

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 968 458**

51 Int. Cl.:

H01S 3/00 (2006.01)

G02F 1/383 (2006.01)

H01S 3/067 (2006.01)

H01S 3/16 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **25.04.2019** **E 19382313 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.12.2023** **EP 3731352**

54 Título: **Un sistema y método de configuración de todo fibras para generar una emisión pulsada de supercontinuo temporalmente coherente**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
09.05.2024

73 Titular/es:

FYLA LASER, S.L. (100.0%)
Ronda Guglielmo Marconi, 14, Parque
Tecnológico
46980 Paterna (Valencia), ES

72 Inventor/es:

PÉREZ MILLÁN, PERE;
TORRES PEIRÓ, SALVADOR y
MUÑOZ MARCO, HÉCTOR

74 Agente/Representante:

GONZÁLEZ POVEDA, Sara

ES 2 968 458 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Un sistema y método de configuración de todo fibras para generar una emisión pulsada de supercontinuo temporalmente coherente

5

Campo técnico

La presente invención se refiere, en general, a sistemas y métodos de fibra óptica. En concreto, la invención se refiere a un sistema de configuración de todo fibras y a un método para generar una emisión pulsada de supercontinuo temporalmente coherente.

10

Antecedentes de la invención

Los láseres supercontinuos (SC) emiten espectros de banda ultra ancha en pulsos cortos de altos índices de repetición. Así, los láseres supercontinuos son, en principio, una fuente ideal para la microscopía de imágenes de por vida de fluorescencia (FLIM) y la microscopía de excitación multifotónica (MPE). Los espectros de SC más ensanchados (hasta 400 a 2500 nm empleando fibras de SiO₂) se generan bombeando fibras ópticas microestructuradas (MOF) altamente no lineales, también conocidas como fibras de cristal fotónico (PCF), con pulsos de femtosegundos o picosegundos en el régimen de dispersión anómala de la velocidad de grupo (GVD) de la PCF, cerca de la longitud de onda de dispersión cero (ZDW). En este caso, el ensanchamiento espectral está dominado por efectos de solitón donde los solitones de orden superior se descomponen en una serie de solitones fundamentales. A continuación, cada solitón fundamental se desplaza hacia Raman, hasta una longitud de onda más larga. Este mecanismo de ensanchamiento produce un perfil de pulso temporal complejo, falta de planitud espectral, aumento del ruido y baja coherencia a través del ancho de banda debido a las fluctuaciones en la fase e intensidad relativas. En estas condiciones, los pulsos generados son inútiles para aplicaciones que requieren alta coherencia temporal, por ejemplo, microscopía multifotónica eficiente avanzada.

15

20

25

No obstante, en los últimos años, la investigación sobre la generación de supercontinuos ha descubierto nuevos enfoques exitosos para superar la falta de coherencia de los pulsos supercontinuos, obteniendo pulsos de pocos ciclos de muy alta calidad: al bombear cerca de la parte superior aplanada de las curvas de dispersión convexas de las PCF de dispersión totalmente normal (ANDi) (cuya dispersión se encuentra por completo en la región de dispersión normal), aparece un ensanchamiento espectral debido a la acción de la automodulación de fase (SPM). De esta manera, se puede generar un supercontinuo de parte superior plana y muy coherente, preservando un único pulso compresible en el dominio temporal.

30

35

Las pruebas de concepto de este tipo de enfoque se han demostrado en los últimos años [1-3]. Aun así, todo el sistema que comprende el láser de bomba más PCF de ANDi más la gestión de compresión de pulsos resulta complejo, frágil y sensible a las variaciones ambientales, costoso y con muy baja eficiencia.

40

En los sistemas del estado de la técnica [1-3], la PCF de ANDi se bombea usando un láser de alta potencia (láser Ti-Sa de estado sólido, láseres OPO o MOPA de pulsos ya cortos de decenas a cientos de femtosegundos).

45

La luz de bombeo se lanza a la PCF de ANDi después de una configuración óptica de espacio libre de compensación previa de enfoque y/o dispersión compleja. En este proceso, se desperdicia una gran cantidad de energía (normalmente > 95 %). A diferencia de la técnica anterior, véase la figura 1, tal bombeo de luz en la presente invención es monolítico, lo que significa que la salida del láser de bombeo se acopla mediante empalme directo o transición de fibra a la PCF de ANDi. Esto disminuye enormemente (hasta 2 órdenes de magnitud) la potencia requerida del láser de bombeo para obtener el mismo resultado en la salida de la PCF de ANDi. En consecuencia, surgen consecuencias importantes respecto al coste, sencillez, robustez y ahorro de energía de la fuente de semillas de láser de fibra.

50

Además, uno de los principales intereses de las fuentes ópticas de todo fibras es el hecho de que la señal permanezca confinada en el núcleo de las fibras en cada fase/sección de la estructura de la fuente y también en las transiciones entre fases/secciones. Evitar la propagación en el espacio libre entre fases confiere una robustez inigualable a los láseres de todo fibras, ya que las vibraciones mecánicas o las fluctuaciones ambientales (temperatura, presión y humedad) no sesgan la desalineación de la luz entre las fases de la fuente.

55

Sin embargo, ninguna de las configuraciones actuales del estado de la técnica de generación de supercontinuo temporalmente coherente que emplean PCF de ANDi es una configuración de todo fibras. Por un lado, en [2 y 3] la fase de semilla (o fase de bombeo) del láser no está basada en fibra, sino que está elaborada con tecnología de óptica de espacio libre: por ejemplo, láseres de cristales de Ti-zafiro, osciladores paramétricos ópticos (OPO) o amplificadores paramétricos ópticos (OPA). Por otro lado, en [1], la fase de semilla es un láser de fibra, pero el acoplamiento de la luz a la PCF de ANDi se realiza con óptica de espacio libre.

60

También se conocen algunas patentes y/o solicitudes de patente en el sector. Por ejemplo, el documento US 9553421-B2 se refiere a fuentes de pulso ultracorto compactas y de poco ruido basadas en amplificadores de fibra y a las diversas aplicaciones de las mismas. Al menos una implementación incluye un sistema de amplificación óptica que tiene una fuente de semilla de láser de fibra que produce pulsos de semilla a un índice de repetición correspondiente

65

al tiempo de ida y vuelta en la cavidad del láser de fibra. Un transformador de pulsos no lineal, que comprende una longitud de fibra superior a aproximadamente 10 m, recibe un pulso de semilla en su entrada y produce un pulso de salida espectralmente ensanchado en su salida, teniendo el pulso de salida un ancho de banda espectral que es más de 1,5 veces el ancho de banda espectral de un pulso semilla. Un amplificador de potencia de fibra recibe y amplifica los pulsos de salida espectralmente ensanchados. Un compresor de pulsos está configurado para comprimir temporalmente los pulsos espectralmente ensanchados amplificados por dicho amplificador de potencia. Las aplicaciones incluyen micromecanizado, oftalmología, desorción o ionización molecular, espectroscopia de masas y/o procesamiento biológico de tejidos basado en láser. A diferencia de la presente invención, en este sistema de amplificación óptica de PCF de ANDi no se incluyen ni se realiza una fase de compresión basada en fibras antes de una fase de ensanchamiento espectral del pulso.

El documento US 2012/281720 A1 describe una fuente de supercontinuo, que comprende una fuente láser basada en fibra que genera pulsos ópticos cortos y una guía de ondas no lineal que está dispuesta para recibir pulsos desde dicha fuente basada en fibra y generar un supercontinuo. El documento US 2012/281720 A1 describe un ejemplo en donde un oscilador Yb está configurado con una cavidad de Fabry-Perot y está limitado por un espejo absorbente saturable; la salida del oscilador Yb se estira en una fibra de compensación de dispersión y se amplifica adicionalmente en una fibra Yb de doble revestimiento; los pulsos amplificados se comprimen en un compresor de rejilla dual con rejillas de difracción en masa.

Un artículo [5] de Xiaomin Liu *et al.* describe un láser que consiste en un oscilador de modo bloqueado, dos preamplificadores, un amplificador de potencia principal y una fibra de cristal fotónico de núcleo hueco empalmada, en la que los pulsos de salida se comprimen hasta cientos de femtosegundos de duración.

Un artículo [6] de Chunlei Huang *et al.* describe una fibra microestructurada totalmente sólida que posee un perfil de dispersión totalmente normal ultraplano, y también describe un espectro supercontinuo que se genera numéricamente en la fibra a 1,55 μm ; una duración de pulso limitada por Fourier del espectro es 3,19 fs; el artículo [6] de Chunlei Huang *et al.* describe un experimento sobre la generación de SC con la fibra, en donde el haz de salida de un láser de bombeo se acopló en la fibra con una lente asférica.

Un artículo [7] de W. Qi *et al.* describe una investigación teórica de una fibra óptica microestructurada que tiene una dispersión anómala a 1550 nm para la generación de supercontinuo coherente; el documento también describe que se puede realizar un proceso de ahusamiento de fibra.

El documento US 8971358-B2 divulga fuentes de luz de supercontinuo, coherentes y compactas para el régimen espectral de IR medio. La generación de supercontinuo se basa en el uso de fibras o guías de onda altamente no lineales. En al menos una realización, la coherencia de las fuentes de supercontinuo se aumenta usando fuentes de pulsos cortos bloqueadas en modo de poco ruido. Las fuentes de luz de supercontinuo compactas se pueden construir con el uso de láseres de fibra o diodo bloqueados en modo pasivo. Las fuentes sintonizables de longitud de onda pueden construirse empleando filtros ópticos apropiados o secciones de conversión de frecuencia. Las fuentes de supercontinuo altamente coherentes facilitan adicionalmente esquemas de detección coherentes y pueden mejorar la relación señal/ruido en esquemas de detección de bloqueo. Al contrario que la presente invención, el diseño propuesto por este documento de la técnica anterior es para longitudes de onda centrales > 1700 nm, incluye propagación en el espacio libre en la estructura de la fuente de pulsos cortos y no genera pulsos con una coherencia temporal, de modo que puedan comprimirse hasta el ancho de pulso límite de la transformada de Fourier correspondiente a su ancho de banda espectral.

El documento US 9341920-B1 proporciona un convertidor de longitud de onda que incluye un divisor de haz que divide un haz láser pulsado a una longitud de onda λ_p en una primera porción de pulso de mayor potencia y en una segunda porción de pulso de baja potencia. Un generador de supercontinuo (SC) de fibra se acopla para recibir la segunda porción de pulso, que convierte la segunda porción de pulso en un pulso de SC que tiene un ancho de banda de >100 nm que incluye una porción espectral estrecha en la longitud de onda λ_s . Se incluye un amplificador paramétrico óptico (OPA) que tiene un material polarizado periódicamente con dominios dispuestos para proporcionar adaptación cuasifásica para amplificación en λ_s y bombeo en λ_p . La llegada de la porción de pulso de SC a λ_s y la primera porción de pulso en el OPA se sincronizan para solaparse en el tiempo. El OPA es sembrado por la porción de pulso de SC en λ_s y es bombeado por la primera porción de pulso para proporcionar una semilla de OPA amplificada en λ_s . A diferencia de la presente invención, esta solución no es un esquema de todo fibras.

Otros sistemas ópticos se conocen gracias a los documentos US 2012033686-A1, US 9590381-B2, US9986904-B2 y US 9825419-B2.

Por lo tanto, a pesar de todas estas soluciones de la técnica anterior, hasta ahora, no se ha propuesto una solución completa de todo fibras para obtener un supercontinuo temporalmente coherente de femtosegundos empleando varias PCF de ANDi (también denominadas fibras microestructuradas de ANDi). Resulta complicado principalmente por las siguientes razones:

por un lado, para generar un ensanchamiento espectral temporalmente coherente en una fibra PFC de ANDi por el efecto no lineal de la SPM, los pulsos de entrada a la fibra ANDi tienen que presentar una potencia pico muy alta (normalmente > 15 kW para una fibra de ANDi de 20 cm de longitud y diámetro de núcleo de 2,6 μm). Para conseguir

pulsos de entrada tan intensos con una potencia promedio moderada (normalmente de menos de 1 W, ya que las potencias promedio superiores a ~ 1 W inducen un daño térmico irreversible en la fibra ANDi), su ancho temporal tiene que ser ya muy corto (normalmente < 250 fs). Los OPO, láseres de Ti:zafiro o MOPA, con arquitecturas de generación de láser basadas en una configuración de espacio libre, producen naturalmente pulsos de este tipo. Por el contrario, para una arquitectura de láser de todo fibras resulta un desafío ofrecer pulsos con estas propiedades para enviarlos a una fibra de ANDi, pues la luz está completamente confinada en los núcleos de las fibras, cuyos diámetros de núcleo normalmente son inferiores a 10 μm. Las potencias máximas de >15 kW dentro de las fibras de guía de diámetros de núcleo de 10 μm producen intensidades de >15 GW/cm² que están por encima del umbral de muchos efectos no lineales no deseados que distorsionan los pulsos láser que se propagan en el interior y, en concreto, destruyen la coherencia temporal del pulso láser. La presente invención divulga configuraciones específicas de láser de todo fibras que resuelven este problema y proporcionan pulsos de potencia máxima, habitualmente, de >15 kW y ancho de pulso <250 fs, manteniendo la coherencia temporal, para emplearlas como fuentes de excitación de las PCF de ANDi.

