

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 801 949**

21 Número de solicitud: 201930623

51 Int. Cl.:

**H01S 3/00** (2006.01)

**H01S 3/10** (2006.01)

**H01S 3/11** (2006.01)

**H01S 3/30** (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN

B2

22 Fecha de presentación:

**04.07.2019**

43 Fecha de publicación de la solicitud:

**14.01.2021**

Fecha de modificación de las reivindicaciones:

**08.03.2022**

Fecha de concesión:

**06.07.2022**

45 Fecha de publicación de la concesión:

**13.07.2022**

73 Titular/es:

**CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES  
CIENTÍFICAS (100.0%)  
C/ Serrano,117  
28006 Madrid (Madrid) ES**

72 Inventor/es:

**ANIA CASTAÑÓN, Juan Diego y  
GALLAZZI, Francesca**

74 Agente/Representante:

**GALLEGO JIMÉNEZ, José Fernando**

54 Título: **SISTEMA Y PROCEDIMIENTO DE GENERACIÓN DE PULSOS ULTRACORTOS DE ALTA POTENCIA EN LÁSERES**

57 Resumen:

Sistema (1) y procedimiento de generación de pulsos ultracortos destinado a insertarse en un láser (10) de anillo con un regulador (7) de una señal pulsada de una cierta intensidad, comprendiendo el sistema (1) un atenuador óptico (2) que permite ajustar la intensidad de la señal pulsada a la entrada de un tramo de guía óptica (3), y un dispositivo de amplificación distribuida insertado en la guía óptica (3) que permiten gestionar la potencia de la señal en esta, de manera que se propague como solitones o como pulsos autosimilares sin sufrir distorsiones indeseadas a pesar del incremento de longitud de la cavidad del láser, aumentando la potencia de la señal pulsada y permitiendo superar los límites de potencia habituales de este tipo de láser (10).

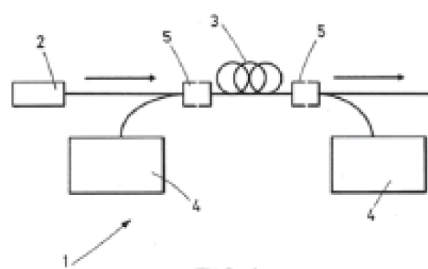


FIG.1

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 41 LP 24/2015.  
Dentro de los seis meses siguientes a la publicación de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial cualquier persona podrá oponerse a la concesión. La oposición deberá dirigirse a la OEPM en escrito motivado y previo pago de la tasa correspondiente (art. 43 LP 24/2015).

ES 2 801 949 B2

**DESCRIPCIÓN**

**SISTEMA Y PROCEDIMIENTO DE GENERACIÓN DE PULSOS ULTRACORTOS DE ALTA POTENCIA EN LÁSERES**

5

**OBJETO DE LA INVENCION**

El objeto principal de la presente invención es un sistema y procedimiento de generación de pulsos ultracortos de alta potencia en láseres. El sistema está basado en el incremento de longitud de la cavidad o anillo láser y el uso de amplificación distribuida.

10

**ANTECEDENTES DE LA INVENCION**

En la actualidad existen numerosas aplicaciones para las fuentes de radiación ultrarrápidas, como el procesado de materiales, las telecomunicaciones o las tomografías. Esto ha supuesto el desarrollo de un gran número de investigaciones relacionadas con este campo.

15

Entre las distintas opciones presentes para la implementación de fuentes ultrarrápidas, destacan aquellas basadas en el anclado en modos. Un láser anclado en modos utiliza alguna técnica activa, por ejemplo un el uso de moduladores, o pasiva, como el uso de absorbentes saturables, para forzar un régimen en el cual se emite una secuencia de pulsos ultracortos espaciados de forma regular.

20

Este tipo de configuración puede implementarse, por ejemplo, en sistemas láser de fibra óptica que emplean una configuración de anillo, lo que permite la producción de pulsos muy cortos, especialmente con anclado en modos pasivo.

