extremo de una línea de retardo basada en fibra y el otro extremo de dicha línea de retardo se encuentra conectado a un elemento reflector que permite reflejar las señales generadas paraméricamente con una reflectancia de al menos el 50%.

20 En una posible realización, el láser semilla sintonizable presenta una cavidad lineal, el absorbente saturable trabaja en reflexión, y el oscilador óptico comprende además un espejo de fibra óptica con una reflectancia de al menos el 50% dentro del cual se conecta el filtro óptico sintonizable tal que el absorbente saturable, situado en el extremo opuesto de la cavidad, actúa como otro espejo funcionando en reflexión. Alternativamente, el láser semilla sintonizable presenta una cavidad en anillo y el absorbente saturable trabaja en transmisión.

25 En una posible realización, el láser semilla trabaja por bloqueo de modo de onda continua.

30 En una posible realización, uno de los extremos de la fibra dopada con tierras raras se encuentra conectado al puerto común del multiplexor por división de longitud de onda.

En una posible realización, el láser semilla comprende además un tramo de fibra mantenadora de la polarización conectado entre la fibra óptica dopada con tierras raras y el acoplador óptico.

5

En una posible realización, el puerto común del acoplador óptico se encuentra conectado al extremo de la fibra mantenadora de la polarización más alejado de la fuente de bombeo, y el puerto que desacopla el mayor porcentaje de potencia se conecta al filtro óptico sintonizable. Alternativamente, el puerto común del acoplador óptico se encuentra conectado al extremo de la fibra óptica dopada con tierras raras más alejado de la fuente de bombeo, y el puerto que desacopla el mayor porcentaje de potencia se conecta al filtro óptico sintonizable.

10

En una posible realización, el absorbente saturable se sitúa en la zona de la cavidad más alejada en referencia a la propagación de la luz emitida desde la fuente de bombeo.

15

En una posible realización, el elemento polarizador se sitúa antes del elemento absorbente saturable, entendiendo este elemento como el más alejado en referencia a la propagación de la luz emitida desde la fuente de bombeo.

20

En una posible realización, el filtro óptico sintonizable presenta una anchura espectral comprendida entre 50 pm y 380 pm y una anchura de banda de sintonización de al menos 30 nm

25

En una posible realización, el oscilador óptico comprende además un elemento óptico selector de pulsos configurado para variar la tasa de repetición del tren de pulsos proveniente del láser semilla, situado entre el amplificador y el aislador óptico. En una posible realización, el oscilador óptico comprende además una etapa de pre-amplificación ubicada entre el elemento óptico selector de pulsos y el aislador óptico.

30

En una posible realización, el oscilador óptico comprende además un aislador óptico cuya entrada se encuentra conectada a la salida del amplificador y cuya salida se encuentra conectada a la entrada del multiplexor de longitud de onda de la etapa de generación paramétrica, configurado para proteger las etapas de amplificación y el láser semilla de las posibles reflexiones generadas en la etapa de generación paramétrica.

5

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

10 Con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica del mismo, y para complementar esta descripción, se acompaña como parte integrante de la misma, un juego de dibujos, cuyo carácter es ilustrativo y no limitativo. En estos dibujos:

15 La figura 1A muestra un esquema general de la unidad FOPO de la invención con el láser semilla diseñado en cavidad lineal (1) o en anillo (2).

La figura 1B muestra un esquema de un amplificador (o etapa amplificadora) de la invención.

20

La figura 2 muestra un ejemplo de realización de la unidad FOPO de la invención.

25 La figura 3 muestra las medidas de los espectros ópticos del oscilador pulsado por bloqueo de modo (láser semilla) sintonizados en todo el rango de emisión (la longitud de onda en nm, en el eje de abscisas, y la potencia óptica en dBm, en el eje de ordenadas).

25

30 La figura 4 muestra el espectro óptico en escala logarítmica del oscilador pulsado (láser semilla) sintonizado en 1042.5 nm (la longitud de onda en nm, en el eje de abscisas, y la potencia óptica en dBm, en el eje de ordenadas).

30

La figura 5 muestra un pulso detectado y autocorrelado del láser sintonizable (tiempo en ps, en el eje de abscisas, y unidades arbitrarias a.u., en el eje de ordenadas)

5 La figura 6 muestra un tren de pulsos fotodetectado del láser sintonizable (tiempo en ms, en el eje de abscisas, y unidades arbitrarias a.u., en el eje de ordenadas)

10 La figura 7 muestra las medidas de los espectros ópticos del láser semilla sintonizados en todo el rango de emisión después de la etapa de amplificación (la longitud de onda en nm, en el eje de abscisas, y la potencia óptica en dBm, en el eje de ordenadas).

15 La figura 8 muestra el espectro óptico en escala logarítmica del láser semilla sintonizado en 1042.5 nm después de ser amplificado en la etapa de pre-amplificación (la longitud de onda en nm, en el eje de abscisas, y la potencia óptica en dBm, en el eje de ordenadas).

20 La figura 9 muestra el espectro óptico en escala lineal del láser pre-amplificado sintonizado en 1042.5 nm después de ser amplificado en la etapa de amplificación principal (la longitud de onda en nm, en el eje de abscisas, y la intensidad normalizada., en el eje de ordenadas).

25 La figura 10 muestra la simulación de la generación paramétrica de las señales “signal” e “idler” en la fibra PCF utilizada (la longitud de onda de bombeo en nm, en el eje de abscisas, y la longitud de onda de las señales “signal” e “idler” en nm, en el eje de ordenadas).

30 La figura 11 muestra el espectro óptico de la componente bombeo y las señales generadas paraméricamente mediante mezcla de cuatro ondas en fibra PCF para una longitud de onda de emisión de 1032.5 nm

La figura 12 muestra las medidas del espectro óptico de la señal “signal” o anti-Stokes generadas paramétricamente en el FOPO para la banda de emisión sintonizable del láser semilla (la longitud de onda de la señal anti-Stokes en nm, en el eje de abscisas, y la potencia óptica en dBm, en el eje de ordenadas).

5

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

En este texto, el término “comprende” y sus variantes no deben entenderse en un sentido excluyente, es decir, estos términos no pretenden excluir otras características técnicas, aditivos, componentes o pasos.

10

Además, los términos “aproximadamente”, “sustancialmente”, “alrededor de”, “unos”, etc. deben entenderse como indicando valores próximos a los que dichos términos acompañen, ya que por errores de cálculo o de medida, resulte imposible conseguir esos valores con total exactitud.

15

Las características del sistema de la invención, así como las ventajas derivadas de las mismas, podrán comprenderse mejor con la siguiente descripción, hecha con referencia a los dibujos antes enumerados.

20

Las siguientes realizaciones preferidas se proporcionan a modo de ilustración, y no se pretende que sean limitativos de la presente invención. Además, la presente invención cubre todas las posibles combinaciones de realizaciones particulares y preferidas aquí indicadas. Para los expertos en la materia, otros objetos, ventajas y características de la invención se desprenderán en parte de la descripción y en parte de la práctica de la invención.

25

A continuación se describe el oscilador óptico paramétrico sintonizable en fibra óptica de la invención (FOPO) configurado para lograr una estructura láser compacta, libre de alineado y mantenimiento, y con un bajo costo que permita generar paramétricamente en fibras PCF, las señales necesarias para cubrir el espectro Raman (NIR) con la

30

resolución espectral, y el solapado temporal y espacial requeridos en su aplicación a microscopía CARS.

5 La interconexión de todos los elementos que componen el sistema de la invención se realiza mediante empalme por fusión, sin combinar óptica de volumen ni elementos de propagación de espacio libre, lo que permite trabajar sin necesidad de alineamiento, y por lo tanto, con una fuente portable que pueda operar fuera de un laboratorio especializado. Además, todos los elementos ópticos en fibra utilizados para conformar las diferentes etapas del FOPO deben realizarse en fibras mantenedoras de polarización (fibras PM) para generar un FOPO altamente estable a perturbaciones ambientales (temperatura, vibración, presión...) que pudieran poner en peligro el carácter pulsado de la fuente mediante bloqueo de modo, puesto que al usar fibras no PM, se producen interferencias entre los modos transversales polarizados en diferentes ejes, lo que suprime el bloqueo de modo y por lo tanto el carácter pulsado del oscilador. De esta manera, es esencial el uso de fibras PM en la consecución del FOPO, y todos los empalmes por fusión entre fibras deben realizarse previo alineamiento de los ejes de polarización de las mismas.

20 El sistema de la invención comprende un oscilador pulsado sintonizable (láser semilla), al menos un aislador óptico 9, un amplificador 11 formado por al menos una etapa basada en fibra dopada con tierras raras, y una etapa de generación paramétrica basada en fibras PCF. Opcionalmente el sistema comprende un elemento óptico selector de pulsos 10 para controlar la tasa de repetición de la señal proveniente del láser semilla, con el objetivo de controlar la potencia de pico de cada longitud de onda de emisión. 25 Opcionalmente, si existe más de una etapa de amplificación, se puede situar un aislador óptico entre dichas etapas que no está incluido en el esquemático.

El oscilador sintonizable (láser semilla) que bombea el FOPO es un sistema láser por bloqueo de modo que puede trabajar en los siguientes modos:

- 30 - Conmutación Q: la energía se acumula en la cavidad en un periodo de tiempo, a partir del cual, se libera toda la energía en un solo pulso.

- Bloqueo de modo de onda continua: el láser tiene una salida pulsada con un tren de pulsos cuasi-idénticos con una tasa de repetición conocida.
- Bloqueo de modo con conmutación Q: es una combinación de los dos modos anteriores, donde el láser fluctúa emitiendo pulsos más largos modulados por un tren de pulsos parecido al encontrado en el bloqueo de modo de onda continua.
- Múltiple pulso: Opera como el bloqueo de modo de onda continua pero emitiendo varios pulsos simultáneamente, variando la tasa de repetición del mismo y generando ruido e inestabilidades.

5

10

Preferentemente, el láser semilla trabaja por bloqueo de modo de onda continua, al tratarse del modo más eficiente.