Por otro lado, es relativamente fácil enfocar los pulsos de salida desde un OPO, láser de Ti:zafiro o MOPA en una configuración de espacio libre en la entrada de una fibra PCF de ANDi [2, 3]. Por el contrario, enviar la salida del láser de excitación a través de una fibra hasta la entrada de la fibra de ANDi es complejo, principalmente por 2 razones:

1. En una transición de fibra óptica estándar desde una salida de láser de excitación determinada hasta la entrada de una PCF de ANDi de diámetro de núcleo tan pequeño como 2,6 μm, las potencias pico de >15 kW generan efectos no lineales no deseados (espectrales y temporales) en la transición de la fibra que destruyen la coherencia temporal del pulso, que no se puede recuperar después.

2. Dado que las potencias pico requeridas para la generación de SPM eficiente en la PCF de ANDi son muy altas (normalmente >15 kW), se requiere un acoplamiento de energía eficiente desde la salida del láser de excitación hasta la PCF para evitar daños térmicos en la transición de la fibra. El acoplamiento de energía en una transición de fibra estándar o empalme de diámetros de núcleo grandes a pequeños resulta ineficaz. Los diámetros de núcleo habituales de las fibras amplificadoras usadas para alcanzar altas potencias pico en la salida de un láser de excitación están en el intervalo de 6-10 μm. Más del 90 % de la potencia se pierde en una transición o empalme estándar desde dicha fibra hasta una fibra PCF de ANDi. En consecuencia, la potencia requerida en la salida del láser de excitación es al menos un orden de magnitud mayor que la potencia requerida en la entrada de la fibra PCF de ANDi. Tales potencias (>150 kW) sobrepasan el umbral de daño térmico de la transición o empalme de las fibras, por lo tanto, la transición es inviable.

Descripción de la invención

Para resolver los inconvenientes citados de la técnica anterior, la presente invención proporciona, de acuerdo con un primer aspecto, un sistema de configuración de todo fibras para generar una emisión pulsada de supercontinuo temporalmente coherente, como se define en la reivindicación independiente 1, y un método de generación correspondiente, como se define en la reivindicación independiente 11. Las realizaciones preferidas se definen en las reivindicaciones dependientes. El sistema propuesto comprende una estructura secuencial de secciones de todo fibras acopladas a través de empalmes de fibras fusionadas, incluyendo, en el siguiente orden:

- una fuente de semilla de láser de fibra configurada para producir un pulso de semilla con propiedades ópticas determinadas que incluye un ancho de banda espectral que corresponde a un ancho de pulso temporal limitado por transformada de Fourier de 1 picosegundo o menos en anchura a media altura (FWHM);
- una sección de estiramiento, que incluye una fibra óptica, configurada para estirar temporalmente el pulso de semilla;
- una sección de amplificación, que incluye una fibra óptica activa, dopada con un elemento de tierras raras, configurada para amplificar el pulso estirado estimulando progresivamente la radiación de los iones activos de la fibra óptica activa dopada;
- una sección de compresión configurada para comprimir temporalmente el pulso amplificado; y
- una sección de ensanchamiento espectral que incluye una fibra microestructurada de dispersión totalmente normal (ANDi) monomodo que ensancha espectralmente el pulso comprimido mediante un efecto no lineal de automodulación de fase (SPM), mientras conserva la coherencia temporal del pulso, de modo que el pulso en una salida de la sección de ensanchamiento espectral tiene un ancho de banda espectral a FWHM de 60 nanómetros o más, y es comprimible hasta un ancho de pulso temporal correspondiente al límite de Fourier de su ancho de banda espectral.

Así, se propone una configuración de todo fibras que resuelve los inconvenientes de la técnica anterior, administrando pulsos de una potencia máxima de, habitualmente, >15 kW y un ancho de pulso <250 fs que conserva la coherencia temporal, para emplearla como fuente de excitación de fibras microestructuradas de ANDi.

La sección de compresión y la sección de ensanchamiento espectral se acoplan a través de una transición de fibras que tiene un número de piezas de fibras de diferentes tamaños de campo de modo fundamental, diseñadas para proporcionar una eficiencia de acoplamiento de potencia total entre la sección de compresión y la sección de ensanchamiento espectral superior al 60 %.

La fibra microestructurada de ANDi tiene una longitud de 1 metro o menos y dispersión de retardo de grupo (GDD) y

una dispersión de velocidad de grupo (GVD) normales. En concreto, la GVD es inferior a 0 ps/nm/km y superior a -30 ps/nm/km en todo el intervalo de longitudes de onda comprendido en los ± 150 nm de una longitud de onda central de emisión de la fuente de semilla de láser de fibra. La intensidad máxima en una entrada de la fibra microestructurada de ANDi es igual o mayor que 60 GW/cm².

5 En concreto, la potencia promedio en una salida de la sección de amplificación es igual o mayor que 0,3 W y la potencia promedio en la salida de la sección de ensanchamiento espectral es igual o mayor que 100 mW.

10 En una realización, la sección de estiramiento también incluye un combinador de fibras fusionadas configurado para recibir adicionalmente luz de un diodo láser y lanzar la luz recibida a la sección de amplificación. En este caso, la fibra óptica de la sección de estiramiento es una fibra óptica monomodo que tiene una GDD normal. Además, el elemento de tierras raras comprende iterbio, de modo que la fibra activa dopada sea una fibra activa dopada con iterbio. Este último tiene una GDD normal.

15 Así mismo, la sección de compresión incluye una fibra microestructurada de núcleo hueco con una GDD anómala.

20 En otra realización, la fibra óptica de la sección de estiramiento es una fibra microestructurada de núcleo hueco con una GDD anómala. En este caso, el sistema comprende además un combinador de fibras fusionadas configurado para recibir adicionalmente luz de un diodo láser y lanzar la luz recibida a la fibra óptica activa dopada; preferentemente una fibra activa dopada con iterbio con una GDD normal. De acuerdo con esta realización, tanto la sección de compresión como la sección de amplificación las proporciona dicha fibra óptica activa dopada con iterbio.

25 En una realización específica, todas las fibras ópticas de las secciones de todo fibras son fibras que conservan la polarización.

El sistema propuesto puede incluir además un aislador de fibras colocado entre al menos dos de las secciones de todo fibras.

30 En otra realización más, la fuente de semilla de láser de fibra es un láser de fibra en modo bloqueado. El láser puede configurarse para producir un pulso de disparo único o varios pulsos de semilla a un índice de repetición en el intervalo de 1 Hz a 10 GHz.

35 La presente invención también proporciona, de acuerdo con un segundo aspecto, un método para generar una emisión pulsada de supercontinuo temporalmente coherente, como se define en la reivindicación independiente 11, comprendiendo el método las siguientes etapas:

40 proporcionar un sistema de todo fibras acoplando una estructura secuencial de secciones de todo fibras a través de empalmes de fibras fusionadas, produciendo, mediante una fuente de semilla de láser de fibra de dicha estructura secuencial, al menos un pulso de semilla con propiedades ópticas determinadas que incluye un ancho de banda espectral que corresponde a un ancho de pulso limitado por transformada de Fourier de 1 picosegundo o inferior a FWHM; estirar temporalmente el pulso de semilla mediante una sección de estiramiento de dicha estructura secuencial, incluyendo dicha sección de estiramiento una fibra óptica; amplificar, con una sección de amplificación de la estructura secuencial, el pulso estirado estimulando progresivamente la radiación de los iones activos de una fibra óptica activa, dopada con un elemento de tierras raras e incluida en dicha sección de amplificación; comprimir temporalmente el pulso amplificado mediante una sección de compresión de la estructura secuencial; y ensanchar espectralmente, mediante una sección de ensanchamiento de espectro que incluye una fibra microestructurada de ANDi monomodo, el pulso comprimido por un efecto no lineal de la SPM, mientras conserva la coherencia temporal del pulso, de modo que el pulso en una salida de la sección de ensanchamiento espectral tiene un ancho de banda espectral a FWHM de 60 nanómetros o más, y es comprimible hasta un ancho de pulso temporal correspondiente al límite de Fourier de su ancho de banda espectral.

55 En una realización, la amplificación del pulso estirado se realiza independientemente de la compresión del pulso. Por lo tanto, la compresión de pulsos en este caso se realiza a través de una fibra microestructurada de núcleo hueco que tiene una GDD anómala. La fibra óptica activa dopada comprende una fibra activa dopada con iterbio que tiene una GDD normal.

En otra realización, tanto la amplificación como la compresión temporal del pulso se realizan a través de dicha fibra activa dopada, siendo esta última una fibra activa dopada con iterbio que tiene una GDD normal.

60 De acuerdo con el método propuesto, se obtienen las siguientes propiedades ópticas del pulso en dicha salida de la sección de ensanchamiento espectral: longitud de onda central de emisión = 1060 nm; ancho de banda espectral de FWHM = 150 nm; potencia promedio = 0,14 W e intensidad máxima = 439 GW/cm². Además, la coherencia temporal del pulso en la salida de la sección de ensanchamiento espectral se demuestra comprimiendo realmente el pulso hasta un ancho de pulso temporal de 14,8 fs.

65 La presente invención también proporciona de acuerdo con un tercer aspecto los diferentes usos del sistema de configuración de todo fibras propuesto. En concreto, el sistema propuesto se puede utilizar en aplicaciones de

excitación multifotónica, microscopía multifotónica, técnica de corriente transitoria mediante la absorción de dos fotones (TCT-TPA), generación de ondas de terahercios, generación de peines de frecuencia, espectroscopia de peine de frecuencia, metrología de tiempo y frecuencia, calibración de espectrógrafos astronómicos, generación de pulsos de attosegundos, generación de formas de onda arbitrarias de radiofrecuencia y comunicaciones ópticas.

5 Por lo tanto, la presente invención integra monolíticamente todas las partes de una fuente de fibra óptica y acopla con bajas pérdidas de inserción la luz propagada dentro de una fibra óptica con un diámetro de núcleo determinado en una fibra óptica con un diámetro de núcleo más bajo (es decir, la fibra microestructurada de ANDi, que tiene la dispersión y las propiedades no lineales necesarias para generar una emisión pulsada de supercontinuo temporalmente coherente), evitando así la necesidad de propagación en el espacio libre en cualquiera de las secciones/fases de la estructura láser.

15 Además, la presente invención proporciona una configuración de fases/secciones de fibra óptica, de manera que la fibra microestructurada de ANDi se excita (mediante acoplamiento directo de fibra) con pulsos ópticos de ancho temporal de unos pocos cientos de femtosegundos y suficiente potencia pico para generar un ensanchamiento temporalmente coherente del espectro en la fibra microestructurada de ANDi por el efecto no lineal de la SPM. Se demuestra un ensanchamiento de hasta 150 nm, correspondiente a unos pulsos limitados de la transformada de ancho de pulso de hasta 13,8 fs. Este no es el límite teórico del sistema y método propuestos, por lo que se espera que se consigan anchos de pulso por debajo de 10 fs.

20 Breve descripción de los dibujos

Las anteriores y otras ventajas y características se comprenderán más plenamente a partir de la siguiente descripción detallada de las realizaciones, haciendo referencia a las figuras adjuntas, que deben tenerse en cuenta de manera ilustrativa y no limitativa, en las que:

la figura 1 ilustra esquemáticamente una disposición simplificada del sistema de configuración de todo fibras propuesto. La figura 2 ilustra una configuración de todo fibras con compresión de pulsos después de la sección de amplificación (la amplificación y la compresión se producen secuencialmente), de acuerdo con una realización de la presente invención.

La figura 3 ilustra: el espectro óptico (A) y los trazados de autocorrelación (B1-4) de la señal pulsada en la salida de la sección de compresión de fibra de núcleo hueco para diferentes valores de la corriente eléctrica del diodo láser, I_{bomba} , de 1 a 4 amperios.

La figura 4 ilustra: A) los espectros ópticos de la señal pulsada en la salida del núcleo hueco (línea discontinua) y en la salida de la fibra microestructurada de ANDi (línea continua), ambos a la misma corriente de bomba, $I_{bomba} = 3$ A. B) Traza de autocorrelación de la señal pulsada en la salida de la fibra microestructurada de ANDi en $I_{bomba} = 3$ A.

La figura 5 ilustra la obtención en escáner D de segunda generación armónica y el pulso resultante en el dominio espectral y de tiempo después de la sección de compresión de espacio libre. La imagen superior izquierda corresponde al trazado del escáner D calibrado y medido; la imagen superior derecha corresponde al trazado en escáner D obtenido; la imagen inferior izquierda muestra en línea continua el espectro lineal medido y en línea discontinua la fase espectral obtenida; la imagen inferior derecha muestra en línea discontinua el perfil de intensidad temporal del pulso limitado por transformada y en línea continua el perfil de intensidad temporal del pulso medido.