25

De entre las posibles configuraciones para la implementación de un absorbente saturable en el dispositivo láser, una simple y eficiente es la de usar un espejo absorbente saturable semiconductor. Se han propuesto a lo largo del tiempo distintos materiales y estructuras como absorbentes, como por ejemplo grafeno, nanotubos de carbono, nanopartículas de oro, fósforo negro o aislantes topológicos, entre otros.

30

35

Los láseres de fibra combinan estabilidad, eficiencia, compacidad e integración sencilla, precisan de un mantenimiento mínimo y permiten la manipulación del haz de salida, lo que los hace atractivos para una gran variedad de aplicaciones.

5 A pesar de las ventajas que presentan, la utilización de láseres ultrarrápidos de fibra de anclado en modos está todavía restringida a ciertas áreas, principalmente debido a la energía de pulso y potencia de pico alcanzadas, que están limitadas en la práctica. Esta limitación obstaculiza su utilización en el procesado de materiales o aplicaciones industriales que requieren de la utilización de potencias muy elevadas. Por ello en este tipo de aplicaciones se emplean normalmente láseres de estado sólido.

10 La manera más directa de incrementar la energía de pulso de los láseres de fibra anclados en modos es aumentar la longitud de la cavidad, pero el resultado habitual de este procedimiento es el incremento de la anchura temporal de la señal hasta el rango de los nanosegundos, debido a los efectos dispersivos.

15 Aunque ha habido desarrollos recientes de láseres de fibra pasivos anclados en modos capaces de alcanzar potencias de pico del orden de los megavatios a partir del uso de fibras de cristal fotónico, este objetivo parece inalcanzable utilizando fibra de comunicación de bajo coste convencional.

## DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

25 El objeto de la presente invención es un sistema y procedimiento de generación de pulsos ultracortos de alta potencia en láseres con configuración en anillo preferentemente, de utilización en aplicaciones como el procesado de materiales, generación de supercontinuo, sensado de gases atmosféricos u otras aplicaciones que puedan beneficiarse de la elevada potencia de los pulsos.

30 El sistema comprende una serie de componentes destinados a insertarse en un láser, preferentemente de anillo, que comprende un regulador de una señal pulsada de una cierta intensidad, siendo el regulador seleccionado entre un modulador o un absorbente saturable, logrando el sistema la generación de pulsos ultracortos de alta potencia en dicho láser de anillo.

35

5 En un láser anclado en modos la energía contenida en el pulso depende directamente de la longitud del anillo o la cavidad del láser sin incrementar el número de pulsos presentes simultáneamente en la cavidad, con lo cual una manera aparentemente sencilla de alcanzar pulsos altamente energéticos podría ser utilizar cavidades de gran longitud.

10 Sin embargo, esto en general no resulta posible, puesto que en una cavidad demasiado larga los pulsos propagados se distorsionan debido a efectos dispersivos y no lineales, estos últimos dependientes de la intensidad de la señal.

15 Una forma de controlar o incluso evitar esta distorsión consiste en utilizar un tipo de pulso determinado, los pulsos solitónicos o solitones. Los solitones son un tipo de onda solitaria que se propaga sin deformarse en un medio no lineal. Esta propagación sin deformación es debida a que en los solitones los efectos dispersivos y los no lineales se compensan el uno al otro, permitiendo su propagación sin distorsión a través de un medio no lineal.

20 Otra forma de ejercer control sobre esta distorsión para producir deformaciones controladas en el pulso consiste en utilizar determinadas combinaciones de efectos dispersivos y no lineales que dan lugar a la formación de pulsos denominados autosimilares, como por ejemplo los llamados pulsos parabólicos que, si bien se ensanchan temporalmente, son susceptibles de compresión a la salida del láser.

25 No obstante, la utilización de solitones o pulsos autosimilares plantea otro problema, puesto que la transmisión de los mismos requiere de la eliminación o incluso sobrecompensación local de las pérdidas, algo que resulta aparentemente inalcanzable para distancias largas, como las que son necesarias para lograr pulsos altamente energéticos, como se ha indicado anteriormente.