15

El láser semilla sintonizable presenta al menos una cavidad lineal (figura 1A-1) o en anillo (figura 1A-2), y comprende:

- un absorbente saturable 1 trabajando en reflexión o transmisión (dependiendo de la configuración de la cavidad: si es una configuración lineal trabaja en reflexión, y si es en anillo en transmisión) con una saturación de fluencia comprendida entre aproximadamente 30 uJ/cm^2 y aproximadamente 300 uJ/cm^2 , un tiempo de relajación comprendido entre aproximadamente 100 fs y aproximadamente 100 ps, un coeficiente de absorción comprendido entre aproximadamente un 5% y aproximadamente un 40% y una profundidad de modulación comprendida entre aproximadamente un 5% y aproximadamente un 50%.
- un elemento polarizador o controlador de la polarización 2 para la región de trabajo de la fibra dopada con tierras raras.
- un multiplexor por división de longitud de onda 5 (WDM) adaptado a las longitudes de onda utilizadas en el oscilador.
- Un medio de ganancia consistente en una fibra dopada con tierras raras 4 que deben ser Yt, Er, Tm, Pr, Ho, Sm o Nd, todas conocidas y usadas en función de la longitud de onda a utilizar. La longitud varía en función de la ganancia del

20

25

30

propio sistema, y esta a su vez es controlada por la energía de bombeo inyectada mediante una fuente de bombeo 6. Puede diseñarse para utilizar otros tipos de medio de ganancia o combinación de diferentes medios.

- 5 - Al menos una fuente de bombeo 6 adaptada para activar al menos parte de la mencionada fibra dopada con tierras raras 4 y generar el láser semilla. La idoneidad de la fuente de bombeo 6 viene determinada por la longitud de onda de emisión del láser, la potencia óptica y en algunos casos, las características del pulso.
- 10 - un filtro óptico sintonizable 7 (filtro paso banda) que permita cubrir al menos 30 nm, preferentemente al menos 40 nm, y más preferentemente al menos 50 nm, de la banda de trabajo, con una anchura espectral FWHM de 80 pm, siendo el peor caso 0.3 nm.
- 15 - un espejo de fibra óptica 8 (en caso de una cavidad lineal) con una reflectancia de al menos el 50%, que puede ser realizado mediante un acoplador óptico 3 actuando como un interferómetro de Sagnac, o un circulador acoplando los puertos adecuadamente.
- 20 - Un acoplador óptico 3 configurado para realizar la salida del láser por el puerto que desacopla menor potencia, utilizando el otro puerto para realimentar la cavidad del láser semilla. Este acoplador debe tener una relación de acoplo adecuada a la relación de potencia óptica que se quiere obtener a la salida del láser semilla. La relación de acoplo puede variar entre 95/5, 90/10, 80/20 o 70/30.

25 La fuente de bombeo 6 está conectada al multiplexor por división de longitud de onda 5 por el puerto correspondiente a la longitud de onda de la propia fuente de bombeo 6. La cavidad debe estar configurada para que la fuente de bombeo 6 bombee el medio activo de ganancia basado en fibra óptica dopada con tierras raras 4. De esta manera, lo primero que se genera es la banda de ganancia de interés donde se producen los pulsos que luego bombean la etapa de generación paramétrica. La fuente de bombeo 6 puede
30 situarse en cualquier lugar de la cavidad siempre que esté comprendida entre el elemento absorbente saturable 1 y la fibra dopada con tierras raras 4.

La fibra dopada con tierras raras 4 se sitúa lo más cerca posible de la fuente de bombeo 6, y preferentemente tal que uno de los extremos de la fibra dopada con tierras raras 4 se encuentre conectado al puerto común del multiplexor por división de longitud de onda 5, de manera que la generación de la región de ganancia sea lo más eficiente posible, evitando pérdidas introducidas por otros elementos ópticos que se pudieran situar entre ambos.

Opcionalmente, el láser semilla comprende un tramo de fibra estándar PM (no referenciado en las figuras) que actúa como línea de retardo y que se utiliza para determinar la longitud de la cavidad, y por lo tanto, el tiempo que tarda el pulso en recorrer la cavidad ida y vuelta, conocido como tasa de repetición de los pulsos. Este tramo de fibra se puede introducir indistintamente en cualquier parte de la cavidad, pero preferentemente se conecta entre la fibra óptica dopada con tierras raras 4 y el acoplador óptico 3.

Como se ha comentado anteriormente, el acoplador óptico 3 está configurado para generar una salida para el láser semilla. El puerto con el mayor porcentaje de relación de acoplo se utiliza para realimentar la cavidad, mientras que el de menor relación de acoplo saca los pulsos del láser semilla, ya sea en una configuración de cavidad lineal o cavidad en anillo. Esto es, el puerto común del acoplador óptico 3 se conecta al extremo de una fibra que corresponde a una parte de la cavidad, el puerto de mayor porcentaje de acoplo se conecta el extremo de la otra fibra que forme parte de la otra parte de la cavidad, y el puerto con menor relación de acoplo es utilizado como salida del láser. Es decir, el acoplador óptico 3 es un elemento con tres puertos (puerto común, puerto con mayor porcentaje de relación de acoplo y puerto con menor relación de acoplo) situado entre dos elementos de la cavidad, de manera que uno de esos tres puertos queda libre, generando una salida del láser.

El puerto común del acoplador óptico 3 se sitúa preferentemente conectado al extremo de la fibra óptica dopada con tierras raras 4 más alejado de la fuente de bombeo 6, o en

su defecto, si se ha introducido una línea de retardo basada en fibra, se conectará a ésta. De esta manera, el puerto que desacopla el mayor porcentaje de potencia se conecta al siguiente elemento que conforma la cavidad, preferentemente el filtro óptico sintonizable 7.

5

El puerto de salida del láser semilla (puerto de menor relación de acoplo del acoplador óptico 3) está conectado al puerto de entrada de un aislador óptico 9 con una relación de aislamiento de al menos 25 dB, y preferentemente de al menos 50 dB, para protegerlo de posibles reflexiones producidas en la etapa de amplificación. Este aislador 9, que no forma parte del láser semilla ni del amplificador 11 que se describirá más adelante, es un elemento de interfaz entre ambas etapas que protege al láser semilla de posibles reflexiones que podrían dañar la estructura del mismo o suprimir el funcionamiento por bloqueo de modo, y por lo tanto, su carácter pulsado.

10

15

Además, como se ha mencionado anteriormente, el láser semilla comprende el filtro óptico sintonizable 7 que permite seleccionar la longitud de onda de emisión del láser semilla, con una anchura espectral preferentemente comprendida entre 50 pm y 380 pm y preferentemente con una anchura de banda de sintonización de al menos 30 nm.

20

El filtro óptico sintonizable 7 se ubica en cualquier lugar de la cavidad, aunque preferentemente en el caso de que el láser semilla presente cavidad lineal, se conecta dentro de un espejo de fibra óptica 8 para minimizar las pérdidas de inserción ocasionadas por el mismo, y por lo tanto las pérdidas totales en el sistema. Alternativamente, el filtro óptico sintonizable 7 se encuentra conectado al puerto que desacopla el mayor porcentaje de potencia óptica del acoplador óptico 3. En otra posible realización, el filtro óptico sintonizable 7, se conecta entre el multiplexor por división de longitud de onda 5 y el absorbente saturable 1.

25

30

El absorbente saturable 1, que permite darle el carácter pulsado al láser semilla mediante la modulación de los modos longitudinales que resuenan en la cavidad, logra generar una interferencia constructiva de las fases de todos los modos, dando lugar a

pulsos ultracortos que se propagan a lo largo de la cavidad. Preferentemente, el elemento absorbente saturable 1 se sitúa en la zona de la cavidad más alejada en referencia a la propagación de la luz emitida desde la fuente de bombeo 6, puesto que es un elemento frágil y susceptible al foto-dañado, por lo que esta configuración protege este componente clave en la generación de los pulsos, al ser el último elemento que recibe la luz generada en la cavidad.

Es necesario que el láser semilla comprenda un elemento polarizador 2 que acople la luz generada y realimentada en la cavidad, al eje lento de polarización otorgando gran estabilidad a los pulsos generados en el láser semilla frente a cambios ambientales. El elemento polarizador 2 puede situarse en cualquier zona de la cavidad, pero preferentemente se sitúa antes del elemento absorbente saturable 1, entendiendo este elemento como el más alejado en referencia a la propagación de la luz emitida desde la fuente de bombeo 6. De esta manera, se obtiene mayor estabilidad en la generación de pulsos con la luz proveniente del medio de ganancia basado en fibra óptica dopada con tierras raras 4.

Todos los elementos mencionados que conforman el láser semilla pueden utilizar una configuración en cavidad lineal o en anillo.

La figura 1A(1) muestra un esquema de una posible realización del láser semilla presentando una cavidad lineal. En esta configuración, el sistema comprende además un elemento que actúa como espejo en un extremo de la cavidad, denominado espejo de fibra óptica 8. El absorbente saturable 1, situado en el extremo opuesto de la cavidad, actúa como otro espejo funcionando en reflexión. De esta forma, se define una cavidad lineal, dos espejos, un medio de ganancia y una salida.

En una posible realización el espejo de fibra óptica 8 es un circulador, tal que los puertos 3 y 1 propios del circulador se encuentran conectados, y el puerto 2 propio del circulador se encuentra conectado a la cavidad, de manera que la luz se recircule en la

propia cavidad. En otra posible realización, el espejo de fibra óptica 8 es un acoplador de tres o cuatro puertos en una configuración de interferómetro de Sagnac.

5 La situación en la cavidad de los componentes mencionados que conforma el oscilador óptico puede variar atendiendo a las explicaciones anteriores, pero la configuración más eficiente a nivel de conversión de ganancia, generación de pulsos y vida útil de los componentes es mediante una configuración en cavidad lineal como la propuesta en la figura 1A(1): la fuente de bombeo 6 genera luz en la longitud de onda adecuada para bombear una fibra dopada con tierras raras 4 a través de un multiplexor de longitud de onda 5. Esta luz generada en la región de ganancia dependiente de la tierra rara con la que está dopada la fibra se retroalimenta en la cavidad lineal en cuyos extremos están situados, por un lado, un espejo absorbente saturable 1 que realiza las funciones de a) modulator pasivo para generar una fuente pulsada y b) espejo en la región de ganancia de la fibra dopada con tierras raras 4; y por otro lado, en el extremo opuesto, un espejo de fibra óptica 8 con un filtro óptico sintonizable 7 que permite recircular la señal proveniente del absorbente saturable 1 y sintonizarla en una longitud de onda específica. El polarizador 2 permite acoplar la luz en el eje de polarización lento, dotando de estabilidad al láser pulsado ante perturbaciones ambientales externas, tales como vibración, temperatura, presión... manteniendo el carácter pulsado del mismo. 15 Por otro lado, el acoplador óptico 3 permite obtener una salida para la señal pulsada generada en la cavidad. 20

En el caso de utilizar una configuración en anillo como se puede observar en la figura 1A(2), no es necesario introducir el espejo de fibra óptica 8 utilizado en la configuración lineal, pero el elemento absorbente saturable 1 utilizado debe trabajar en transmisión. 25

Preferentemente, la cavidad del láser semilla que bombea el FOPO presenta una configuración con cavidad lineal, puesto que la tasa de repetición es la mitad respecto a la configuración en anillo debido al recorrido que realiza el pulso en la cavidad. En caso de una cavidad lineal, el pulso tiene que hacer un viaje de ida y vuelta 30

reduciendo la tasa de repetición a la mitad, lo que genera el doble de potencia de pico de los pulsos en una cavidad lineal respecto a una en anillo, como viene determinada por la siguiente formula:

$$f_{rep(Lineal)} = \frac{c}{2 \cdot n \cdot L} \qquad f_{rep(Anillo)} = \frac{c}{n \cdot L}$$

Siendo $f_{rep(Lineal)}$ y $f_{rep(Anillo)}$ la tasa de repetición en cavidad lineal y en anillo respectivamente, c la velocidad de la luz en el vacío, n el índice de refracción efectivo de la fibra, y L la longitud de la cavidad.