La figura 6 ilustra mediciones independientes de las propiedades de la señal pulsada después de la sección de compresión de espacio libre con dos técnicas diferentes. La figura 6A muestra la obtención de un escáner D de generación de segundo armónico en la que, la imagen superior izquierda muestra el trazado en escáner D calibrado y medido; la imagen superior derecha muestra el trazado en escáner obtenido; la imagen inferior izquierda muestra en línea continua el espectro lineal medido y en línea discontinua la fase espectral obtenida; y la imagen inferior derecha muestra en línea discontinua el perfil de intensidad temporal del pulso limitado por transformada y en línea continua el perfil de intensidad temporal del pulso medido. La figura 6B muestra la autocorrelación, con un resultado de medición de ancho de pulso de 19,82 fs y 20,40 fs, respectivamente.

La figura 7 ilustra una configuración de todo fibras con los procesos de compresión y amplificación que se producen progresiva y simultáneamente en la sección de amplificación, de acuerdo con una realización de la presente invención.

La figura 8A es una imagen de una fibra microestructurada representativa, que indica el parámetro N que define el tamaño de la microestructura. La figura 8B muestra el detalle de la microestructura de los orificios de aire de la fibra alrededor del núcleo de la fibra, lo que indica los parámetros geométricos Λ (paso) y d (diámetro del orificio).

La figura 9 ilustra algunas propiedades de un ejemplo de la fibra microestructurada de ANDi usada en la presente invención. La figura 9A ilustra una imagen microscópica de la sección transversal de la fibra microestructurada de ANDi, con un diámetro de orificio promedio $d = 0,61 \mu\text{m}$ y un paso promedio $\Lambda = 1,67 \mu\text{m}$. La figura 9B ilustra la curva de dispersión teórica y medida de la fibra.

Las figuras 10A y 10B son ejemplos de transiciones de fibra óptica para acoplar luz entre una fibra HI1060 y una fibra microestructurada de ANDi.

5 Descripción detallada de las realizaciones preferidas

La presente invención proporciona un sistema de configuración de todo fibras (se detallan dos enfoques) y un método para generar una emisión pulsada de supercontinuo temporalmente coherente.

10 La presente invención se puede utilizar en una amplia variedad de aplicaciones, por ejemplo, en aplicaciones de excitación multifotónica, microscopía multifotónica, técnica de corriente transitoria mediante la absorción de dos fotones (TCT-TPA), generación de ondas de terahercios, generación de peines de frecuencia, espectroscopia de peine de frecuencia, metrología de tiempo y frecuencia, calibración de espectrógrafos astronómicos, generación de pulsos de attosegundos, generación de formas de onda arbitrarias de radiofrecuencia y comunicaciones ópticas.

15 Con referencia a la figura 1, se ilustra un diseño genérico del sistema de configuración de todo fibras propuesto. Como se ve en la figura 1, y con más detalle en las figuras 2 y 7, el enfoque de la presente invención para obtener una configuración de todo fibras de fuentes de supercontinuo temporalmente coherentes de femtosegundos se basa en una estructura secuencial de secciones de todo fibras, cada una de ellas conectada/acoplada a la siguiente por un empalme de fibras fusionadas.

20 Las propiedades ópticas de cada sección y el orden de la secuencia entre las mismas están diseñadas para obtener pulsos de entrada a una fibra microestructurada de ANDi con la potencia pico requerida para ensancharse espectralmente mediante el proceso no lineal de la SPM dentro de la fibra microestructurada de ANDi mientras se conserva la coherencia temporal. Así pues, son comprimibles hasta anchos de pulso correspondientes al límite de Fourier de su espectro.

La figura 2 ilustra una primera realización del sistema de configuración de todo fibras propuesto.

30 De acuerdo con esta primera realización, una fuente de semilla de láser de fibra 110 está configurada para producir/enviar pulsos cortos a un alto índice de repetición. En una salida de la fuente de semilla de láser de fibra 110, las propiedades ópticas del pulso o pulsos son las siguientes: ancho de banda espectral (en anchura a media altura, FWHM) $\Delta\lambda_1 = 13,6$ nm; ancho de pulso temporal (en FWHM) $\Delta\tau_1 = 3,1$ ps; potencia pico $P_{p1} = 86$ W; longitud de onda central = 1060 nm; índice de repetición de pulsos = 75 MHz. La longitud de onda central y el índice de repetición de pulsos permanecen sin cambios a lo largo de todas las secciones del sistema de todo fibras.

35 La salida de fibra de la fuente de semilla de láser de fibra 110 está acoplada a la entrada de fibra de la siguiente sección (sección de estiramiento 120) a través de un empalme de fibras fusionadas 115.

40 La sección de estiramiento 120 comprende una fibra óptica monomodo (SM) 121 y un combinador de fibras fusionadas 122. Las fibras de esta sección 120 a través de las que el pulso o los pulsos se propagan tienen una dispersión de retardo de grupo normal (es decir, $GDD > 0$), y preferentemente una longitud total de 20 m y un diámetro de campo modal de 6,2 μm . La función de la sección de estiramiento 120 es estirar el pulso o los pulsos temporalmente de modo que puedan amplificarse en la siguiente sección sin generar efectos no lineales (la potencia pico permanece por debajo del umbral de generación de efectos no lineales en el núcleo de fibra óptica). Así mismo, la sección de estiramiento 120 precompensa la dispersión anómala que sufrirá el pulso o los pulsos en la sección de compresión 140. El combinador de fibras fusionadas 122 lanza luz desde un diodo láser 123 a una fibra activa 131, dopada con un elemento de tierras raras, de la siguiente sección 130. En la salida de fibra de la sección de estiramiento 120, las propiedades ópticas del pulso o pulsos estirados son las siguientes: ancho de banda espectral en FWHM de $\Delta\lambda_2 = 13,6$ nm; ancho de pulso temporal en FWHM de $\Delta\tau_2 = 9,6$ ps; potencia pico $P_{p2} = 27,8$ W; intensidad pico $I_{p2} = 92$ MW/cm².

La salida de fibra de la sección de estiramiento 120 se acopla a la entrada de fibra de la siguiente sección (sección de amplificación 130) a través de un empalme de fibras fusionadas 115.

55 La sección de amplificación 130 de esta primera realización comprende específicamente una fibra activa dopada con iterbio de doble revestimiento 131, con una dispersión de retardo de grupo normal (es decir, $GDD > 0$), una longitud total de 4,5 m y un diámetro de campo modal de 6,2 μm . Cabe señalar que el elemento de tierras raras de la fibra óptica activa 131 en otras realizaciones podría comprender otros elementos de tierras raras tales como erbio, neodimio, itrio, tulio, holmio, gadolinio, terbio, neodimio, entre otros. La función de la sección de amplificación 130 es amplificar el pulso o pulsos estirados a la máxima potencia pico posible sin efectos no lineales de polarización que distorsionarían la forma temporal y espectral del pulso o pulsos. La amplificación se produce progresivamente en la fibra activa dopada con iterbio 131 mediante la radiación estimulada de los iones de iterbio activos del núcleo de la fibra, que se bombean hasta conseguir estados excitados por la luz procedente del diodo láser 123 a través del primer revestimiento de la fibra activa dopada con iterbio 131 (este revestimiento es pasivo, no dopado). En la salida de fibra de la sección de amplificación 130, las propiedades ópticas del pulso o pulsos son las siguientes: ancho de banda espectral en FWHM de $\Delta\lambda_3 = 14,5$ nm; ancho de pulso temporal en FWHM de $\Delta\tau_3 = 15$ ps; potencia promedio

$P_3 = 0,4 \text{ W}$; potencia pico $P_{p3} = 356 \text{ W}$; intensidad pico $I_{p3} = 1,18 \text{ GW/cm}^2$.

5 La salida de fibra de la sección de amplificación 130 se acopla a la entrada de fibra de la siguiente sección (sección de compresión 140) a través de un empalme de fibras fusionadas 115. Podría hacerse igualmente a través de una transición de fibras.

10 La sección de compresión 140 comprende una fibra microestructurada de núcleo hueco 141 con dispersión de retardo de grupo anómala (es decir, $GDD < 0$), y específicamente una longitud total de 10 m y un diámetro de campo modal de $7,2 \mu\text{m}$. La función de la sección de compresión 140 es comprimir temporalmente el pulso o los pulsos para lograr la potencia pico requerida en la entrada de la sección de ensanchamiento espectral 150 para generar de manera eficiente un ensanchamiento espectral temporalmente coherente por SPM. Así mismo, su longitud está diseñada de modo que la GDD neta sufrida por el pulso o pulsos de la salida de la fuente de semilla de láser de fibra 110 sea ligeramente negativa (o anómala): $-0,015 \text{ ps}^2$. Al hacerlo, el pulso o pulsos siguen sufriendo la compresión en el primer segmento de la fibra microestructurada de ANDi 151 y la eficiencia de SPM se optimiza al tener la potencia pico máxima alcanzable dentro de la fibra microestructurada de ANDi 151. La dispersión de velocidad de grupo anómala (GVD) de la fibra microestructurada de núcleo hueco 141 es $-72 \times 10^3 \text{ fs}^2/\text{m}$. Dado que el material del núcleo es aire, se evitan los efectos no lineales debido a la alta potencia pico; por lo tanto, el pulso o pulsos sufren/no sufren un ensanchamiento espectral. En la salida de fibra de la sección de compresión 140, las propiedades ópticas del pulso o pulsos son las siguientes: ancho de banda espectral en FWHM de $\Delta\lambda_4 = 14,5 \text{ nm}$; ancho de pulso temporal en FWHM de $\Delta\tau_4 = 200 \text{ fs}$; potencia promedio $P_4 = 0,3 \text{ W}$; potencia pico $P_{p4} = 20,0 \text{ kW}$; intensidad pico $I_{p4} = 45 \text{ GW/cm}^2$.

20 La salida de fibra de la sección de compresión 140 se acopla a la entrada de fibra de la siguiente sección (sección de ensanchamiento espectral 150) a través de una transición de fibra especialmente diseñada 116, como se detallará a continuación.

25 La sección de ensanchamiento espectral 150 comprende dicha fibra microestructurada de ANDi 151. En concreto, en esta realización, la fibra microestructurada de ANDi 151 tiene una longitud total de 20 cm y un diámetro de núcleo de $2,6 \mu\text{m}$. La GDD en la fibra microestructurada de ANDi 151 es normal dentro de una banda espectral muy ancha (que comprende desde menos de $1060 - 150 \text{ nm}$ hasta más de $1060 + 150 \text{ nm}$), con una forma casi plana y simétrica para generar una SPM lineal, y muy cerca de 0 para limitar el estiramiento de pulso tanto como sea posible. A continuación, se proporciona una descripción adicional de la fibra microestructurada de ANDi 151. La función de la sección de ensanchamiento espectral 150 es ensanchar espectralmente el espectro del pulso o pulsos mediante el efecto no lineal de la SPM, mantener la coherencia temporal del pulso o pulsos de modo que puedan ser comprimibles hasta anchos de pulso correspondientes al límite de Fourier de su espectro. En la salida de fibra de la sección de ensanchamiento espectral 150, las propiedades ópticas del pulso o pulsos son las siguientes: ancho de banda espectral en FWHM de $\Delta\lambda_5 = 150 \text{ nm}$; ancho de pulso temporal en FWHM de $\Delta\tau_5 = 80 \text{ fs}$; potencia promedio $P_5 = 0,14 \text{ W}$; potencia pico $P_{p5} = 23,3 \text{ kW}$; intensidad pico $I_{p5} = 439 \text{ GW/cm}^2$.

40 La salida de fibra de la sección de ensanchamiento espectral 150 se envía al espacio libre. En esta primera realización, este envío se realiza a través de un colimador de fibra acoplado 152.

45 A pesar de no formar parte de la invención, después del citado colimador de fibra acoplado 152, se incluye un compresor de espacio libre 160 de dispersión anómala variable ($GDD < 0$). El compresor variable 160 está configurado para comprimir el pulso o pulsos temporalmente coherentes desde la salida de la sección de ensanchamiento espectral 150 hasta un ancho de pulso arbitrario que oscila desde el valor en la salida de la sección de ensanchamiento espectral 150 (80 fs) hasta el valor correspondiente al límite de Fourier de su espectro (13,8 fs). Dado que la GDD neta sufrida por el pulso o pulsos a través del sistema de todo fibras es normal ($GDD \text{ neta} > 0$), la dispersión del compresor variable 160 debe ser negativa para comprimir temporalmente el pulso o pulsos. La intensidad del pulso o pulsos es ahora muy baja porque el haz de espacio libre es habitualmente superior a 1 mm. Por lo tanto, los efectos no lineales en el compresor variable 160 son inexistentes y se mantiene la forma del espectro. A la salida del compresor variable 160, las propiedades ópticas del pulso o pulsos son las siguientes: ancho de banda espectral en FWHM de $\Delta\lambda_6 = 150 \text{ nm}$; ancho de pulso temporal en FWHM de $\Delta\tau_6 = 14,8 \text{ fs}$; potencia pico $P_{p6} = 44,5 \text{ kW}$.