30 Para solventar este problema se han planteado en los últimos años soluciones para mantener la potencia del pulso transmitido a lo largo de la fibra mediante la amplificación de efecto Raman, utilizando un sistema de gestión de la ganancia basado en dicha amplificación. Esto se ha demostrado, por ejemplo, que permite la transmisión de solitones en distancias largas sin pérdidas ni distorsiones, como se  
35 puede comprobar en la publicación *"Long-distance soliton transmission through*

*ultralong fiber lasers*" de M. Alcon-Camas, A. E. El-TaHER, H. Wang, P. Harper, V. Karalekas, J. A. Harrison, y J.-D. Ania-Castañón, Opt. Lett. 34, 3104-3106, 2009.

5 El sistema objeto de la invención, utilizando los conceptos anteriores, permite ejercer un mayor control sobre la distribución espacial de la intensidad, los efectos no lineales y las características dispersivas de la señal en el interior del láser, pudiendo generar señales pulsadas de alta potencia con un coste y complejidad inferiores a los sistemas existentes.

10 Para ello el sistema, que se inserta en el láser a continuación del regulador, comprende un tramo de guía óptica (por ejemplo, un tramo de fibra óptica) insertado en el anillo o cavidad del láser, de forma que la longitud total del mismo se vea incrementada.

15 Para que la señal pulsada introducida en ese tramo de guía óptica satisfaga el necesario equilibrio entre duración y potencia que permita generar una señal generadora de pulsos autosimilares, el sistema comprende también un atenuador óptico que permite ajustar la intensidad de la señal pulsada para que esta adquiera las características necesarias antes de propagarse por la guía óptica.

20 En distintas realizaciones de la invención, la señal pulsada puede ser de tipo solitónico, o algún tipo de pulso auto-similar, por ejemplo pulsos parabólicos o triangulares.

25 Por último, y para que el tramo de guía óptica, cuya longitud puede variar desde los cientos de metros hasta los cientos de kilómetros, permita la formación y propagación controlada de solitones o pulsos autosimilares, el sistema comprende un dispositivo de gestión de la ganancia, como por ejemplo un dispositivo de amplificación distribuida mediante efecto Raman, insertado en la guía óptica, que permita controlar la  
30 intensidad de la señal a lo largo de la guía óptica.

Este dispositivo de amplificación puede ser un sistema similar al descrito en la publicación "*Long-distance soliton transmission through ultralong fiber lasers*", mencionada anteriormente, o cualquier otro sistema de amplificación distribuida. A la  
35 salida de este tramo de guía óptica amplificado se puede añadir un segundo atenuador

para reducir, si fuera necesario, la potencia del pulso antes de continuar su recorrido por el láser de anillo.

5 Con el uso de pulsos solitónicos se logra incrementar la longitud del anillo o la cavidad del láser sin que exista un impacto negativo sobre la forma y duración de los pulsos de la señal del láser. Es decir, los pulsos, que pueden ir desde los nanosegundos hasta los attosegundos, se propagan por anillos de longitud incrementada sin aumentar su duración, de manera que ven igualmente incrementada su energía.

10 En relación al procedimiento de generación de pulsos ultracortos de alta potencia en láseres, hace uso del sistema descrito anteriormente, y comprende una primera etapa de determinación de la duración y energía de la señal pulsada del láser, para conocer los pulsos de partida con los que se va a trabajar.

15 A continuación, se estima la intensidad que debe alcanzar la señal pulsada para que se transmita como una señal generadora de solitones o pulsos autosimilares, y se selecciona el tipo de guía óptica necesaria para que la señal sea generadora de solitones o pulsos autosimilares.

20 Después, se ajusta la intensidad de la señal pulsada en el atenuador óptico para que coincida con la necesaria para que entre a la guía óptica como señal generadora de solitones o pulsos autosimilares, y se trasmite por dicha guía óptica.

25 Dentro de la guía óptica se utiliza la amplificación distribuida para controlar la intensidad de la señal mediante el dispositivo de amplificación distribuida. Por último, se extrae parte de la señal pulsada ultracorta generada en el láser. A partir de esta señal es posible ajustar con más precisión el sistema de amplificación distribuida hasta lograr la generación de pulsos con las características deseadas.