10

El funcionamiento del láser semilla se basa en el bombeo de la fibra dopada con tierras raras 4, (mediante una fuente de bombeo 6 adecuado a las características del propio medio activo) lo que genera una región de ganancia que es filtrada espectralmente mediante el filtro óptico sintonizable 7 en fibra óptica. Esta luz generada produce la saturación del elemento absorbente saturable 1, dando lugar a una reflexión de dicha luz durante un periodo muy corto determinado por el tiempo de relajación del propio elemento absorbente saturable 1, que es del orden de unidades o decenas de picosegundos. De esta manera, se genera un pulso en la cavidad y, gracias al elemento polarizador 2 que acopla la luz al eje lento de polarización, se asegura un régimen de operación estable a perturbaciones ambientales permitiendo sintonizar la longitud de onda de emisión del láser sin perder el carácter pulsado.

15

20

Para sacar el tren de pulsos del láser semilla con la calidad espectral y temporal adecuada, se debe generar una salida. Como ya hemos explicado anteriormente, se realiza a través de un acoplador óptico 3 que se conecta al puerto de entrada de un aislador óptico 9, para preservar el funcionamiento del láser semilla ante posibles reflexiones producidas en el amplificador 11.

25

Opcionalmente, el sistema comprende un elemento óptico selector de pulsos 10 para variar la tasa de repetición del tren de pulsos proveniente del láser semilla. Este

30

elemento, que no forma parte del láser semilla ni del amplificador 11, es un elemento de interfaz entre ambas etapas que permite disminuir la tasa de repetición con el objetivo de maximizar la potencia de pico y facilitar el proceso no lineal de generación paramétrica en la fibra PCF. Este elemento se debe situar preferentemente entre el amplificador 11 y el aislador óptico 9, puesto que para disminuir la tasa de repetición de tren de pulsos proveniente del láser semilla, se produce un filtrado de pulsos de manera sincronizada, reduciendo la potencia promedio de dicho tren de pulsos, y por lo tanto, es necesaria su amplificación posterior. En el caso de obtener baja potencia a la salida del láser semilla, puede ser necesario situar una etapa de pre-amplificación ubicada entre el elemento óptico selector de pulsos 10 y el aislador óptico 9.

Por otro lado, el sistema de la invención comprende un amplificador 11 (figura 1B) formado por al menos una etapa amplificadora basada en fibra dopada con tierras raras, tal que cada etapa comprende a su vez al menos una fuente de bombeo 18, un multiplexor por división de longitud de onda 19, una fibra dopada con tierras raras 20 y opcionalmente un aislador óptico situado a la salida del extremo en propagación de la fibra dopada con tierras raras 20. Es decir, cada etapa amplificadora del amplificador 11 comprende una fibra dopada con tierras raras 20 bombeada por la fuente de bombeo 18, tal que dicha fibra 20 y la fuente de bombeo 18 están conectadas entre sí mediante empalme de fusión a través de un multiplexor por división de longitud de onda 19 (nótese que la fuente de bombeo 18, la fibra dopada con tierras raras 20 así como el multiplexor por división de longitud de onda 19, ambos pertenecientes a la/s etapa/s del amplificador 11 se muestra en la figura 1B).

En la/s etapa/s de amplificación, la fibra dopada con tierras raras 20 se conecta al puerto común del multiplexor por división de longitud de onda 19, y la fuente de bombeo 18 al puerto de bombeo correspondiente de dicho multiplexor por división de longitud de onda 19. Además la señal a amplificar, que proviene del láser semilla, se acopla mediante la salida del aislador óptico 9 o mediante la salida del elemento óptico selector de pulsos 10, en el caso de que exista, al multiplexor por división de longitud de onda 19 del amplificador 11. Opcionalmente, entre etapasificadoras se puede

introducir un elemento aislador óptico. La conexión de cada etapa amplificadora del amplificador 11 se realiza en los mismo términos que se ha descrito anteriormente.

5 La señal proveniente del láser semilla es amplificada hasta alcanzar la potencia necesaria para generar el efecto no lineal deseado en fibra PCF. Por lo tanto, la salida del amplificador 11 se conecta preferentemente a la entrada de un aislador óptico 12 (elemento interfaz) para proteger las etapas de amplificación y el láser semilla de las posibles reflexiones generadas en la etapa de generación paramétrica del FOPO. Alternativamente, la salida del amplificador 11 se conecta a la entrada de la etapa de
10 generación paramétrica.

La etapa de generación paramétrica que comprende el FOPO está basada en fibra PCF 16, donde se produce la generación paramétrica de los fotones *signal* e *idler* mediante FWM. La fibra PCF 16 seleccionada debe tener el perfil de dispersión adecuado, que
15 en conjunción con la longitud de onda de bombeo generada en el láser semilla sintonizable determinan lo que se conoce como condición de coincidencia de fase de la generación paramétrica. Esto nos da información de la generación espectral de los fotones *signal* e *idler* mencionados.

20 Por lo tanto, para formar la etapa de generación paramétrica que comprende el FOPO, se conecta la salida del aislador óptico 12 (o la salida del amplificador 11 en el caso de que el sistema no comprenda este aislador óptico 12) al puerto correspondiente en esa región de trabajo de un multiplexor de longitud de onda 15. El puerto común del multiplexor de longitud de onda 15 se conecta al extremo de la fibra PCF 16 mediante
25 fusión, y el otro extremo de dicha fibra a un conector 17 (preferentemente un conector FC) que debe proporcionar una salida a la fuente y, a su vez, que funcione como un espejo con una reflectancia mínima del 4%, generando uno de los extremos que formarían la cavidad resonante de la etapa de generación paramétrica del FOPO. El puerto restante del multiplexor de longitud de onda 15 que trabaja en la región de una
30 de las señales generadas paraméricamente, está conectado al extremo de una línea de retardo basada en fibra 14 y el otro extremo de dicha línea de retardo se conecta a un

elemento reflector 13 que permite reflejar las señales generadas paramétricamente (al menos una de ellas) con una reflectancia de al menos el 50%, y que actúa como el otro extremo de la cavidad resonante de la etapa de generación paramétrica del FOPO. La línea de retardo 14 tiene una longitud L adaptada a la tasa de repetición del láser semilla o múltiplo de esta para generar una cavidad resonante en unas longitudes de onda concretas en base a:

$$L = \frac{c}{2 \cdot n_g \cdot f_{rep}(Línea)} \qquad L = \frac{c}{n_g \cdot f_{rep}(Semilla)}$$

Como ya se ha mencionado con anterioridad, para la generación de la señal CARS son necesarias dos componentes: el denominado *CARS pump* correspondiente al *signal* generado en el FWM en PCF y el *CARS Stokes* que se corresponde con el propio láser fundamental generado en el láser semilla y que bombea el FOPO y genera el proceso de FWM en la fibra PCF. La sintonización de este láser semilla permite variar la diferencia frecuencial entre estas dos componentes, dando acceso a diferentes resonancias del espectro CARS.

Este FOPO suministra las señales necesarias para la identificación de enlaces moleculares en el espectro Raman (NIR) para su aplicación en microscopía CARS, y se diferencia de los FOPOs comprendidos en el estado de la técnica en su concepción, en su filosofía de funcionamiento y en sus prestaciones técnicas. No existe en la actualidad, ningún sistema FOPO todo en fibra, sintonizable con este diseño de bajo coste que permita generar paramétricamente las señales necesarias para su aplicación en microscopía CARS.

25

Ejemplos

A continuación se muestra un ejemplo concreto de realización de un oscilador óptico paramétrico sintonizable en fibra óptica (FOPO) para su aplicación en microscopía CARS, de acuerdo al esquemático mostrado en la figura 2. Los resultados experimentales mostrados están referenciados a las figuras descritas anteriormente.

30

Todas las conexiones entre componentes de fibra óptica y/o fibras ópticas del sistema están realizadas mediante empalmes de fusión, y todas las fibras utilizadas en esta configuración experimental son mantenedoras de polarización (fibras PM). Además, los componentes utilizados para conformar esta configuración experimental son de carácter comercial y con el mínimo coste posible.

El sistema de la invención comprende un oscilador pulsado sintonizable (láser semilla), dos aisladores ópticos 29 y 42 (equivalentes a los aisladores ópticos 9 y 12 de la descripción general), un amplificador formado por dos etapas amplificadoras (un pre-amplificador y un amplificador de potencia) basadas en fibra dopada con tierras raras, en este caso iterbio, y una etapa de generación paramétrica (oscilador paramétrico) basada en FWM en fibras PCF con una cavidad resonante que forma el FOPO. Además, el sistema comprende un elemento óptico selector de pulsos, entre las etapas de pre-amplificación y amplificación principal (o etapas amplificadoras).