55 Las fibras ópticas de todas las secciones preferentemente mantienen la polarización para obtener una salida óptica con un estado de polarización linealmente polarizado.

60 La figura 3A y la figura 3B1-4 muestran, respectivamente, el espectro óptico y la medición de autocorrelación de la señal pulsada en la salida de fibra de la sección de compresión 140 para los diferentes valores de la corriente eléctrica que acciona el diodo láser 123, I_{bomba} , de 1 a 4 amperios. Dado que la fibra óptica 141 de la sección de compresión 140 tiene un núcleo hueco, se evitan las no linealidades debidas a la alta potencia pico de los pulsos, por lo tanto, el espectro mantiene una forma similar independientemente de la potencia pico del pulso (que aumenta cuando I_{bomba} aumenta). Así mismo, el ancho de pulso en la salida de la fibra 141 es aproximadamente el mismo (en un intervalo entre 200 y 321 femtosegundos) para todas las corrientes, ya que la cantidad anómala de GDD introducida por la fibra 141 no depende de la potencia pico del pulso. Las irregularidades en el espectro y trazado de autocorrelación en $I_{\text{bomba}} = 4 \text{ A}$ indican que la señal está alcanzando el umbral por encima del que los pulsos comienzan a ser inestables, perdiendo coherencia temporal.

Los espectros se han tomado con una resolución espectral de 50 pm usando un analizador de espectro óptico YOKOGAWA AQ6373B. Los trazados de la autocorrelación se han obtenido con un autocorrelador Femtochrome Research FR-103XL. Para este modelo de autocorrelación, la correspondencia entre el ancho de pulso temporal de la señal de tensión enviada por el autocorrelador (registrada con un osciloscopio), Δt_{FWHM} , y el ancho temporal real de la intensidad óptica del pulso ΔT_{FWHM} viene dada por la ecuación $\Delta T_{FWHM} \text{ (ps)} = \Delta t_{FWHM} \text{ (ms)} * 0,7 * 31 \text{ ps/ms}$ (suponiendo la forma gaussiana del pulso). Por lo tanto, los valores medidos de 11,4; 12; 9,2 y 14,8 μs corresponden a 247, 260, 200 y 321 fs, respectivamente.

10 La figura 4A muestra el espectro óptico de la señal pulsada en la salida de fibra de la sección de ensanchamiento espectral 150 (es decir, en la salida de la fibra microestructurada de ANDi 151), en comparación con el espectro óptico en la salida de fibra de la sección anterior (es decir, en la salida de la fibra de núcleo hueco 141), ambos a la misma corriente de bomba, $I_{bomba} = 3 \text{ A}$. Como consecuencia del efecto no lineal de la SPM sufrida por la señal pulsada, su espectro óptico en FWHM se amplía de 14,5 nm a 150 nm. La fibra microestructurada de ANDi 151 se excita a una longitud de onda central de 1060 nm, que corresponde al centro de la parte superior aplanada de la curva de dispersión convexa de la fibra. Dado que esta curva de dispersión es simétrica (cuando se hace referencia a dicha longitud de onda central), la forma del espectro ensanchado también es simétrica. El ancho temporal de pulso disminuye de 200 fs a 80 fs y la intensidad de pico de pulso aumenta de 45 GW/cm^2 a 439 GW/cm^2 . La figura 4B muestra el trazado de autocorrelación de la señal pulsada en la salida de la fibra microestructurada de ANDi 151, correspondiente al espectro ensanchado de la figura 4A.

El citado compresor variable 160 de GDD anómala variable puede comprimir los pulsos hasta un ancho de pulso temporal de 14,8 fs. La figura 5 muestra los resultados de una de las técnicas que se han utilizado para medir las propiedades de los pulsos comprimidos a la salida del compresor variable 160. Conocida como *técnica de escáner D*, se basa en realizar un escáner de dispersión en los pulsos con un compresor de pulsos mientras se mide el espectro de la señal de segundo armónico (SH) resultante [4]. El compresor variable 160 está diseñado para proporcionar un intervalo de escaneado de dispersión negativa de 0 a -4000 fs^2 y un intervalo de escaneado de dispersión normal de 0 a 2500 fs^2 . A partir de esta medición, se obtienen las propiedades de fase y amplitud del campo eléctrico de los pulsos. El sistema presenta valores de GDD y TOD muy bajos (-154 fs^2 y 876 fs^3 , respectivamente) proporcionando un pulso con el 68,4 % de la energía en el pico principal. El ancho de pulso medido es 14,8 fs. Este resultado demuestra el alto grado de coherencia temporal de la señal pulsada, ya que está muy cerca de la duración límite de Fourier soportada por su espectro óptico: 13,8 fs.

Para confirmar adicionalmente que el pulso es temporalmente coherente (por lo tanto, comprimible para acercarse a su límite de transformada de Fourier), se compararon dos métodos diferentes de medición: un escáner D y autocorrelación. Las figuras 6A y 6B muestran los resultados de las mediciones de escáner D y autocorrelación, respectivamente, con el pulso comprimido por el mismo compresor de dispersión variable y el mismo intervalo de dispersión. Ambos métodos dieron el mismo resultado independiente de $20 \pm 1 \text{ fs}$ de ancho de pulso.

40 Con referencia a la figura 7, se ilustra una segunda realización del sistema de configuración de todo fibras propuesto.

De acuerdo con esta segunda realización, una fuente de semilla de láser de fibra 210 está configurada para producir/enviar pulsos cortos a un alto índice de repetición. En una salida de la fuente de semilla de láser de fibra 210, las propiedades ópticas del pulso o pulsos son las siguientes: ancho de banda espectral (en anchura a media altura, FWHM) $\Delta\lambda_1 = 13,6 \text{ nm}$; ancho de pulso temporal (en FWHM) $\Delta\tau_1 = 3,1 \text{ ps}$; potencia pico $P_{p1} = 86 \text{ W}$; longitud de onda central = 1060 nm; índice de repetición de pulsos = 75 MHz. La longitud de onda central y el índice de repetición de pulsos permanecen sin cambios a lo largo de todas las secciones del sistema de todo fibras.

50 La salida de fibra de la fuente de semilla de láser de fibra 210 está acoplada a la entrada de fibra de la siguiente sección (sección de estiramiento 220) a través de un empalme de fibras fusionadas 215.

La sección de estiramiento 220 en esta segunda realización comprende una fibra microestructurada de núcleo hueco 221 con dispersión de retardo de grupo anómala (es decir, $\text{GDD} < 0$) y específicamente una longitud total de 6 m y un diámetro de campo modal de $7,2 \mu\text{m}$. La función de la sección de estiramiento 220 es estirar el pulso o pulsos temporalmente. La longitud de esta fibra microestructurada de núcleo hueco 221 está diseñada para que compense previamente la GDD normal acumulada en las siguientes secciones 225, 230, 250 de modo que la GDD neta sufrida por el pulso o pulsos desde la salida del pulso de semilla de láser de fibra 210 sea 0 en un punto del primer segmento de la fibra microestructurada de ANDi 251. Al hacerlo, se optimiza la eficiencia del ensanchamiento espectral sufrido por el pulso o pulsos debido a la SPM dentro de la sección de ensanchamiento espectral 250, ya que la potencia pico máxima se logra realmente en tal punto dentro de la fibra microestructurada de ANDi 251. En la salida de fibra de la sección de estiramiento 220, las propiedades ópticas del pulso o pulsos son las siguientes: ancho de banda espectral en FWHM de $\Delta\lambda_2 = 13,6 \text{ nm}$; ancho de pulso temporal en FWHM de $\Delta\tau_2 = 1,8 \text{ ps}$; potencia pico $P_{p2} = 74 \text{ W}$; intensidad pico $I_{p2} = 245 \text{ MW/cm}^2$.

65 En esta segunda realización, la sección 225 comprende un combinador de fibras fusionadas 222 que lanza luz desde un diodo láser 223 a una fibra óptica activa 231, dopada con un elemento de tierras raras, de la sección de amplificación

230. Las fibras de esta sección 225 a través de las que el pulso o pulsos se propagan tienen específicamente una longitud total de 2 m y una dispersión de retardo de grupo normal (es decir, $GDD > 0$). Por lo tanto, el pulso o pulsos sufren compresión temporal. En la salida de fibra de la sección 225, las propiedades ópticas del pulso o pulsos son las siguientes: ancho de banda espectral en FWHM de $\Delta\tau_3 = 13,6$ nm; ancho de pulso temporal en FWHM de $\Delta\tau_3 = 1,6$ ps; potencia pico $P_{p3} = 83$ W; intensidad pico $I_{p3} = 276$ MW/cm².

La sección de amplificación 230 de esta segunda realización comprende específicamente una fibra activa 231 dopada con iterbio de doble revestimiento, con una dispersión de retardo de grupo normal (es decir, $GDD > 0$), con una longitud total de 5 m. Cabe señalar que el elemento de tierras raras de la fibra óptica activa 231 en otras realizaciones podría comprender otros lantánidos o elementos de tierras raras tales como los descritos anteriormente para la primera realización, entre otros. A diferencia de la primera realización, donde el estiramiento temporal en la sección de estiramiento 120 se produce por una GDD del mismo signo que el signo de GDD en la sección de amplificación 130 (tanto normal como $GDD > 0$), en esta segunda realización, la GDD de la sección de estiramiento 220 es anómala ($GDD < 0$), mientras que la GDD de la sección de amplificación 230 es normal ($GDD > 0$). En consecuencia, en esta segunda realización, el pulso o pulsos que atraviesan la sección de amplificación 230 se comprimen y amplifican progresiva y simultáneamente. En este proceso, la potencia pico del pulso o pulsos alcanza y supera progresivamente el umbral para generar un ensanchamiento espectral seminal por el efecto no lineal de la SPM, como se ilustra en la figura 7 (referencia a 3, 4 y 4b). La sección de amplificación 230 proporciona la potencia pico requerida en la entrada de la siguiente sección para generar de manera eficiente un ensanchamiento espectral temporalmente coherente ultra ancho en la fibra microestructurada de ANDi 251. En la salida de fibra de la sección de amplificación 230, las propiedades ópticas del pulso o pulsos son las siguientes: ancho de banda espectral en FWHM de $\Delta\lambda_{4b} = 20$ nm; ancho de pulso temporal en FWHM de $\Delta\tau_{4b} = 2,0$ ps; Potencia promedio $P_{4b} = 0,7$ W; potencia pico $P_{p4b} = 4,67$ kW; intensidad pico $I_{p4b} = 15,6$ GW/cm².

La salida de fibra de la sección de amplificación 230 se acopla a la entrada de fibra de la siguiente sección (sección de ensanchamiento espectral 250) a través de una transición de fibra especialmente diseñada 216, como se detallará a continuación.

La sección de ensanchamiento espectral 250 y los elementos acoplados a esta última no se diferencian en ningún aspecto significativo de las explicaciones dadas para la primera realización.

En esta segunda realización, en la salida de fibra de la sección de ensanchamiento espectral 250, las propiedades ópticas del pulso o pulsos son las siguientes: ancho de banda espectral en FWHM de $\Delta\lambda_5 = 60$ nm; ancho de pulso temporal en FWHM de $\Delta\tau_5 = 4,0$ ps; potencia promedio $P_5 = 0,5$ W; potencia pico $P_{p5} = 1,67$ kW; intensidad pico $I_{p5} = 31,4$ GW/cm².

De acuerdo con la invención propuesta, las fibras microestructuradas de ANDi 151, 251 citadas se fabrican con sílice. Estas presentan una microestructura periódica de orificios de aire de tipo triangular. El núcleo de las fibras es sólido, creado por la ausencia de un orificio de aire en el centro de la microestructura. Los orificios de aire tienen un diámetro d . Los centros de los orificios de aire contiguos están separados un período Λ (también llamado *paso*). La microestructura de los orificios de aire tiene un diámetro de $2N$ períodos, es decir, el núcleo tiene N orificios de aire a cada lado. La microestructura de los orificios de aire está rodeada por una camisa de sílice uniforme que confiere a la fibra un diámetro normal de 125 μm . La figura 8 permite una identificación gráfica de los parámetros anteriormente mencionados.

La dependencia de la longitud de onda de la dispersión cromática (*curva de dispersión*) que sufre la luz en su propagación dentro de las fibras microestructuradas de ANDi 151, 251 viene determinada por los parámetros Λ y d . En la presente invención, para limitar los efectos no lineales a la SPM, la dispersión cromática de estas fibras microestructuradas de ANDi 151, 251 tiene que ser normal dentro de una banda espectral muy ancha (> 300 nm). También, la dispersión cromática tiene que estar muy cerca de 0 dentro de dicha banda espectral, con el fin de limitar el estiramiento temporal del pulso tanto como sea posible. Además, su curva de dispersión tiene que presentar una forma cuasiplana, convexa y simétrica (referenciada a la longitud de onda central de la señal óptica de excitación) para generar un ensanchamiento espectral simétrico por la SPM. Tomando 1060 nm como la longitud de onda central, tales propiedades de la curva de dispersión se obtienen combinando los valores de Λ y dentro de los siguientes intervalos: $\Lambda \in [0,55; 0,65]$ μm ; $d \in [1,50; 1,70]$ μm . El confinamiento eficiente de la luz dentro del núcleo se obtiene mediante valores de N iguales a 7 o superiores.