30 En el caso de que la señal pulsada sea de tipo solitónico, el tramo de guía óptica deberá tener las adecuadas características dispersivas para soportar la transmisión de solitones, y el sistema de amplificación deberá limitar la variación de la intensidad de la señal con la distancia recorrida para mantener las condiciones de transmisión de solitón.

Con otro tipo de pulso auto-similar, las características dispersivas requeridas de la guía pueden ser diferentes y el sistema de amplificación distribuida ofrecer un cambio monótono de la intensidad con la distancia.

5 En todos los casos, el ajuste de la intensidad de la señal en el atenuador óptico depende de las características dispersivas y no lineales de la guía óptica, y la etapa de selección del tipo de guía óptica comprende también la determinación de la longitud de esta.

10 De esta forma, a partir del sistema y procedimiento descritos, se logran superar los inconvenientes de limitación de potencia anteriormente planteados con un sistema compacto, flexible, fiable y de bajo coste, que se puede utilizar en aplicaciones que requieran pulsos estrechos con elevada potencia y energía.

## 15 **DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS**

Para complementar la descripción que se está realizando y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica de la misma, se acompaña como parte integrante de dicha descripción, un juego de dibujos en donde con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

20 Figura 1.- Muestra una primera realización del sistema de generación de pulsos ultracortos de alta energía.

25 Figura 2.- Muestra una realización del sistema insertado en un láser de anillo.

Figura 3.- Perfil experimental de autocorrelación temporal y espectro de frecuencias de los pulsos obtenidos en un láser de fibra de anillo de femtosegundo con la realización preferente de la invención.

30

## **REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCION**

A la vista de las figuras descritas anteriormente, se puede observar un ejemplo de realización del sistema (1) de generación de pulsos ultracortos de alta energía, destinado a insertarse en un láser (10) de anillo que comprende un regulador (7) de

35

una señal pulsada de una cierta intensidad, insertándose el sistema (1) a continuación del regulador (7).

5 El sistema (1), que se muestra en la figura 1, comprende un atenuador óptico (2), que permite ajustar la intensidad de la señal antes de que esta se introduzca en un tramo de guía óptica (3) largo, posicionado a continuación del atenuador óptico (2), por el que se transmite la señal.

10 El tramo de guía (3) es una fibra de longitud comprendida entre los cientos de metros y los kilómetros, en función de la energía de la señal pulsada que se quiere conseguir. El atenuador óptico (2) ajusta la intensidad de la señal pulsada a la entrada de la guía óptica (3), que lleva integrado un dispositivo de amplificación distribuida basado en efecto Raman, que permite gestionar la intensidad de la señal a lo largo de su propagación, permitiendo que la señal pulsada se transmita por la misma como solitones o pulsos autosimilares sin distorsiones indeseadas.

15 El dispositivo de amplificación comprende uno o más láseres de onda continua (4) posicionados en uno o ambos extremos de la guía óptica (3), que introducen una señal a las longitudes de onda requeridas para producir amplificación Raman, a la guía óptica (3) desde uno o ambos extremos.

20 El dispositivo de amplificación puede comprender también un número variable de reflectores (5), que pueden estar basados en redes de difracción inscritas en fibra, y que, de ser incluidos, se sitúan entre los láseres de onda continua (4) y la guía óptica. El sentido de propagación de la luz en la figura 1 viene indicado por las flechas.

25 Como se refleja en la figura 2, el sistema (1) se inserta o conecta en un láser (10) pulsado de configuración de anillo que comprende así mismo un dispositivo de amplificación (6), un absorbente saturable (7) o modulador que actúa como generador de una señal pulsada, y que puede operar en configuración de transmisión o espejo, y que permite la formación de una señal pulsada ultracorta que se propagará por un segundo tramo de guía óptica (8) que conecta todos los componentes del láser y en el que se inserta el sistema (1) propuesto.