El oscilador sintonizable (láser semilla) que bombea el FOPO es un sistema láser por bloqueo de modo que trabaja en el modo por bloqueo de modo de onda continua, y presenta una cavidad lineal que comprende: un espejo absorbente saturable 21 basado en semiconductor (SESAM, por sus siglas en inglés), un elemento polarizador 22 o controlador de la polarización 22 para la región de trabajo de la fibra dopada con iterbio, un multiplexor por división de longitud de onda 25 (WDM), un medio de ganancia consistente en una fibra dopada con iterbio 24, una fuente de bombeo 30 consistente en un diodo láser adaptada para activar al menos parte de la mencionada fibra dopada con iterbio y generar el láser semilla, un filtro óptico sintonizable 27 (filtro paso banda), un espejo de fibra óptica 28, un acoplador óptico 23 y un tramo de fibra estándar PM 26. Las etapas pre-amplificadoras y amplificadoras comprenden un diodo láser de bombeo, un WDM, y fibra dopada con iterbio. La etapa de generación paramétrica del FOPO está compuesta por un WDM, una línea de retardo basada en fibra, un retrorreflector de fibra, fibra PCF y un conector en fibra óptica para generar la salida del FOPO.

El diodo láser 30 emitiendo en 976 nm está conectado a un acoplador óptico 31 que entrega el 20% de la potencia total del diodo láser 30 al WDM 25. De esta manera, se alimenta por un lado el oscilador (figura 2A), y por otro lado la etapa de pre-amplificación (figura 2B). En la descripción general, el diodo láser se conecta al WDM por el puerto correspondiente a la longitud de onda de la propia fuente de bombeo. No obstante en este ejemplo, al existir etapa pre-amplificadora, se reducen los costes con esta implementación pues en lugar de incluir dos diodos láser (un diodo láser para el láser semilla y un diodo láser para la etapa pre-amplificadora), el sistema comprende un único láser que bombea ambas etapas, gracias a la distribución de la potencia por parte del acoplador óptico 31. En este ejemplo, el diodo láser presenta una potencia de 750 mW.

El diodo láser bombea una fibra dopada con iterbio 24 a través del WDM 25. La fibra dopada con iterbio 24 tiene una longitud de 1.1 m, y provee una ganancia óptica generada en la zona de luminiscencia del iterbio, lo que permite la excitación de una señal luminosa de emisión cuando la señal de bombeo viaje a través de la fibra activa un gran número de veces, gracias a la configuración de la cavidad láser, ya que será amplificada hasta llegar a sobrepasar las pérdidas de la cavidad. La fibra dopada con iterbio se sitúa tal que uno de los extremos de dicha fibra se encuentra conectado al puerto común del WDM 25.

El SESAM 21 es el encargado de dar el carácter pulsado a la fuente. Este componente pasivo posee unas características específicas para este oscilador, que permiten la generación de una señal láser pulsada con enganche de modo o de modo bloqueado. Las características del SESAM son: un coeficiente de absorción del 40%, una profundidad de modulación del 29%, una saturación de fluencia de $90 \mu\text{J}/\text{cm}^2$, una pérdidas no saturables del 11% y un tiempo de relajación de 9 ps. Mediante la absorción de la luz generada en la fibra activa, se produce la saturación del SESAM y la consecuente reflexión de dicha luz durante un periodo muy corto de unas decenas de picosegundos conocido como tiempo de relajación, emitiendo de esta manera un pulso que viaja por la cavidad en cada viaje de ida y vuelta. El elemento absorbente

saturable 21 se sitúa en la zona de la cavidad más alejada en referencia a la propagación de la luz emitida desde la fuente de bombeo 30.

5 El polarizador 22, permite acoplar la luz al eje lento de polarización, suprimiendo el campo óptico polarizado en el eje rápido y asegurando un régimen de operación estable a cambios ambientales (vibracionales y de temperatura) ante interacciones generadas entre modos transversales polarizados, lo que se traduce en una estabilización del funcionamiento en modo bloqueado de la fuente para toda la banda de sintonización de la misma. Además, el polarizador en línea 22 permite la
10 sintonización de la fuente en todo el rango de emisión a través del filtro óptico sin necesidad de utilizar un controlador de polarización para alcanzar el estado de modo bloqueado en cada longitud de onda, facilitando enormemente el funcionamiento de la fuente. Este elemento polarizador 22 se sitúa entre el puerto del WDM correspondiente a la zona de generación de ganancia del iterbio y el SESAM.

15 El láser semilla comprende un tramo de fibra PM 26 que actúa como línea retardadora para variar la tasa de repetición del oscilador fijándola en 3 MHz. Este tramo de fibra se conecta entre la fibra óptica dopada con iterbio 24 y el acoplador óptico 23 con un ratio 90/10 para dividir el total de la potencia óptica del diodo.

20 El acoplador óptico 23 está configurado para generar una salida para el láser semilla. El puerto con el mayor porcentaje de relación de acoplo (90%) se utiliza para realimentar la cavidad, mientras que el de menor relación de acoplo (10%) saca los pulsos del láser semilla.

25 El puerto de salida (10%) del láser semilla está conectado al puerto de entrada de un aislador óptico 29 con una relación de aislamiento de al menos 25 dB, para protegerlo de posibles reflexiones producidas en la etapa de amplificación. Como se acaba de comentar, el puerto común del acoplador óptico 23 se conecta al tramo de fibra PM 26.

30 De esta manera, el puerto que desacopla el mayor porcentaje de potencia (90%) se

conecta al siguiente elemento que conforma la cavidad, el circulador 28 (por el puerto 2).

5 Para la selección espectral de emisión de la fuente pulsada se utiliza un filtro óptico sintonizable 27 en la banda de interés, que permite fijar la longitud de onda de emisión y generar un láser semilla espectralmente muy estrecho (en torno a la centena de pm). Este filtro óptico 27 tiene una anchura de banda de sintonización de 40 nm entre 1020 y 1060 nm del espectro óptico, una anchura espectral de 0.1 nm y una resolución en longitud de onda de 0.02 nm, y se introduce en un espejo de fibra 10 óptica basado en un circulador 28 de banda ancha y sensible a la longitud de onda, retroalimentando la señal generada en la cavidad lineal.

El circulador 28 es de banda ancha (la banda del filtro óptico sintonizable 27) y con 15 bajas pérdidas de inserción. Para sacar el tren de pulsos del láser semilla con la calidad espectral y temporal adecuada, se debe generar una salida. Como ya hemos explicado anteriormente, se realiza a través del acoplador óptico 23 que se conecta a un aislador 20 óptico 29 de alta potencia, de al menos 30 dB de aislamiento, para proteger el oscilador de cualquier reflexión proveniente de las etapas amplificadoras y preservar el funcionamiento en modo bloqueado de la fuente, y por lo tanto, su carácter pulsado.

Las medidas experimentales a la salida del oscilador sintonizable son representadas 25 en las figuras 3-6. La figura 3 muestra las medidas experimentales de los espectros del láser semilla (desde 1025 nm hasta 1062.5 nm). Como se puede observar, el láser sintonizable emite en una banda cercana a los 40 nm, con unas bandas muy ecualizadas en potencia y una estabilidad del 0.2%. En la figura 4, se muestra la medida del espectro sintonizado en 1042.5 nm con una anchura espectral de 85 pm, lo cual es indicativo de la generación de una señal sintonizable de banda muy estrecha, ideal para el proceso de conversión en fibras PCF y su posterior aplicación 30 en microscopia CARS. La medida autocorrelada del pulso de la fuente emitiendo en 1042.5 nm se muestra en la figura 5, y como se puede ver, tiene una anchura

temporal de 25 ps, siendo nimias las variaciones temporales entre las distintas longitudes de onda de emisión. Por último, y para ilustrar la tasa de repetición del láser semilla, se aporta la medida de un tren de pulsos en la figura 6 donde se observa una tasa de repetición de 10 MHz, correspondiente a una separación temporal de pulsos de 100 ns.

La salida del aislador 29 (láser semilla) entrega un tren de pulsos con una potencia promedio que oscila entre 1.5 mW y 3.5 mW en función de la longitud de onda de emisión, y se conecta a una etapa pre-amplificadora mostrada en la figura 2B. Este pre-amplificador basado en fibra dopada con iterbio, permite pre-amplificar en pequeña señal los pulsos provenientes del láser semilla, y comprende una fibra dopada con iterbio 33, un WDM 32 y un diodo láser 30. La fibra dopada con iterbio 33 de 1.2 m de longitud es bombeada por el láser diodo 30 mediante el WDM 32 de alta potencia. Este diodo 30, como ya se ha especificado, está conectado a un acoplador óptico 31 con un ratio 80/20, siendo el ramal del 80% el que se conecta al WDM 30 de la etapa pre-amplificadora a través del puerto correspondiente.

La fibra dopada con iterbio 33 se conecta a un acoplador óptico 34 con un ratio 99/1, utilizado para llevar una referencia del tren de pulsos a un selector de pulso 35. Este selector de pulso 35, se sincroniza con el tren de pulsos proveniente del oscilador a través de la señal de referencia que llega del acoplador óptico 34 y permite escalar la tasa de repetición del láser desde 200 MHz (en este caso concreto, desde la tasa de repetición del láser semilla) hasta un mínimo de 200 KHz y cubre todo el rango de sintonización en longitud de onda del oscilador.

La salida del selector de pulso 35 se conecta a un acoplador óptico 37 con un ratio 99/1 para realizar la monitorización del estado del láser a través de un conector FC/PC 36, antes de llegar a la etapa amplificador principal y asegurar el correcto funcionamiento del mismo antes de realizar el proceso de conversión de frecuencia no lineal. En la figura 7 se muestra las medidas espectrales del oscilador pre-amplificado en todo el rango de sintonización utilizado en la conversión en

frecuencia, y en la figura 8 el espectro del láser semilla sintonizado en 1042.5 nm con una anchura espectral de 0.25 nm debido a la aparición de estructuras laterales por el SPM (auto-modulación de fase).

5 La salida del acoplador óptico 37 está conectada a un aislador 38 de alta potencia con una relación de aislamiento de más de 40 dB para el rango de sintonización de la semilla pre-amplificada, asegurando la protección de la configuración del láser ante reflexiones ópticas provenientes de la etapa amplificadora principal.

10 En la figura 2C, se muestra la etapa amplificadora principal. Una fibra dopada con iterbio 41 de longitud 0.6 m, es bombeada por un diodo láser 39 en 976 nm y con una potencia de 750 mW a través de un WDM 40 de alta potencia, para realizar la amplificación principal del láser semilla pre-amplificado y conseguir la potencia de pico necesario para realizar el proceso de generación paramétrica en la fibra micro-
15 estructurada. La salida del aislador 38 de la etapa pre-amplificadora, se conecta a la etapa amplificadora principal mediante un WDM 40. En esta etapa se consigue alcanzar una potencia promedio que varía entre 400-500 mW, lo que permite gracias al carácter pulsado de la fuente, alcanzar una potencia de pico que sobrepasa sin problemas las unidades de kW. Además, la capacidad de selección de la tasa de
20 repetición del láser semilla, permite aumentar esta potencia de pico en función de las fluctuaciones en potencia del espectro de emisión de la fuente sufridas en la conversión de ganancia de las fibras dopadas con iterbio.