La figura 9A muestra una imagen microscópica de la sección transversal de un ejemplo de fibra microestructurada de ANDi utilizada en esta invención, que presenta un diámetro de orificio promedio $d = 0,61$ μm y un paso promedio $\Lambda = 1,67$ μm . La figura 9B ilustra la curva de dispersión teórica y medida de dicha fibra. En todo el intervalo de longitudes de onda de 1060 ± 150 nm, la dispersión de velocidad de grupo es normal, inferior a 0 ps/nm/km y superior a -30 ps/nm/km (que es equivalente a decir superior a 0 fs²/m e inferior a $17,9 \times 10^3$ fs²/m).

Como se explicó anteriormente, una cuestión crucial para fabricar una fuente de supercontinuo temporalmente coherente, de todo fibras, completamente monolítica es acoplar eficientemente la luz de la salida de la sección de compresión 140, 230 a la entrada de la fibra microestructurada de ANDi 151, 251 a través de una transición de fibra óptica 116, 216. El desafío es obtener una eficiencia de acoplamiento lo suficientemente alta como para evitar daños

térmicos en la transición de fibras 116, 216 al tiempo que se conserva la coherencia temporal del pulso o pulsos. Para resolverlo, la presente invención proporciona un enfoque para acoplar con bajas pérdidas de inserción la luz propagada dentro de una fibra óptica con un diámetro de núcleo determinado en la fibra microestructurada de ANDi 151, 251.

5 El enfoque se basa en una transición óptica entre las dos fibras ópticas que proporciona pérdidas de inserción mínimas. Esta transición está hecha de una serie de secciones cortas de fibras con diferentes tamaños de modo fundamental y aperturas numéricas, que se empalman por fusión secuencialmente. La pérdida de inserción total entre las dos fibras se obtiene teóricamente aplicando la ecuación del factor de acoplamiento entre fibras de diferente tamaño de modo fundamental. A continuación, este diseño se reproduce experimentalmente usando secciones de fibras ópticas reales
10 con tamaños de modo fundamentales lo más cerca posible del caso ideal.

A continuación, se muestra un ejemplo de realización de un diseño de transición de fibras y su reproducción experimental. La figura 10A ilustra una transición de empalme por fusión directa entre una fibra monomodo estándar a 1060 nm (por ejemplo, HI1060 de Corning, de radio de campo de modo fundamental de 3,1 μm) y una fibra
15 microestructurada de ANDi, de radio de campo de modo fundamental 1,25 μm. Dado que la diferencia entre su radio modal es alta, se espera que el factor de acoplamiento entre ellas sea bajo y, en consecuencia, con altas pérdidas de inserción. La figura 10B ilustra una transición más suave, hecha de secciones cortas de fibras con tamaño decreciente del radio de modo de campo y apertura numérica creciente. Se espera que esta configuración proporcione una mayor eficiencia de acoplamiento de la potencia entre la fibra HI1060 y la fibra microestructurada de ANDi.

20 El factor de acoplamiento de potencia σ entre dos modos fundamentales de diferente tamaño viene dado por la ecuación

$$\sigma = \frac{|\int E_1^* E_2 dA|^2}{\int |E_1|^2 dA \int |E_2|^2 dA} ; \quad \sigma = \frac{4 \cdot \omega_1^2 \cdot \omega_2^2}{(\omega_1^2 + \omega_2^2)^2} \quad (1)$$

25 donde ω_1 y ω_2 son los radios de campo de modo fundamental de las fibras que se van a acoplar a una longitud de onda determinada (por ejemplo, 1060 nm en este ejemplo de realización).

Para el caso de la transición de empalme por fusión directa de la figura 10A, el factor de acoplamiento teórico es $\sigma = 0,481$. Este factor de acoplamiento se mejora a $\sigma = 0,755$ si se configura una transición de fibra del tipo de la figura
30 10B, empleando piezas cortas de fibra Corning HI980 y fibra Thorlabs UHNA1, secuencialmente, entre la fibra HI1060 y la fibra microestructurada de ANDi, siendo sus radios de campo de modo los siguientes:

- Corning HI1060: $\omega_1 = 3,1 \mu\text{m}$
- Corning HI980: $\omega_2 = 2,1 \mu\text{m}$
- 35 Thorlabs UHNA1: $\omega_3 = 1,6 \mu\text{m}$
- Fibra microestructurada de ANDi: $\omega_4 = 1,25 \mu\text{m}$

Por lo tanto, $\sigma = 0,862 * 0,93 - 0,942 = 0,755$.

40 Este resultado se confirma experimentalmente, obteniendo un factor de acoplamiento experimental $\sigma = 0,81$, obteniendo así una pérdida de inserción de potencia total de menos del 20 % entre la fibra HI1060 y la fibra microestructurada de ANDi.

También es importante observar que el procedimiento de los empalmes de fibras fusionadas propuestos entre
45 secciones de la transición de fibra incluye una etapa de optimización de las pérdidas de inserción inherentes al desajuste de índice de refracción en la interfaz entre secciones. Este procedimiento consiste en aplicar un número de descargas de fusión de arco adicionales después de la primera descarga de arco que fusiona en un principio una sección de fibra a la siguiente. Estas descargas de arco adicionales proporcionan una mayor homogeneidad del vidrio en la transición de fusión, por lo tanto, menos pérdidas ópticas debido al desajuste de índice. El número de descargas
50 de arco adicionales varía de 1 a 100. Para cada transición, se determinan experimentalmente al menos los siguientes parámetros de las descargas de arco adicionales: potencia de fusible previo, tiempo de fusible previo, potencia de arco, tiempo de arco y posición de la descarga de arco adicional en la transición de fibra.

Para las potencias pico obtenidas en la salida de la sección de fibra antes de la sección de ensanchamiento espectral
55 150, 250 en las diferentes realizaciones del sistema de todo fibras, se ha determinado experimentalmente que la eficiencia de acoplamiento de la transición de acoplamiento a la fibra microestructurada de ANDi 151, 251 tiene que ser superior al 60 % ($\sigma > 0,6$) para obtener pulsos compresibles temporalmente coherentes de hasta 150 nm de ancho completo y la mitad del ancho de banda máximo o mayor por el efecto no lineal de la SPM, mientras se evita el daño térmico y se conserva la coherencia temporal del pulso en la transición de fibras.

60 Este enfoque se ha usado para diseñar e implementar transiciones desde la sección de compresión 140, 230 a la sección de ensanchamiento espectral 150, 250. En la primera realización (figura 2), la transición se realiza entre la

fibra microestructurada de núcleo hueco 151 con un diámetro de campo modal de 7,2 μm hasta la fibra microestructurada de ANDi 151 con un diámetro de campo modal de 2,6 μm . El factor de acoplamiento resultante σ es 0,6 o superior. En la segunda realización (figura 7), la transición se realiza entre una fibra monomodo Corning HI1060 231 con un diámetro de campo modal de 6,2 μm hasta la fibra microestructurada de ANDi 251 con un diámetro de campo modal de 2,6 μm . El factor de acoplamiento resultante σ es 0,8 o superior.

Con referencia a la figura 11, se ilustra una realización del método propuesto. De acuerdo con esta realización, el método comprende, en la etapa 1001, proporcionar un sistema de todo fibras mediante el acoplamiento de una estructura secuencial de secciones de todo tipo de fibra a través de empalmes de fibras fusionadas 115, 215 y/o transiciones de fibras 116, 216. En la etapa 1002, una fuente de semilla de láser de fibra 110, 210 produce un pulso de semilla con propiedades ópticas determinadas (por ejemplo, un ancho de banda espectral con un ancho de pulso temporal limitado por transformada de Fourier de 1 picosegundo o menos en FWHM. En la etapa 1003, el pulso de semilla se estira temporalmente. Entonces, en la etapa 1004, el pulso estirado se amplifica estimulando progresivamente la radiación de los iones activos de una fibra óptica activa dopada 131, 231 (preferiblemente una fibra activa dopada con iterbio). En la etapa 1005, el pulso amplificado se comprime temporalmente. Finalmente, en la etapa 1006, el pulso comprimido se ensancha espectralmente, particularmente a través de una fibra microestructurada de ANDi 151, 251 por un efecto no lineal de la SPM al tiempo que se conserva la coherencia temporal del pulso. Así, el pulso en una salida de la fibra microestructurada de ANDi 151, 251 tiene un ancho de banda espectral en FWHM de 60 nanómetros o más, y es comprimible hasta el ancho de pulso correspondiente al límite de Fourier de su ancho de banda espectral.

En una realización, se obtienen las siguientes propiedades ópticas del pulso en dicha salida de la fibra microestructurada de ANDi 151, 251: longitud de onda central de emisión = 1060 nm; ancho de banda espectral de FWHM = 150 nm; potencia promedio = 0,14 W e intensidad pico = 439 GW/cm², y en donde la coherencia temporal del pulso en la salida de la sección de ensanchamiento espectral se demuestra comprimiendo realmente el pulso hasta un ancho de pulso temporal de 14,8 fs. Si bien lo anterior se refiere a realizaciones de la presente invención, se pueden idear otras realizaciones adicionales de la invención sin desviarse del alcance de la presente invención que se define en el siguiente conjunto de reivindicaciones.

30 Referencias:

- 1] L. E. Hooper *et al.* "Coherent supercontinuum generation in photonic crystal fibre with all-normal group velocity dispersion", *Optics Express*, 19, págs. 4902-4907, 2011.
- [2] S. Demmler, *et al.* "Generation of high quality, 1.3 cycle pulses by active phase control of an octave spanning supercontinuum", *Optics Express*, 19, págs. 20151-20158, 2011.
- [3] Alexander M. Heidt *et al.* "High quality sub-two cycle pulses from compression of supercontinuum generated in all normal dispersion photonic crystal fiber", *Optics Express*, vol. 19, n.º 15, 2011.
- [4] M. Miranda *et al.*, "Characterization of broadband few-cycle laser pulses with the d-scan technique", *Opt. Express* 20, 18732-18743 (2012).
- [5] Xiaomin Liu *et al.* "Monolithic Highly Stable Yb-Doped Femtosecond Fiber Lasers for Applications in Practical Biophotonics", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 18, n.º 4, julio/agosto 2012.
- [6] Chunlei Huang *et al.* "Ultraflat, broadband, and highly coherent supercontinuum generation in all-solid microstructured optical fibers with all-normal dispersion", *Photonics Research*, vol. 6, n.º 6, junio 2018.
- [7] W. Qi *et al.* "Microstructured Inline Optical Fiber Structure for Dispersion Control and Coherent Supercontinuum Generation", *IEEE Photonics Journal*, vol. 8, n.º 3, junio 2016.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema de configuración de todo fibras, configurado para generar una emisión pulsada de supercontinuo temporalmente coherente, comprendiendo dicho sistema una estructura secuencial de secciones de todo fibras acopladas mediante empalmes de fibras fusionadas (115, 215), que incluye, en el siguiente orden:
- una fuente de semilla de láser de fibra (110, 210) configurada para producir al menos un pulso de semilla con propiedades ópticas determinadas, que incluye un ancho de banda espectral que corresponde a un ancho de pulso temporal limitado por transformada de Fourier de 1 picosegundo o menos en anchura a media altura, FWHM;
 - una sección de estiramiento (120, 220) que incluye una fibra óptica (121, 221) configurada para estirar temporalmente el pulso de semilla;
 - una sección de amplificación (130, 230) que incluye una fibra óptica activa (131, 231), dopada con un elemento de tierras raras, configurada para amplificar el pulso estirado estimulando progresivamente la radiación de los iones activos de la fibra óptica activa dopada (131, 231);
 - una sección de compresión (140, 230) configurada para comprimir temporalmente el pulso amplificado; **caracterizado por que** comprende, además
 - una sección de ensanchamiento espectral (150, 250) que incluye una fibra microestructurada de ANDi de dispersión totalmente normal monomodo (151, 251), configurada para ensanchar espectralmente el pulso comprimido mediante un efecto no lineal de automodulación de fase, SPM, mientras conserva la coherencia temporal del pulso, de modo que el pulso en una salida de la sección de ensanchamiento espectral (150, 250) tiene un ancho de banda espectral en FWHM de 60 nanómetros o más, y es comprimible hasta un ancho de pulso temporal correspondiente al límite de Fourier de su ancho de banda espectral,
- en donde la fibra microestructurada de ANDi (151, 251) tiene una longitud de 1 metro o menos, una dispersión de retardo de grupo normal y una dispersión de velocidad de grupo normal, siendo dicha dispersión de velocidad de grupo inferior a 0 ps/nm/km y superior a -30 ps/nm/km en todo el intervalo de longitudes de onda comprendido dentro de ± 150 nm de una longitud de onda central de emisión λ_c de la fuente de semilla de láser de fibra (110, 210).
2. El sistema de la reivindicación 1, en donde el elemento de tierras raras comprende iterbio, y en donde la fibra óptica activa dopada (131, 231) tiene una dispersión de retardo de grupo normal.
3. El sistema de la reivindicación 1 o 2, en donde la sección de estiramiento (120) comprende además un combinador de fibras fusionadas (122) configurado para recibir adicionalmente luz de un diodo láser (123) y lanzar la luz recibida a la sección de amplificación (130), y en donde la fibra óptica (121) de la sección de estiramiento (130) es una fibra óptica monomodo que tiene una dispersión de retardo de grupo normal.
4. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en donde la sección de compresión (140) comprende una fibra microestructurada de núcleo hueco (141) que tiene una dispersión de retardo de grupo anómala.
5. El sistema de la reivindicación 1 o 2, en donde la fibra óptica (221) de la sección de estiramiento (220) es una fibra microestructurada de núcleo hueco que tiene una dispersión de retardo de grupo anómala, y en donde el sistema comprende (225), además, un combinador de fibras fusionadas (222) configurado para recibir adicionalmente luz de un láser diodo (223) y lanzar la luz recibida a la fibra óptica activa dopada (231).
6. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde una salida de la sección de compresión (140, 230) está acoplada a una entrada de la fibra microestructurada de ANDi (151, 251) de la sección de ensanchamiento espectral (150, 250) a través de una transición de fibras (116, 216) hecha de un número de piezas de fibras que se empalman por fusión secuencialmente y tienen diferentes aperturas numéricas y diferentes tamaños de campo de modo fundamental, diseñadas para proporcionar una eficiencia de acoplamiento de potencia total entre la sección de compresión (140, 230) y la sección de ensanchamiento espectral (150, 250) de más del 60 %.
7. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la potencia promedio en una salida de la sección de amplificación (130, 230) es igual o mayor que 0,4 W, la potencia promedio en una salida de la sección de compresión (140, 230) es igual o mayor que 0,3 W y la potencia promedio en dicha salida de la sección de ensanchamiento espectral (150, 250) es igual o mayor que 100 mW.
8. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la intensidad pico del pulso en una entrada de la fibra microestructurada de ANDi (151, 251) es igual o mayor que 60 GW/cm².
9. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde todas las fibras ópticas de las secciones de todo fibras son fibras que conservan la polarización.
10. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende, además, un aislador de fibra situado entre al menos dos de las secciones de todo fibras.
11. Un método para generar una emisión pulsada de supercontinuo temporalmente coherente, comprendiendo el