30 El láser (10) comprende también un divisor de señal (9), que permite la extracción de parte de la señal generada en el láser (10) mientras el resto continúa circulando por el



interior del anillo del láser (10). El sentido de circulación de la luz en la figura 2 viene indicado por las flechas.

5 Este láser (10) pulsado puede comprender además multitud de componentes adicionales, incluyendo, pero sin estar limitado a: conectores, aisladores, polarizadores, filtros de frecuencia, redes de difracción, sistemas de ensanchamiento, amplificación y compresión de la señal (chirped-pulse-amplification), sin que la presencia de dichos componentes afecte al sistema (1) propuesto, mostrado en la figura 1.

10

En la figura 3 se muestra el perfil experimental de autocorrelación temporal y espectro de frecuencias de los pulsos obtenidos en un láser de fibra de anillo de femtosegundo con la realización preferente de la invención, añadiendo un tramo de fibra de 10 km y un sistema de amplificación Raman distribuido similar al descrito en la publicación "*Long-distance soliton transmission through ultralong fiber lasers*".

15

En línea discontinua, ajustes numéricos que muestran que las características de un pulso de la señal pulsada obtenida son similares a las de un solitón. La potencia de pico del pulso es superior a 0.6 MW y la duración del mismo de unos 350 fs, muy por encima de lo hasta ahora alcanzable por un sistema de láser de anillo de fibra convencional sin un sistema de amplificación externo.

20

Por otra parte, el procedimiento de generación de pulsos ultracortos de alta potencia en láseres, hace uso del sistema (1) descrito anteriormente, y comprende una primera etapa de determinación de la duración y energía de la señal pulsada del láser (10), para conocer con qué tipo de señal se va a trabajar.

25

A continuación, se estima la intensidad que debe alcanzar la señal pulsada para que se transmita como solitones, y se selecciona, asimismo, el tipo de guía óptica (3) necesaria para que la señal pulsada sea de tipo solitónica.

30

La etapa siguiente consiste en el ajuste de la intensidad de la señal pulsada en el atenuador óptico (2) para que coincida con la necesaria para que entren a la guía óptica (3) señal pulsada solitónica. Una vez ajustada la intensidad se transmite la señal por la guía óptica (3).

35

Dentro de la guía óptica, mediante el dispositivo de amplificación distribuida, se utiliza la amplificación Raman de la señal para controlar su intensidad. Por último, se extrae parte de la señal pulsada ultracorta generada en el láser (10) para su utilización.

5

**REIVINDICACIONES**

- 5 1.- Sistema (1) de generación de pulsos ultracortos de alta potencia en láseres, destinado a insertarse en un láser (10) que comprende un regulador (7) de una señal pulsada, seleccionado entre un modulador o un absorbente saturable, insertándose el sistema (1) en el láser (10) a continuación del regulador (7) y estando caracterizado por que comprende:
- 10 - un atenuador óptico (2), que permite ajustar la intensidad de la señal pulsada, procedente del regulador (7), de modo que sea próxima a la de un pulso generador de pulsos solitónicos o autosimilares,
- 15 - una guía óptica (3) por la que se transmite la señal, posicionada a continuación del atenuador óptico (2) e insertada en una cavidad del láser (10), de forma que la longitud total del mismo se vea incrementada, y
- un dispositivo de amplificación distribuida, insertado en la guía óptica (3), que regula la intensidad de la señal que se propaga por la guía óptica (3).
- 20 2.- El sistema (1) de la reivindicación 1, en el que la señal pulsada es de tipo solitónico.
- 3.- El sistema (1) de la reivindicación 1, en el que la señal pulsada es parabólica.
- 4.- El sistema (1) de la reivindicación 1, en el que la señal pulsada es triangular.
- 25 5.- El sistema (1) de la reivindicación 1 en el que el láser (10) es un láser de anillo.
- 30 6.- El sistema (1) de la reivindicación 1 en el que la guía óptica (3) es una fibra óptica.
- 7.- El sistema (1) de la reivindicación 1 en el que el dispositivo de amplificación es un dispositivo de amplificación distribuida basado en efecto Raman.
- 35 8.- El sistema (1) de la reivindicación 7, en el que el dispositivo de amplificación distribuida basado en efecto Raman comprende al menos un láser de onda continua (4) posicionado en un extremo de la guía óptica (3), que introduce una señal en el interior de dicha guía óptica (3), y que opera a las longitudes de onda requeridas para producir amplificación Raman.
- 40 9.- El sistema (1) de la reivindicación 7, en el que los láseres de onda continua (4) introducen la señal desde ambos extremos de la guía óptica (3).
- 45 10.- El sistema (1) de la reivindicación 8, que comprende adicionalmente al menos un reflector (5) posicionado entre alguno de los láseres de onda continua (4) y la guía óptica (3).
- 50 11.- El sistema (1) de la reivindicación 1, en el que la guía óptica (3) es de una longitud comprendida entre los cientos de metros y los cientos de kilómetros.