25 En la figura 9 se muestra la medida experimental en escala lineal del espectro del láser semilla sintonizado en 1042.5 nm, a la salida de la etapa amplificadora principal (medida realizada a la salida de la fibra dopada con iterbio 41. Debido al efecto no-
lineal de SPM la aparición de las bandas laterales es mucho más notable, generando un ensanchamiento espectral propio en este tipo de configuración láser. La anchura espectral del láser sintonizable alcanza los 0.7-0.8 nm.

30

La etapa de generación óptico-paramétrica que comprende el FOPO se muestra en la figura 2D y comprende un WDM 45, una línea de retardo basada en fibra PM 44, un retroreflector de fibra óptica 43, una fibra PCF 46 y un conector FC 47.

5 La salida de la fibra dopada con iterbio 41 de la etapa amplificadora principal se conecta a un aislador de alta potencia 42 (equivalente al aislador óptico 12 de la descripción general) para evitar posibles reflexiones generadas en el oscilador paramétrico. El extremo del aislador se acopla a un WDM 45, y éste último, por un lado, se fusiona a una línea de retardo basada en fibra óptica 44 cuya longitud
10 determina una tasa de repetición múltiplo de la del láser semilla. En el extremo de la línea de retardo 44 se conecta un retroreflector de fibra 43 trabajando en la banda de interés que sirve como uno de los extremos de la cavidad del FOPO. Por otro lado, el WDM 45 se conecta a la fibra micro-estructurada 46 con una longitud de 0.8 m mediante un empalme por fusión que requiere un tratamiento específico para que se
15 produzcan unas pérdidas mínimas en la adaptación entre núcleos de ambas fibras, y para no colapsar los agujeros de aire que conforman la estructura de anillos de la fibra PCF 46. En el mejor de los casos, las pérdidas se encuentran en torno al 20-25%. El extremo de la fibra PCF 46 se conecta a un conector FC 47 que permite generar la salida del FOPO y además generar una cierta reflexión de las señales
20 generadas paramétricamente, posibilitando la recirculación de dichas señales y actuando como el otro extremo de la cavidad del FOPO.

En la figura 11 se muestra la generación paramétrica experimental del FOPO para una longitud de onda de 1032.5 nm de la componente de bombeo. Como se puede
25 observar aparecen dos señales frecuentemente equidistantes de la componente de bombeo (láser semilla) denominadas *signal* e *idler*. En la figura 12 se muestra la generación paramétrica experimental del espectro de la señal anti-Stokes o *signal* para diferentes longitudes de onda de emisión del láser semilla. Como aportación teórica a esta realización, en la figura 10 se ilustra la simulación del diagrama de
30 coincidencia de fase para la generación paramétrica de las señales *signal* e *idler* (anti-Stokes y Stokes) para una potencia de pico de 5 kW y los parámetros estructurales y

de dispersión de la fibra micro-estructurada 46. En este diagrama podemos observar la conversión no-lineal en frecuencia que se genera en el FOPO.

5 Como se puede observar en las medidas experimentales, la diferencia en potencia entre la señal del láser semilla (bombeo) y la *signal* generada no supera los 6 dB, lo cual indica una eficiencia de conversión muy alta gracias a la configuración y parámetros estructurales del FOPO. Las medidas en potencia a la salida del conector 47 indican una potencia para la señal anti-Stokes de entre 30-50 mW, y una potencia de la componente de bombeo de 150-200 mW, lo cual sobrepasa las necesidades para su aplicación en microscopía CARS, donde la potencia focalizada en la muestra no debe superar los 10 mW para cada componente. Además, debido a la duración de pulso en torno a los 20-25 ps, se asegura un solapamiento temporal de las señales generadas que permite una alta resolución de las imágenes CARS obtenidas.

10

REIVINDICACIONES

- 5 1. Oscilador óptico paramétrico sintonizable en fibra óptica configurado para generar paraméricamente en fibras de cristal fotónico, las señales necesarias para cubrir el espectro Raman (NIR) con la resolución espectral, y el solapado temporal y espacial requeridos en su aplicación a microscopía CARS, que comprende:
- Un oscilador pulsado sintonizable (láser semilla), que comprende a su vez:
- 10 - un absorbente saturable (1, 21) con una saturación de fluencia comprendida entre 30 uJ/cm^2 y 300 uJ/cm^2 , un tiempo de relajación comprendido entre 100 fs y 100 ps, un coeficiente de absorción comprendido entre un 5% y un 40% y una profundidad de modulación comprendida entre un 5% y un 50%;
- 15 - un elemento polarizador o controlador de la polarización (2, 22) para la región de trabajo de una fibra dopada con tierras raras (4, 24);
- un multiplexor por división de longitud de onda (5, 25) adaptado a las longitudes de onda utilizadas en el oscilador;
- Un medio de ganancia consistente en una fibra dopada con tierras raras (4, 24);
- 20 - Al menos una fuente de bombeo (6, 30) adaptada para activar al menos parte de la mencionada fibra dopada con tierras raras (4, 24) y generar el láser semilla, tal que dicha fuente de bombeo (6, 30) está conectada al multiplexor por división de longitud de onda (5, 25) por el puerto correspondiente a la longitud de onda de la propia fuente de bombeo (6, 30), y dicho multiplexor por división de longitud de onda (5, 25) debe estar comprendido entre el elemento absorbente saturable (1, 21) y la fibra dopada con tierras raras (4, 24);
- 25 - un filtro óptico sintonizable (7, 27) (filtro paso banda) configurado para seleccionar la longitud de onda de emisión del láser semilla;
- Un acoplador óptico (3, 23) configurado para realizar la salida del láser semilla por el puerto que desacopla menor potencia, utilizando el puerto con el mayor porcentaje de relación de acoplo para realimentar la cavidad del
- 30 láser semilla;

- Un aislador óptico (9, 29) conectado al puerto con menor relación de acoplo del acoplador óptico (3, 23), con una relación de aislamiento de al menos 25 dB;

5 - Un amplificador (11, C) formado por al menos una etapa amplificadora basada en fibra dopada con tierras raras, donde cada etapa comprende a su vez una fibra dopada con tierras raras (20, 41) bombeada por una fuente de bombeo (18, 39), tal que dicha fibra (20, 41) y la fuente de bombeo (18, 39) están conectadas entre sí a través de un multiplexor por división de longitud de onda (19, 40), y tal que la señal a amplificar, que proviene del láser semilla, se acopla al multiplexor por división de longitud de onda
10 (19, 40) del amplificador;

- Una etapa de generación paramétrica donde se produce la generación paramétrica de los fotones *signal* e *idler* que comprende un multiplexor de longitud de onda (15, 45) conectado a la salida del amplificador (11, C), tal que dicho multiplexor por división de longitud de onda (15, 45) se conecta por su puerto común al extremo de una fibra de cristal fotónico (16, 46), y tal que el otro extremo de dicha fibra (16, 46) se conecta a un conector (17, 47) que funciona como un espejo con una reflectancia mínima del 4%, y tal que el puerto restante del multiplexor de longitud de onda (15, 45) está conectado al extremo de una línea de retardo basada en fibra (14, 44) y el otro extremo de dicha línea
15 de retardo (14, 44) se encuentra conectado a un elemento reflector (13, 43) que permite reflejar las señales generadas paraméricamente con una reflectancia de al menos el 50%.

2. El oscilador óptico de la reivindicación anterior, donde el láser semilla sintonizable presenta una cavidad lineal, el absorbente saturable (1, 21) trabaja en reflexión, y que
25 comprende además un espejo de fibra óptica (8, 28) con una reflectancia de al menos el 50% dentro del cual se conecta el filtro óptico sintonizable (7, 27) tal que el absorbente saturable (1, 21), situado en el extremo opuesto de la cavidad, actúa como otro espejo funcionando en reflexión.

30 3. El oscilador óptico de la reivindicación 1, donde el láser semilla sintonizable presenta

una cavidad en anillo y el absorbente saturable (1, 21) trabaja en transmisión.

4. El oscilador óptico de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el láser semilla trabaja por bloqueo de modo de onda continua.

5

5. El oscilador óptico de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, tal que uno de los extremos de la fibra dopada con tierras raras (4, 24) se encuentra conectado al puerto común del multiplexor por división de longitud de onda (5, 25).

10

6. El oscilador óptico de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el láser semilla comprende además un tramo de fibra mantenedora de la polarización conectado entre la fibra óptica dopada con tierras raras (4, 24) y el acoplador óptico (3, 23).

15

7. El oscilador óptico de la reivindicación anterior, donde el puerto común del acoplador óptico (3, 23) se encuentra conectado al extremo de la fibra mantenedora de la polarización más alejado de la fuente de bombeo (6, 30), y el puerto que desacopla el mayor porcentaje de potencia se conecta al filtro óptico sintonizable (7, 27).

20

8. El oscilador óptico de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, donde el puerto común del acoplador óptico (3, 23) se encuentra conectado al extremo de la fibra óptica dopada con tierras raras (4, 24) más alejado de la fuente de bombeo (6, 30), y el puerto que desacopla el mayor porcentaje de potencia se conecta al filtro óptico sintonizable (7, 27).

25

9. El oscilador óptico de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el absorbente saturable (1, 21) se sitúa en la zona de la cavidad más alejada en referencia a la propagación de la luz emitida desde la fuente de bombeo (6, 30).

30

10. El oscilador óptico de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el elemento polarizador (2, 22) se sitúa antes del elemento absorbente saturable (1, 21), entendiendo este elemento como el más alejado en referencia a la propagación de la luz

emitida desde la fuente de bombeo (6, 30).

11. El oscilador de cualquiera de las reivindicaciones anteriores donde el filtro óptico sintonizable (7, 27) presenta una anchura espectral comprendida entre 50 pm y 380 pm y una anchura de banda de sintonización de al menos 30 nm

12. El oscilador óptico de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además un elemento óptico selector de pulsos (10, 35) configurado para variar la tasa de repetición del tren de pulsos proveniente del láser semilla, situado entre el amplificador (11, C) y el aislador óptico (9, 29).

13. El oscilador óptico de la reivindicación anterior, que comprende además una etapa de pre-amplificación (B) ubicada entre el elemento óptico selector de pulsos (10, 35) y el aislador óptico (9, 29).