método las siguientes etapas:

- proporcionar un sistema de todo fibras acoplado una estructura secuencial de secciones de todo fibras mediante empalmes de fibras fusionadas (115, 215);
- 5 - producir, a través de una fuente de semilla de láser de fibra (110, 210) de dicha estructura secuencial, al menos un pulso de semilla con las propiedades ópticas determinadas, que incluye un ancho de banda espectral que corresponde a un ancho de pulso limitado por transformada de Fourier de 1 picosegundo o menos en anchura a media altura, FWHM;
- estirar temporalmente el pulso de semilla mediante una sección de estiramiento (120, 220) de dicha estructura secuencial, incluyendo dicha sección de estiramiento (120, 220) una fibra óptica (121, 221);
- 10 - amplificar, mediante una sección de amplificación (130, 230) de la estructura secuencial, el pulso estirado estimulando progresivamente la radiación de los iones activos de una fibra óptica activa (131, 231), dopada con un elemento de tierras raras e incluida en dicha sección de amplificación (130, 230);
- comprimir temporalmente el pulso amplificado mediante una sección de compresión (140, 230) de la estructura secuencial; **caracterizado por que** comprende, además
- 15 - ensanchar espectralmente, mediante una sección de ensanchamiento espectral (150, 250) que incluye una fibra microestructurada de ANDi de dispersión totalmente normal monomodo, el pulso comprimido por un efecto no lineal de automodulación de fase, SPM, mientras conserva la coherencia temporal del pulso, de modo que el pulso en una salida de la sección de ensanchamiento espectral (150, 250) tiene un ancho de banda espectral en FWHM de 60 nanómetros o más, y es comprimible hasta un ancho de pulso temporal correspondiente al límite de Fourier de su
- 20 ancho de banda espectral,

en donde la fibra microestructurada de ANDi (151, 251) tiene una longitud de 1 metro o menos, una dispersión de retardo de grupo normal y una dispersión de velocidad de grupo normal, siendo dicha dispersión de velocidad de grupo inferior a 0 ps/nm/km y superior a -30 ps/nm/km en todo el intervalo de longitudes de onda comprendido dentro de

25 ± 150 nm de una longitud de onda central de emisión λ_c de la fuente de semilla de láser de fibra (110, 210).

12. El método de la reivindicación 11, en donde la amplificación del pulso estirado se realiza independientemente de la compresión del pulso, en donde la fibra óptica activa dopada (131) es una fibra activa dopada con iterbio que tiene una dispersión de retardo de grupo normal y en donde la compresión de pulsos se realiza a través de una fibra microestructurada de núcleo hueco (141) que tiene una dispersión de retardo de grupo anómala.

30

13. El método de la reivindicación 11, en donde tanto la amplificación como la compresión temporal del pulso se realizan a través de dicha fibra activa dopada (231), siendo esta última una fibra activa dopada con iterbio que tiene una dispersión de retardo de grupo normal.

35

14. Uso del sistema de configuración de todo fibras de la reivindicación 1 a 10 en aplicaciones de excitación multifotónica, microscopía multifotónica, técnica de corriente transitoria mediante la absorción de dos fotones, TCT-TPA, generación de ondas de terahercios, generación de peines de frecuencia, espectroscopia de peine de frecuencia, metrología de tiempo y frecuencia, calibración de espectrógrafos astronómicos, generación de pulsos de

40 attosegundos, generación de formas de onda arbitrarias de radiofrecuencia y comunicaciones ópticas.