12.- Procedimiento de generación de pulsos ultracortos de alta potencia en láseres, que hace uso del sistema (1) de la reivindicación 1, el sistema (1) estando insertado en la cavidad del láser (10), caracterizado por que comprende las etapas de:

- 5           - determinación de la duración y energía de la formada señal pulsada del láser (10), la formación de dicha señal pulsada estando permitida por el regulador (7) que precede al sistema (1) en el láser (10),
- 10          - estimación de la intensidad que debe alcanzar la señal pulsada para que sea una señal generadora de pulsos solitónicos o autosimilares,
- selección del tipo de guía óptica (3) necesaria para que la señal sea generadora de pulsos solitónicos o autosimilares,
- 15          - ajuste de la intensidad de la señal en el atenuador óptico (2) para que coincida con la necesaria para que entre a la guía óptica (3) como una señal generadora de pulsos solitónicos o autosimilares,
- transmisión de la señal por la guía óptica (3),
- 20          - amplificación Raman de la señal en la guía óptica (3) con el dispositivo de amplificación distribuida, y
- extracción de parte de la señal pulsada ultracorta generada en el láser (10).
- 25

13.- El procedimiento de la reivindicación 12, en el que la señal pulsada es de tipo solitónica.

- 30          14.- El procedimiento de la reivindicación 12, en el que la señal pulsada es parabólica o triangular, y en el que la etapa de ajuste de la intensidad de la señal en el atenuador óptico (2) comprende adicionalmente el ajuste de la amplitud de la señal para que la intensidad de la señal sea constante.