14. El oscilador óptico de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además un aislador óptico (12, 42) cuya entrada se encuentra conectada a la salida del amplificador (11, C) y cuya salida se encuentra conectada a la entrada del multiplexor de longitud de onda (15, 45) de la etapa de generación paramétrica, configurado para proteger las etapas de amplificación y el láser semilla de las posibles reflexiones generadas en la etapa de generación paramétrica.

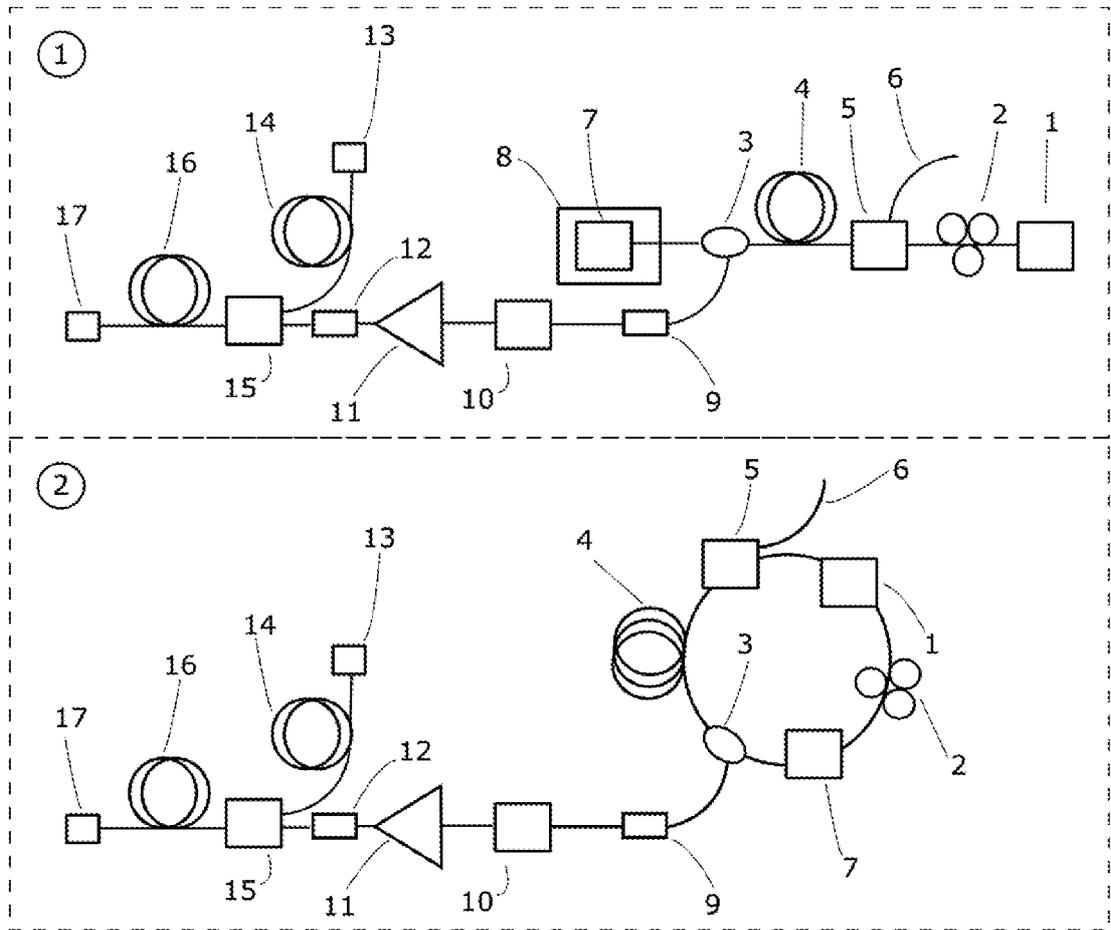


Figura 1A

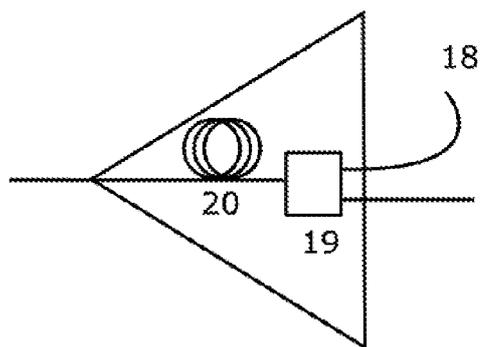


Figura 1B

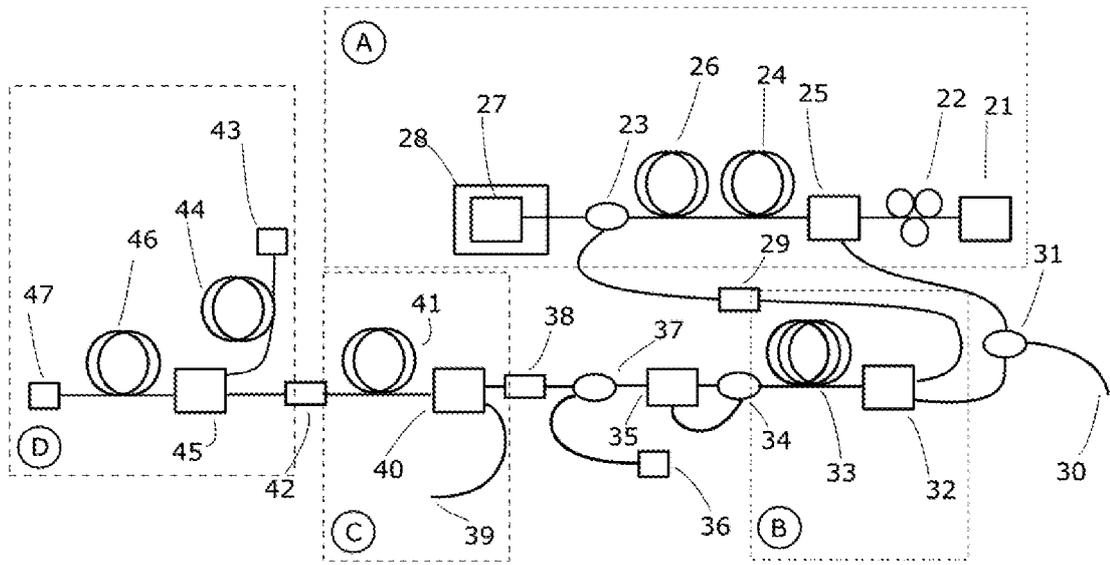


Figura 2

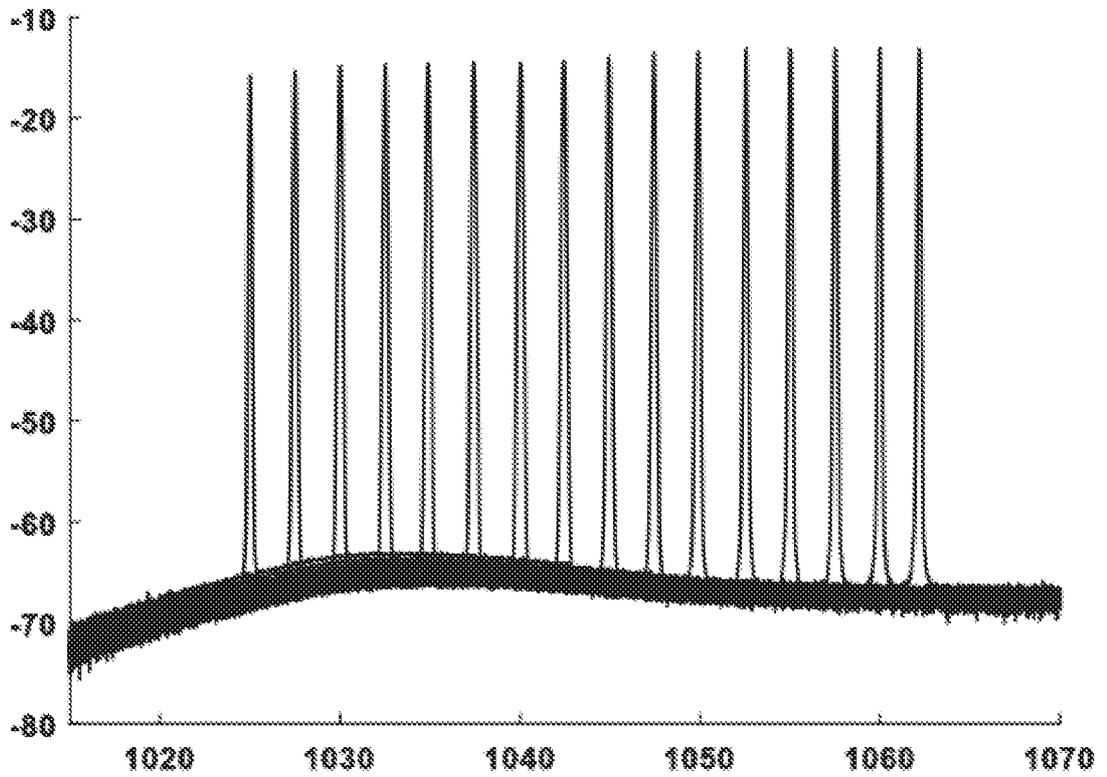


Figura 3

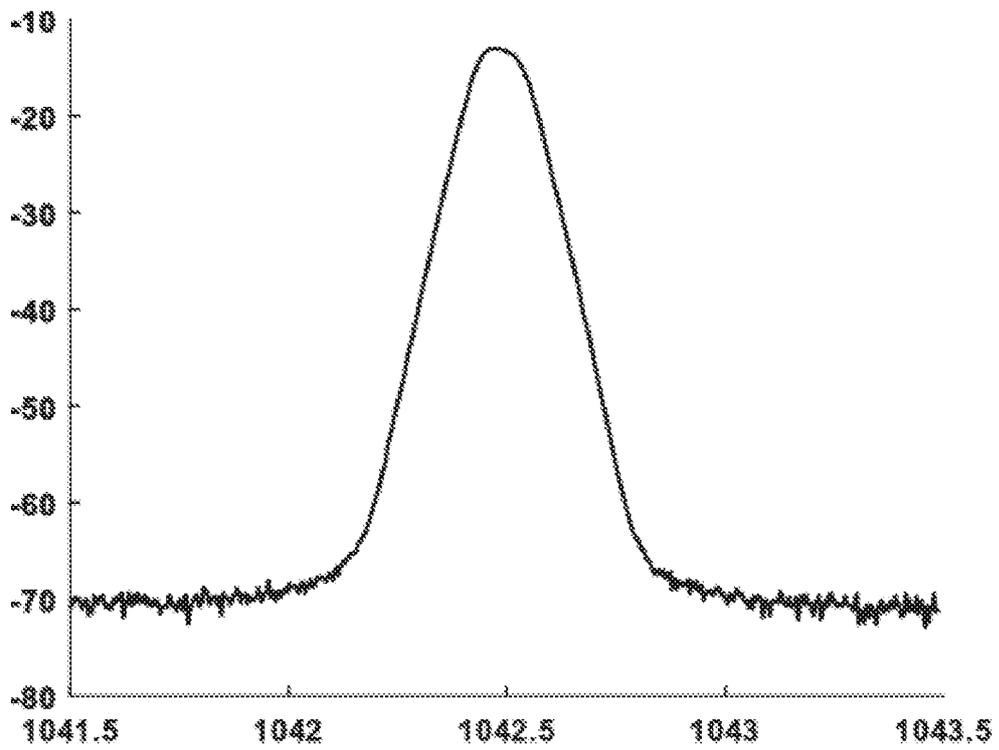


Figura 4

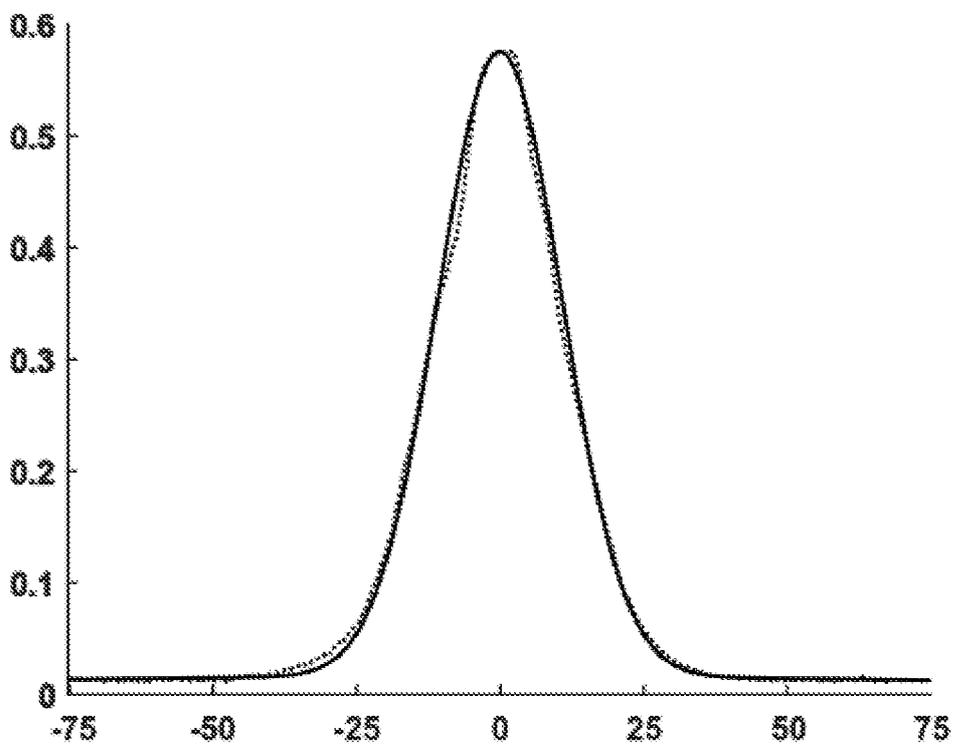