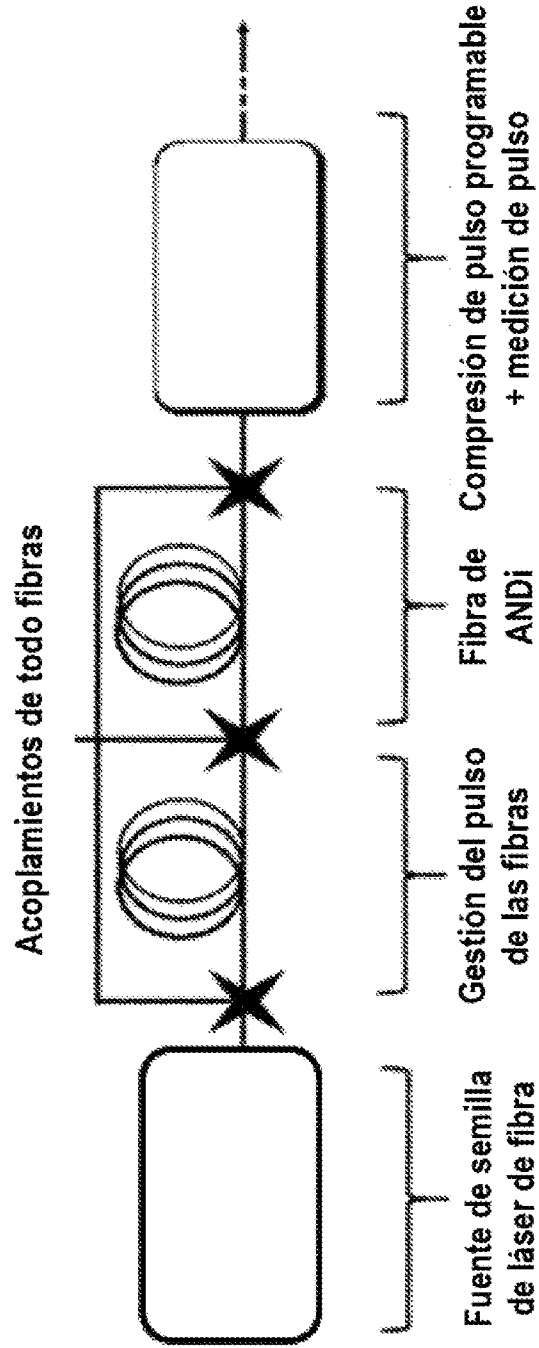


Fig. 1

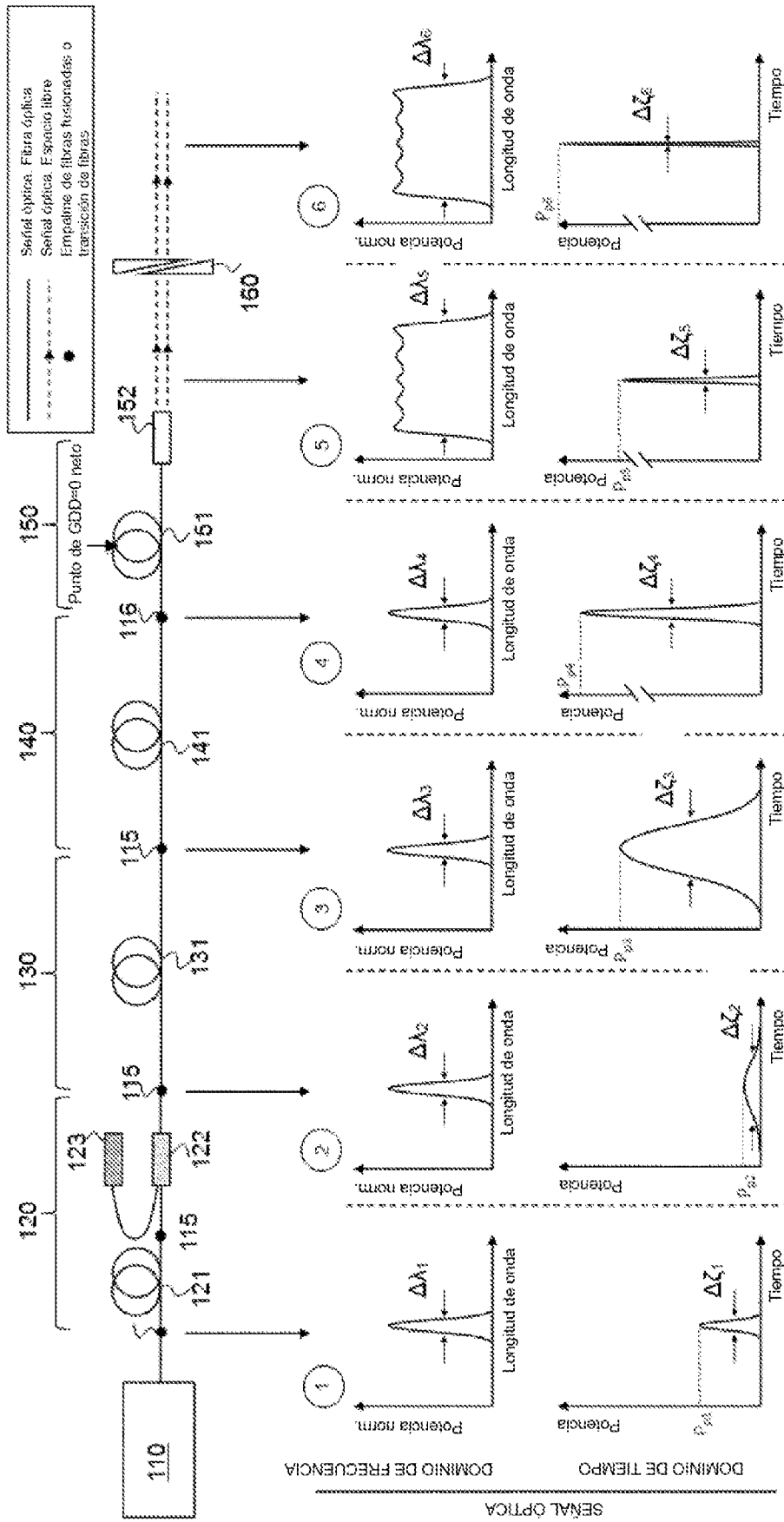


Fig. 2

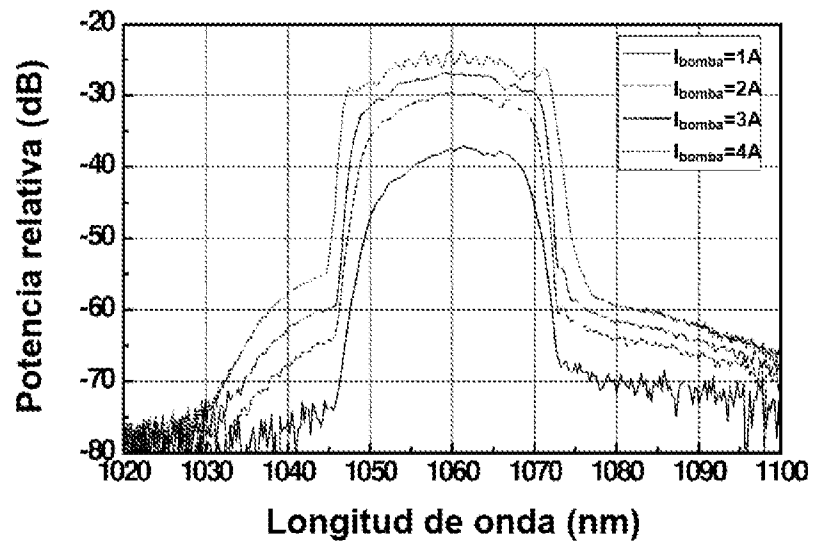


Fig. 3A

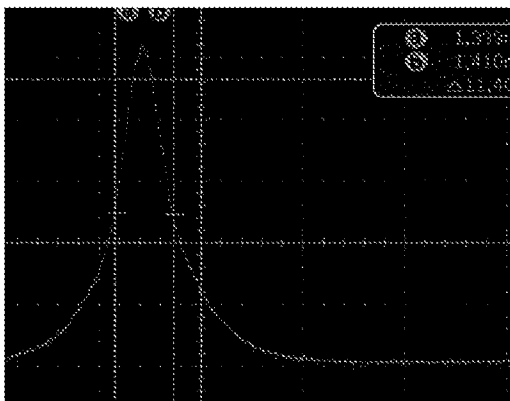


Fig. 3B1

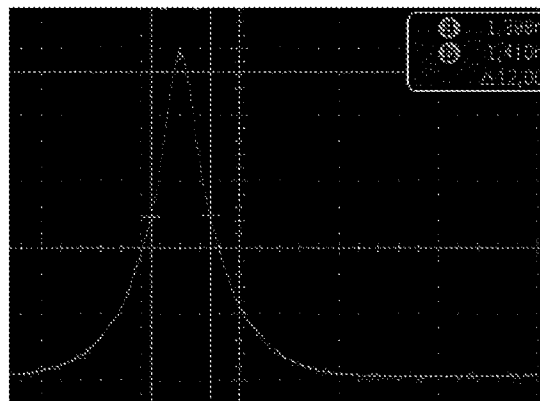


Fig. 3B2

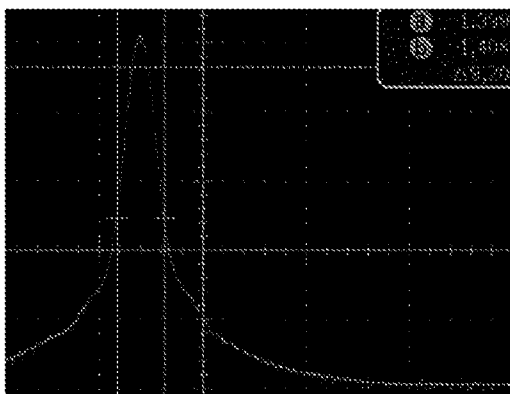


Fig. 3B3

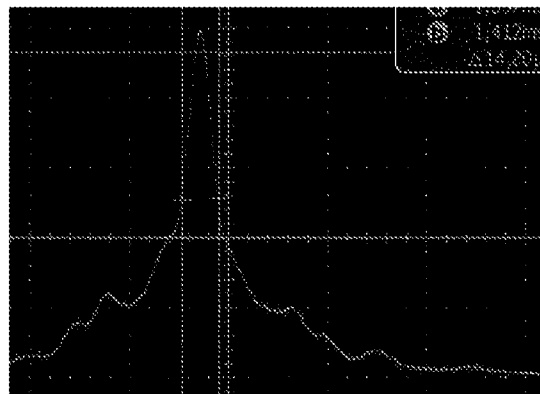


Fig. 3B4

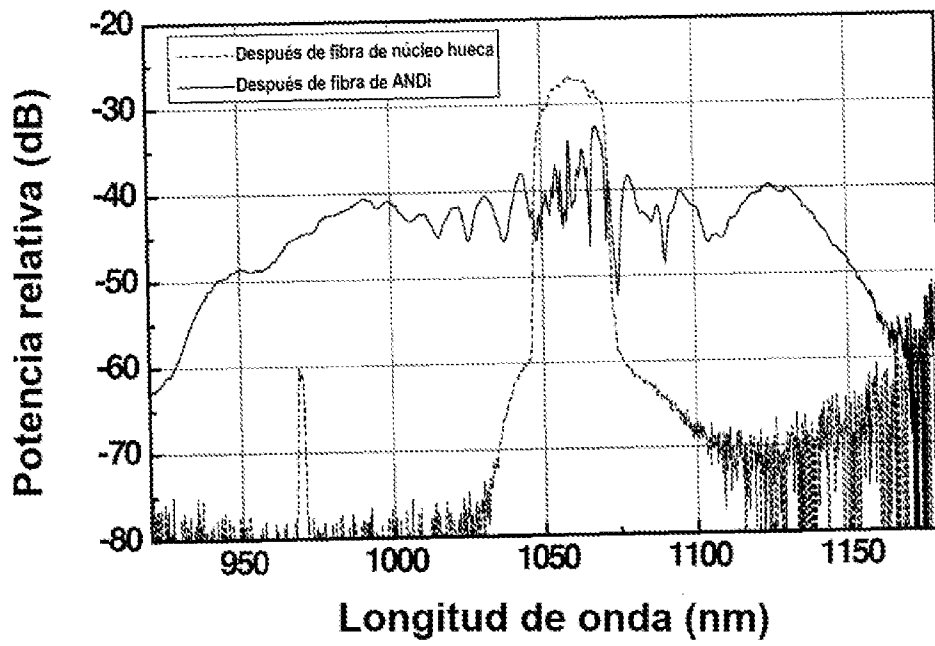


Fig. 4A