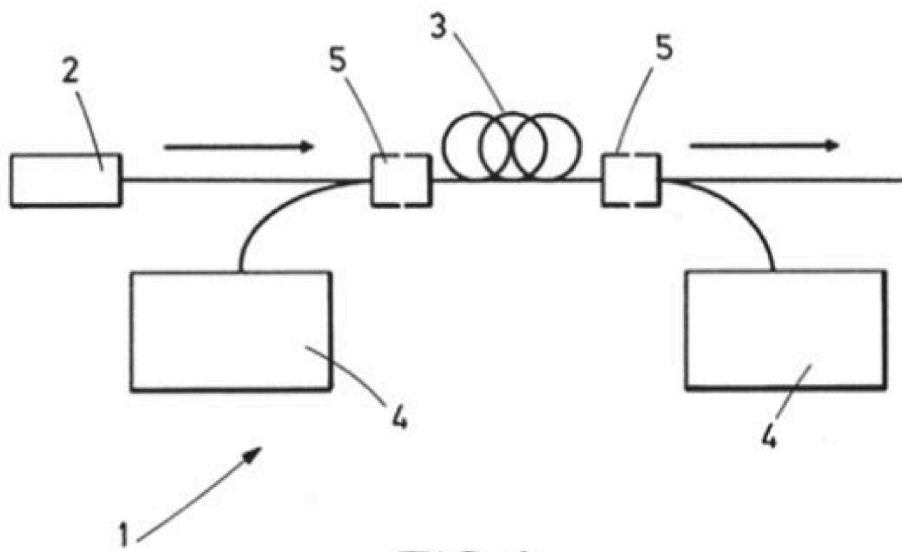


FIG.1

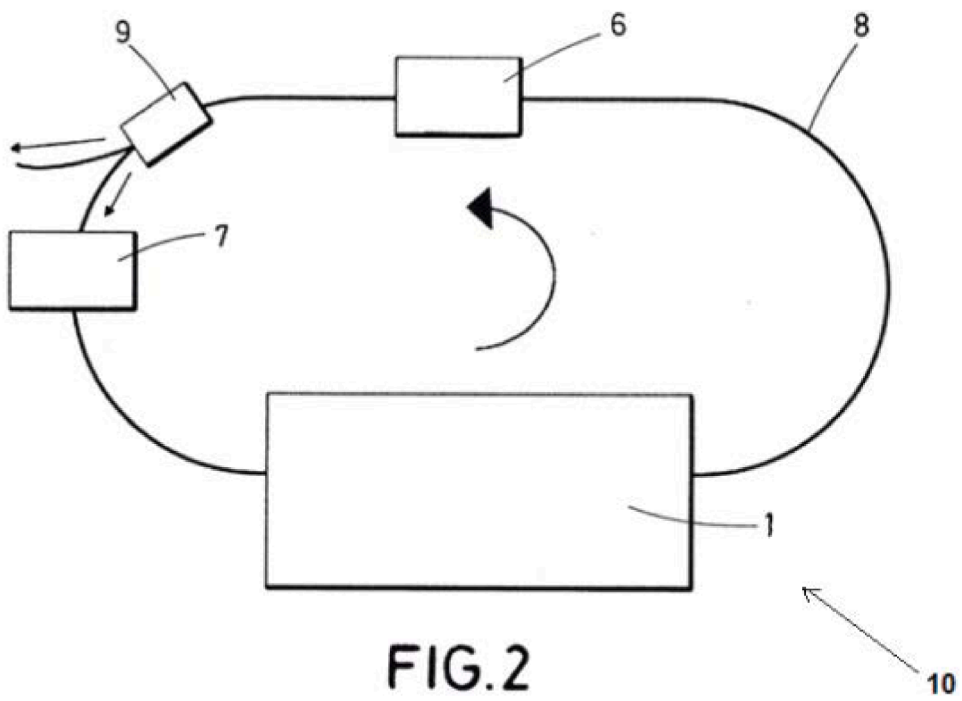
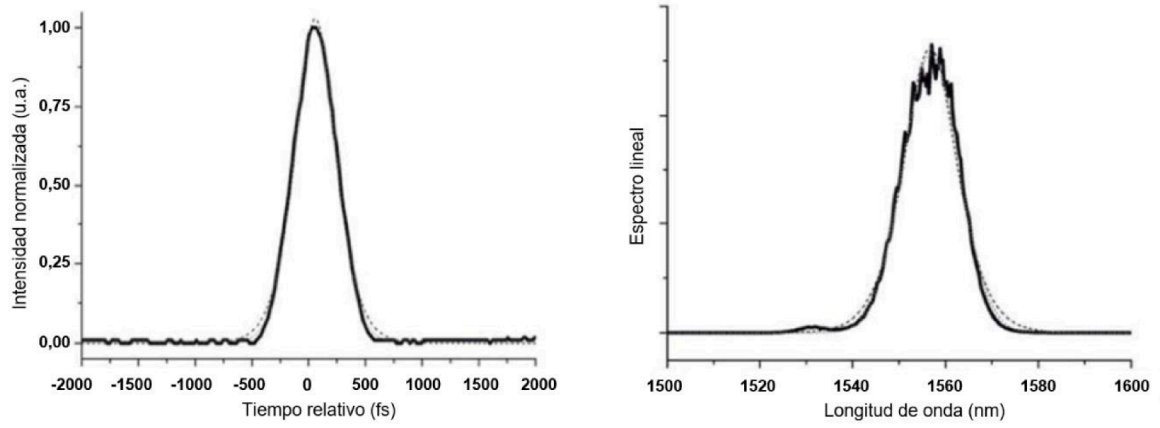


FIG.2



**FIG. 3**