Figura 5

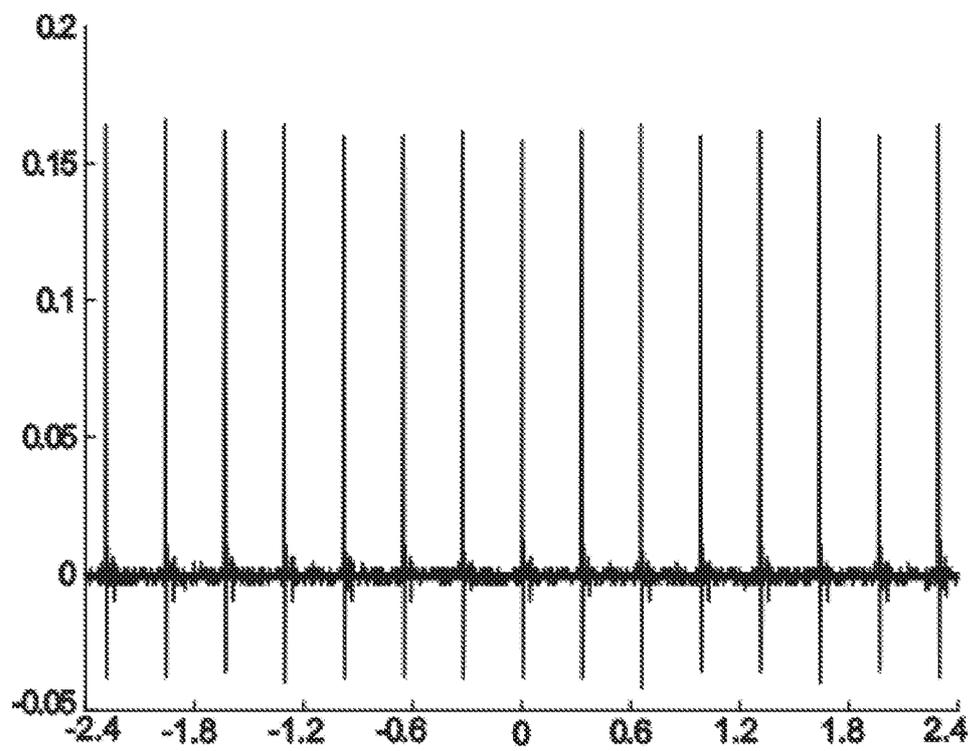


Figura 6

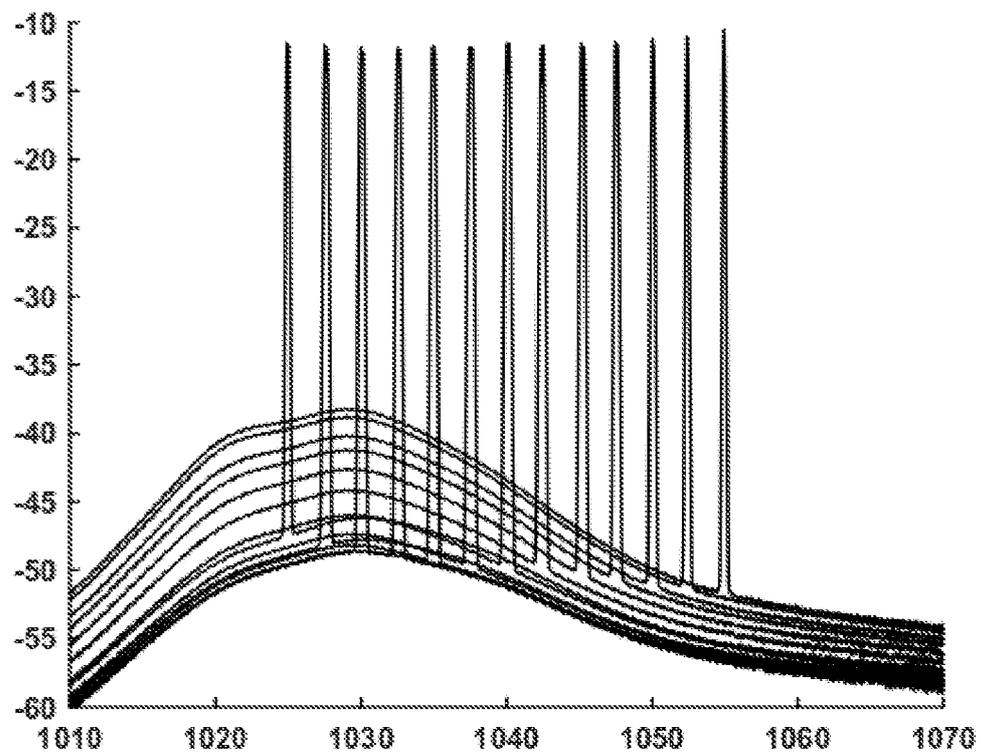


Figura 7

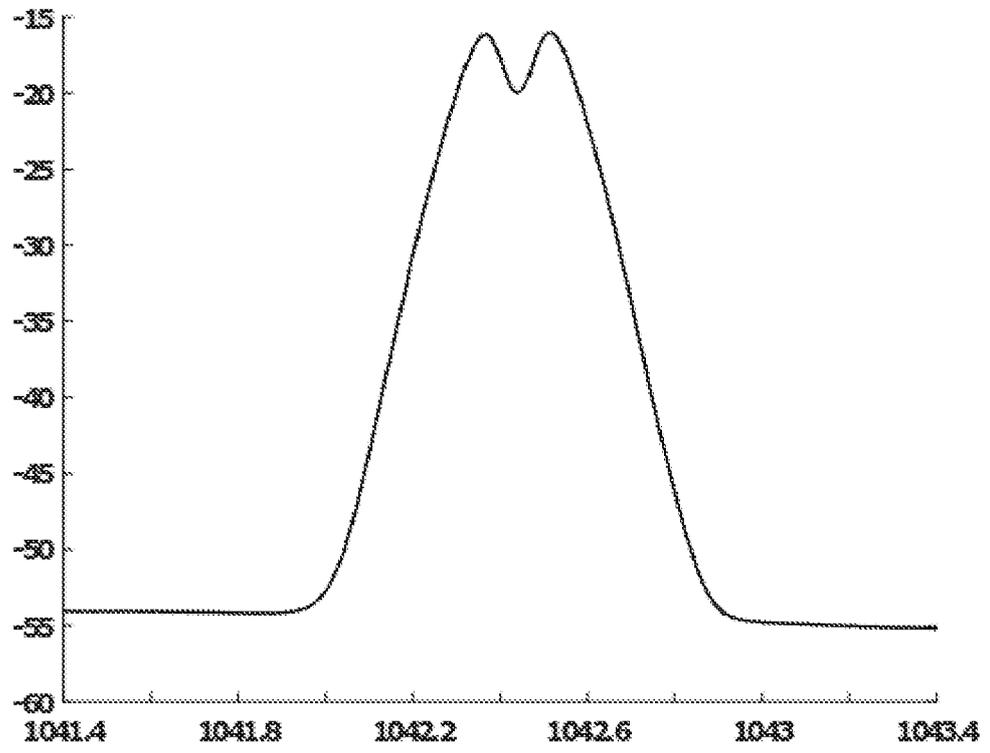


Figura 8

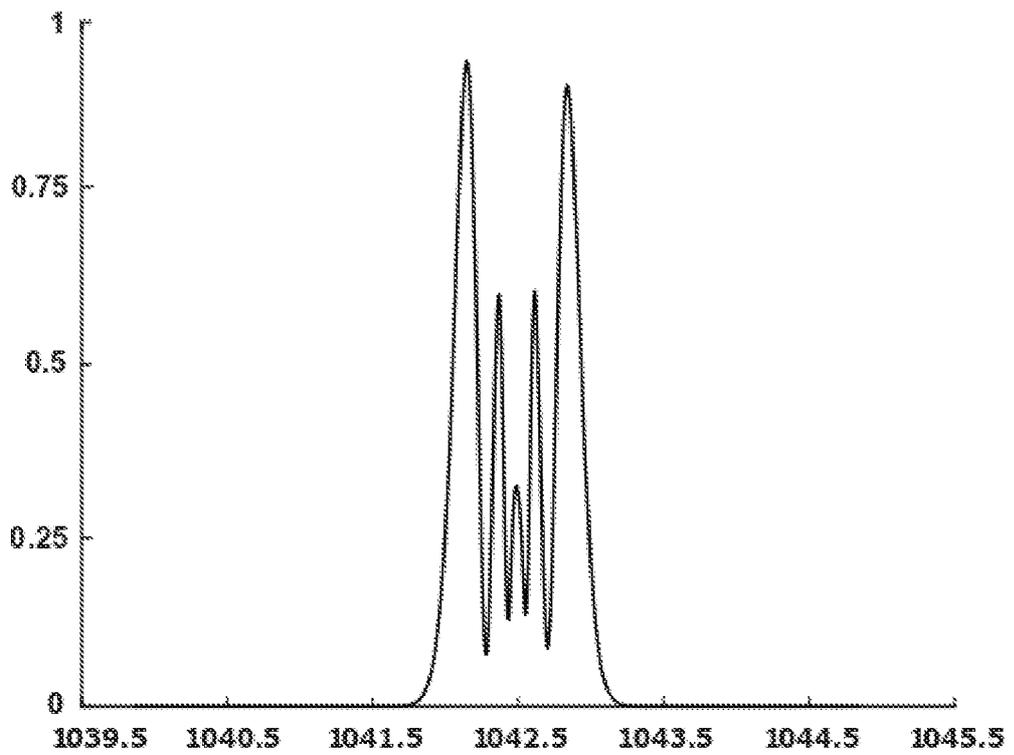


Figura 9

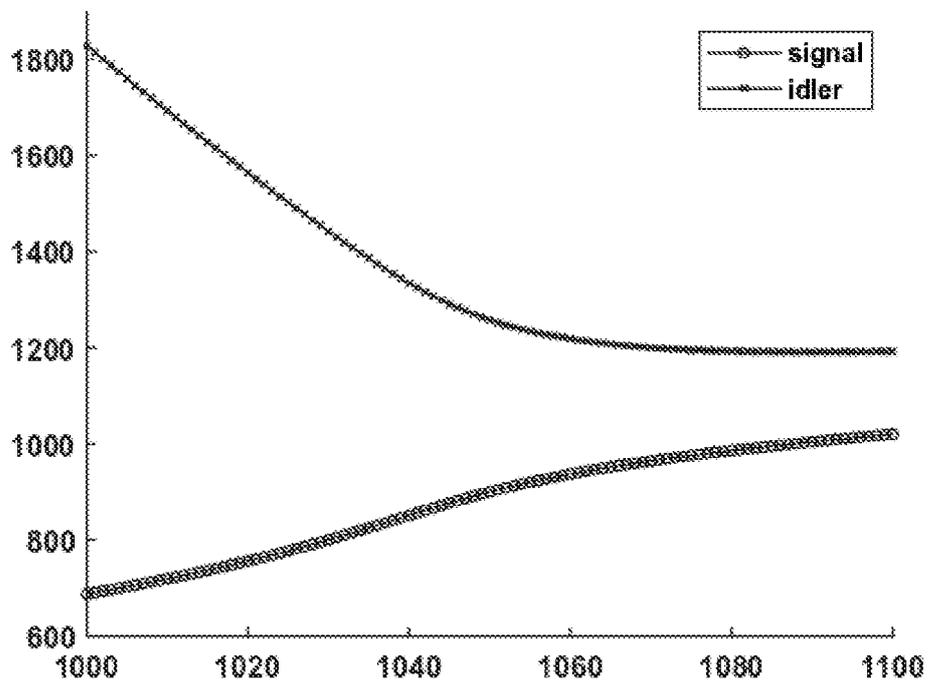


Figura 10

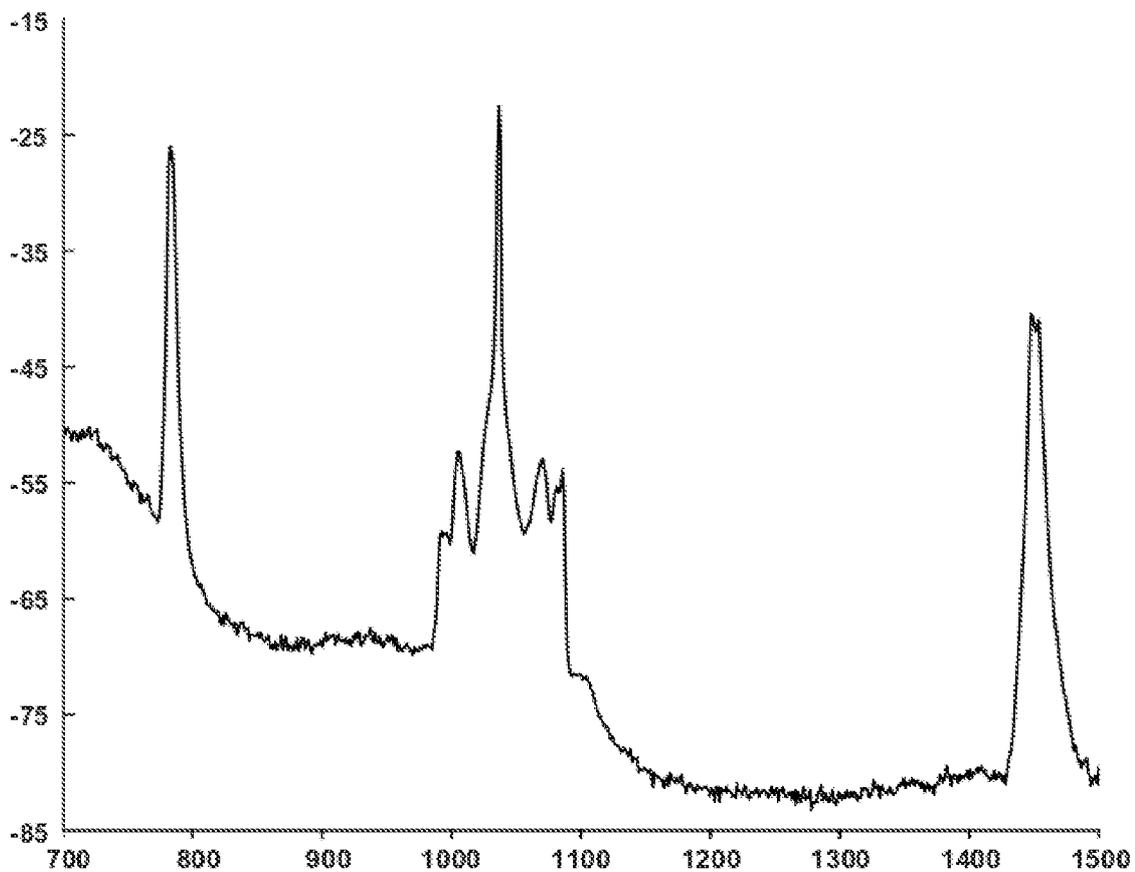


Figura 11

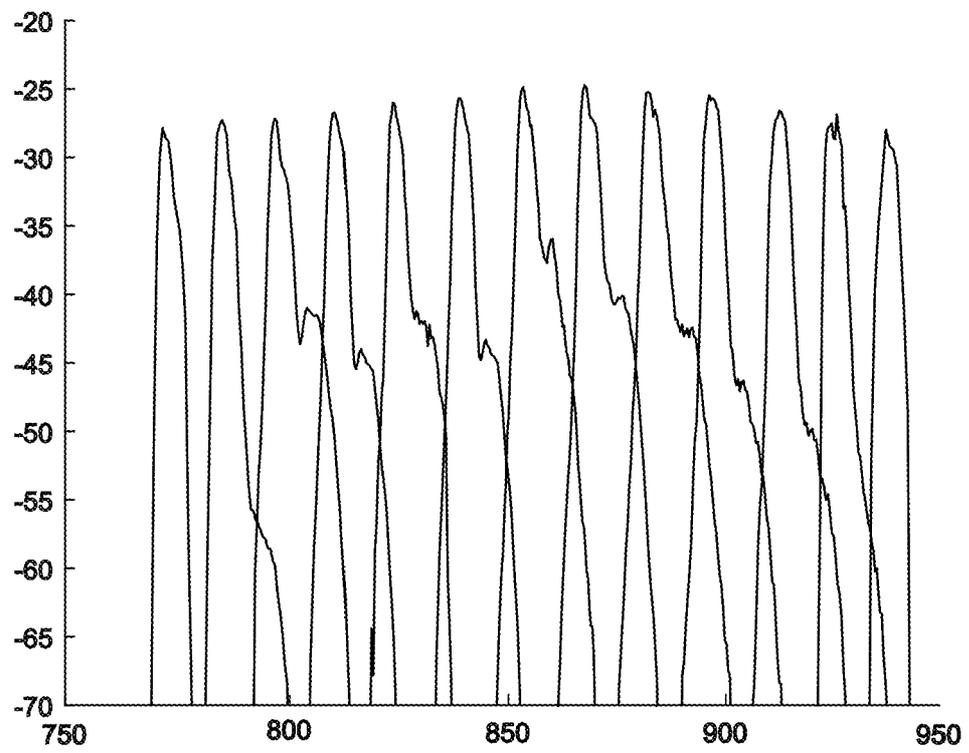


Figura 12