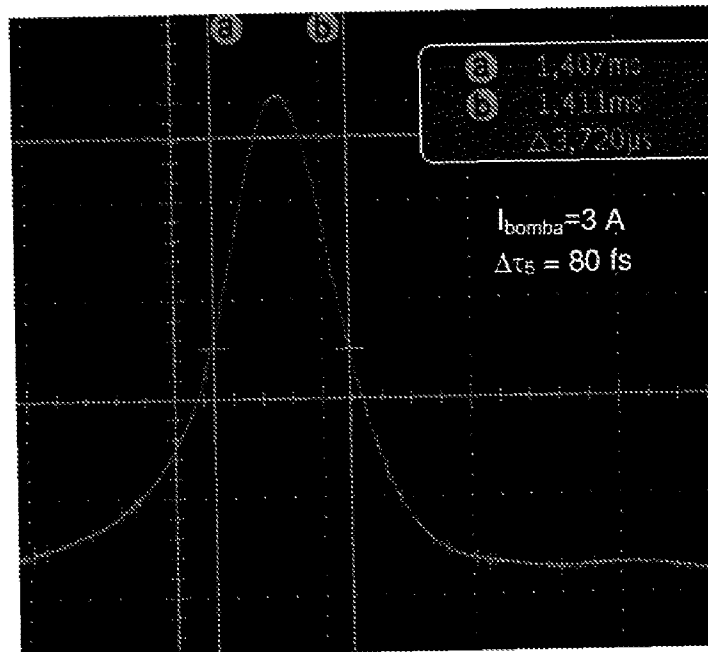


Fig. 4B

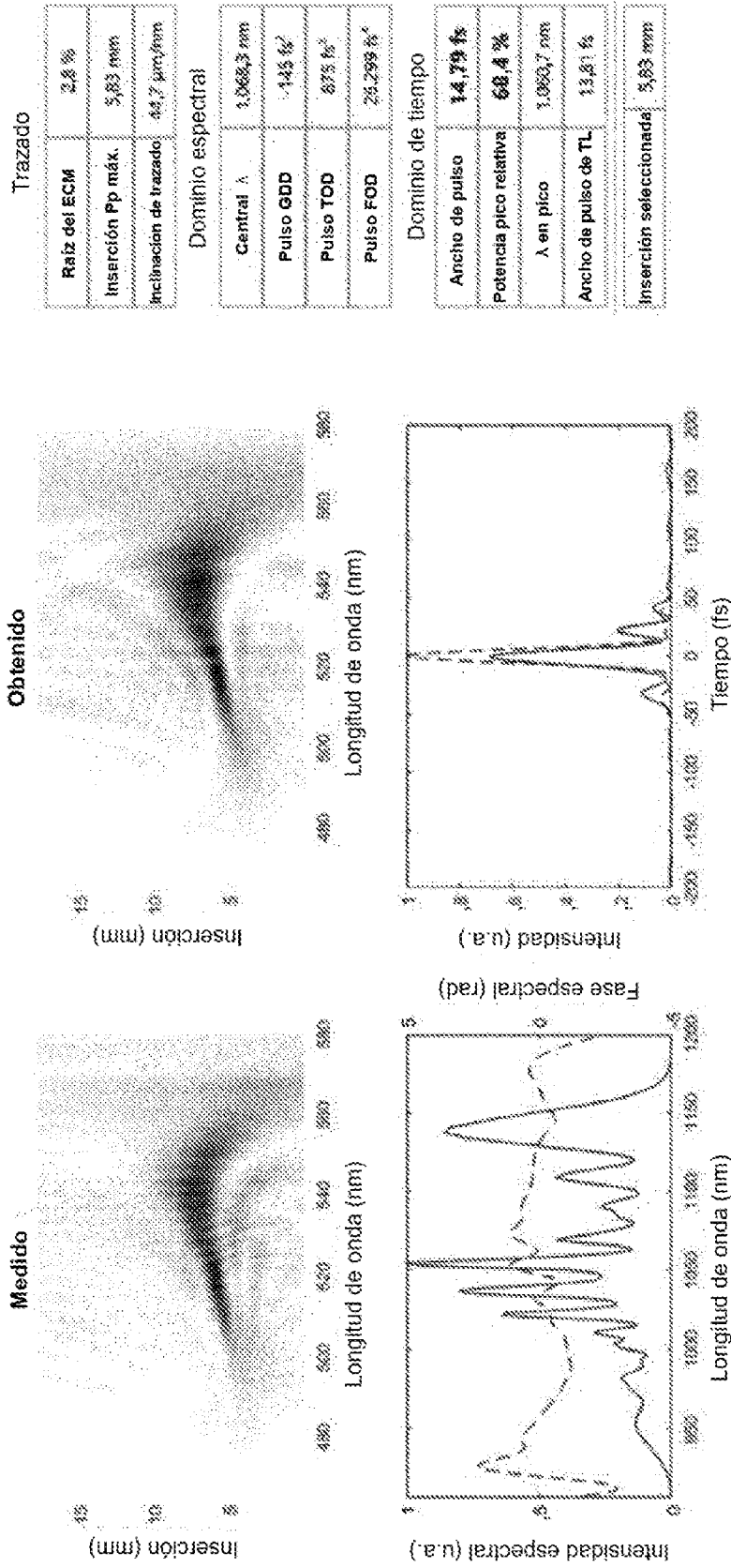


Fig. 5

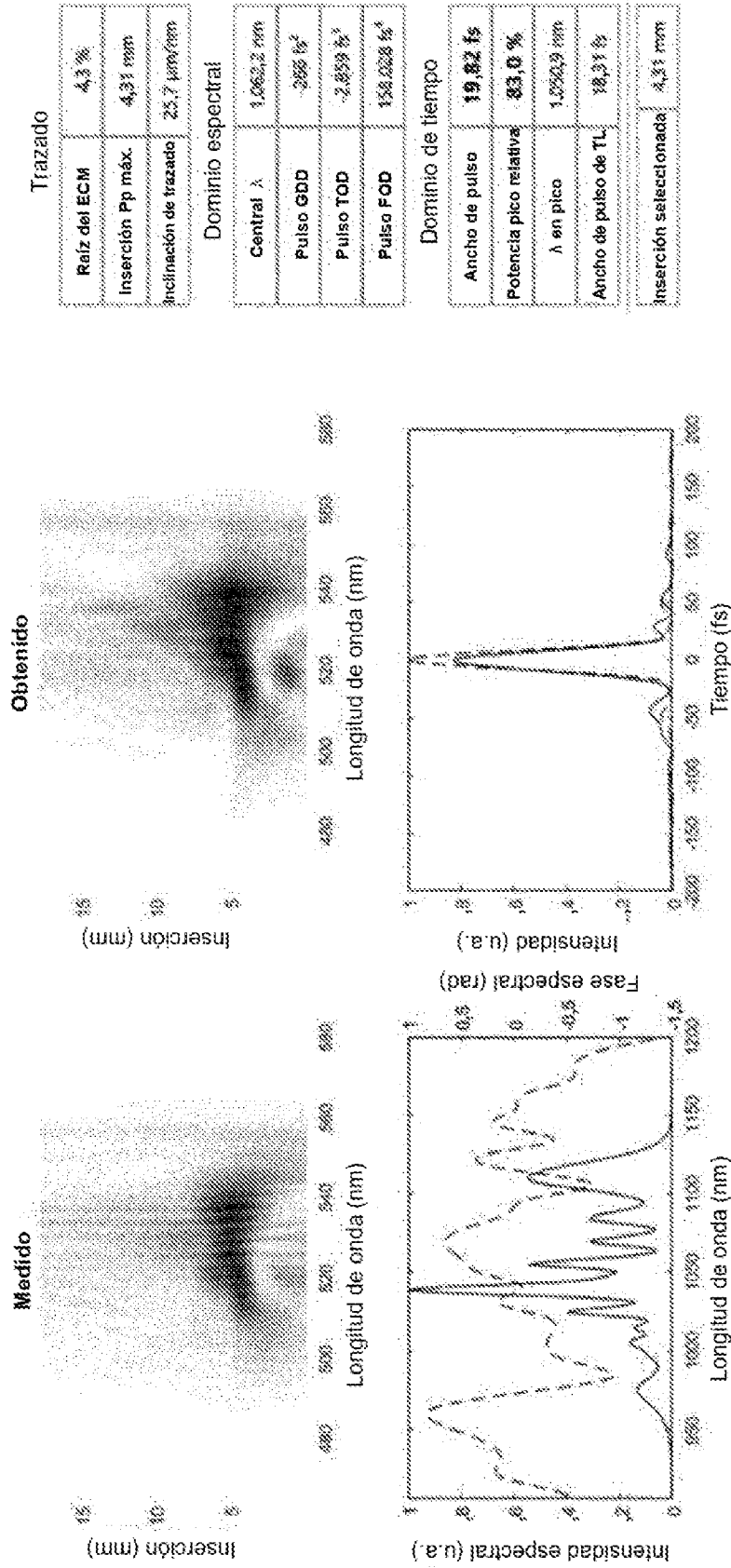


Fig. 6A

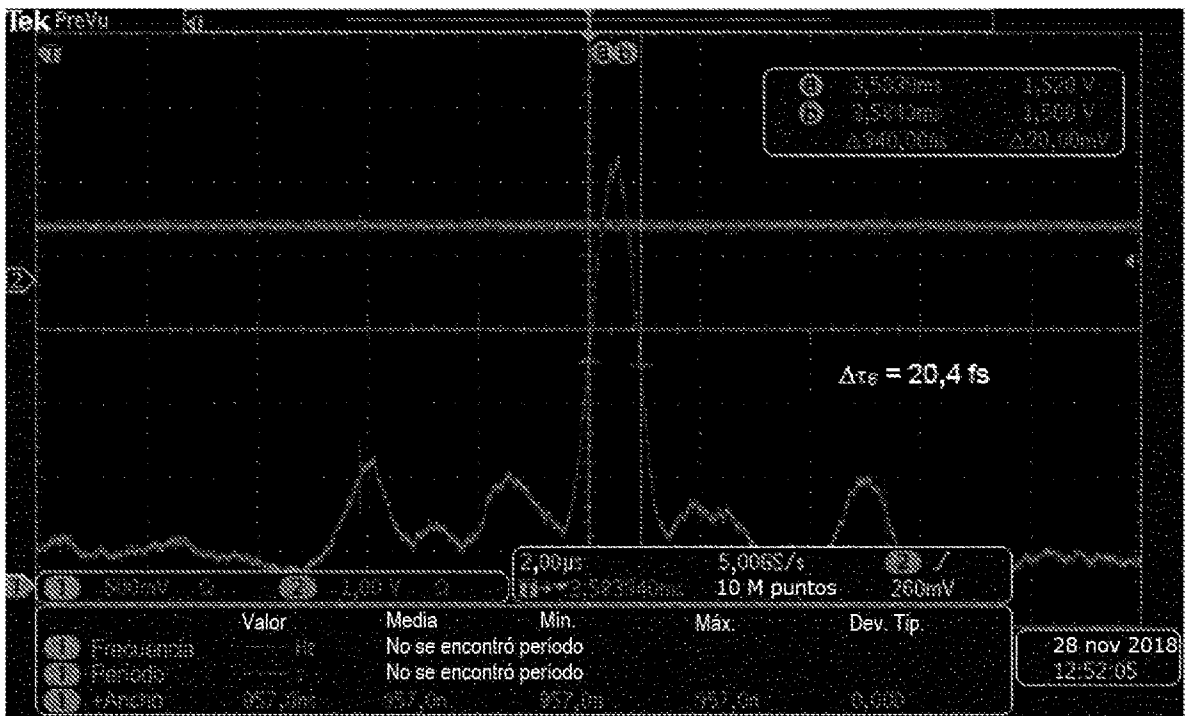


Fig. 6B

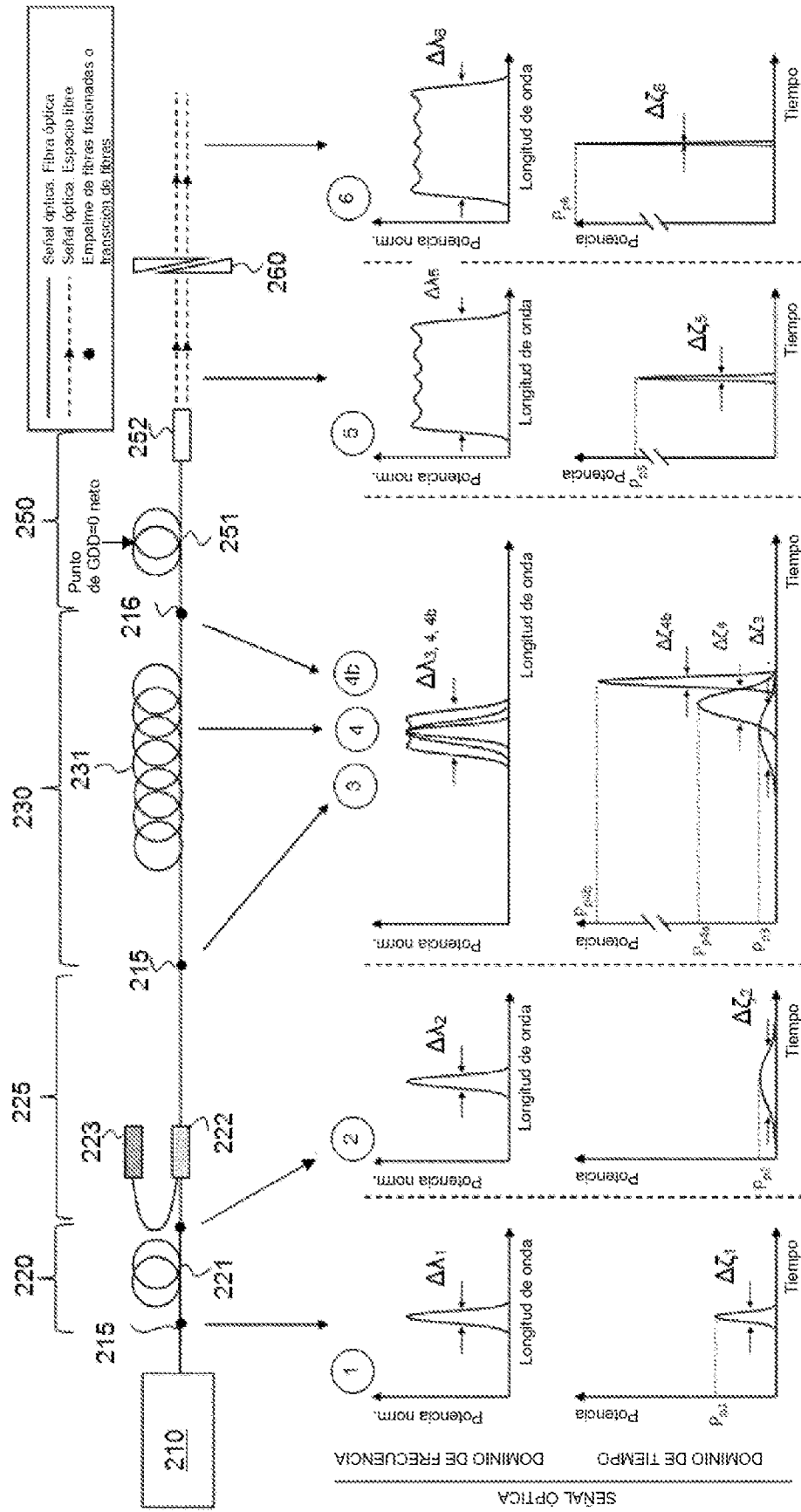


Fig. 7

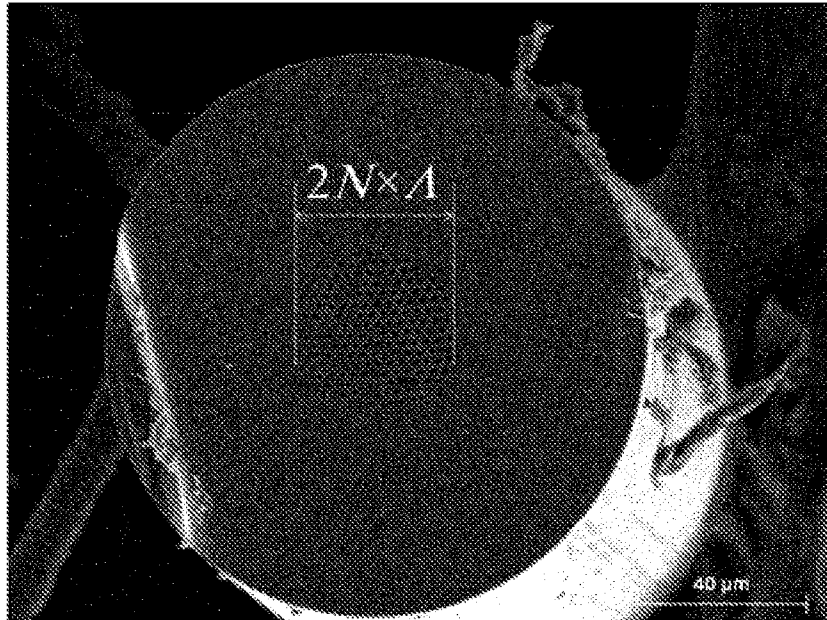


Fig. 8A

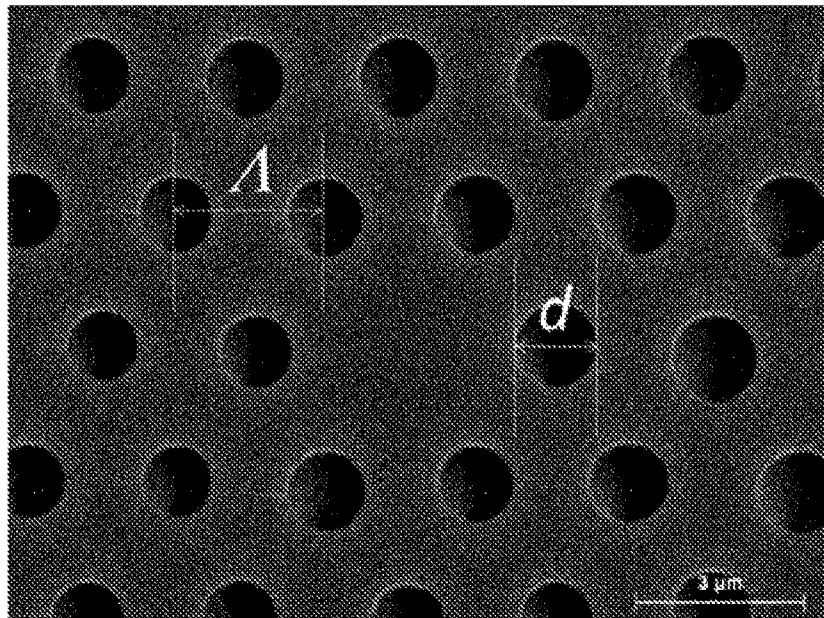


Fig. 8B

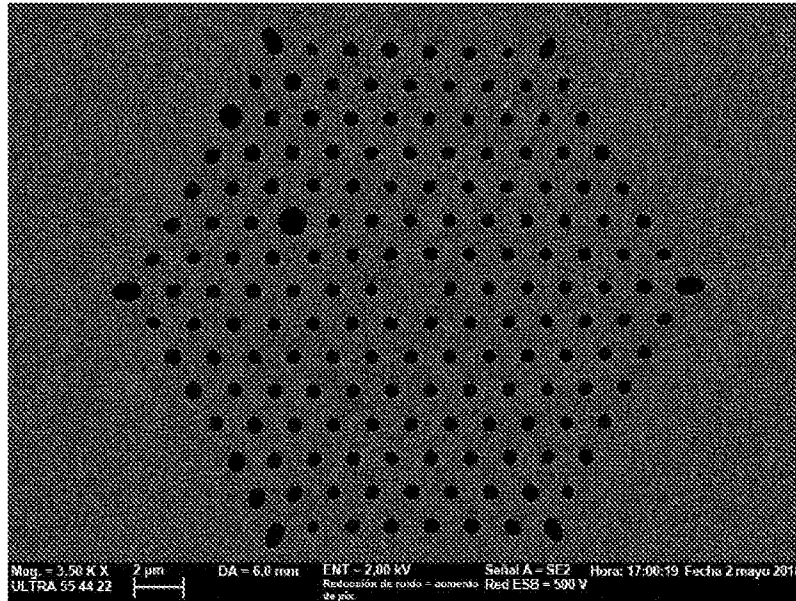


Fig. 9A

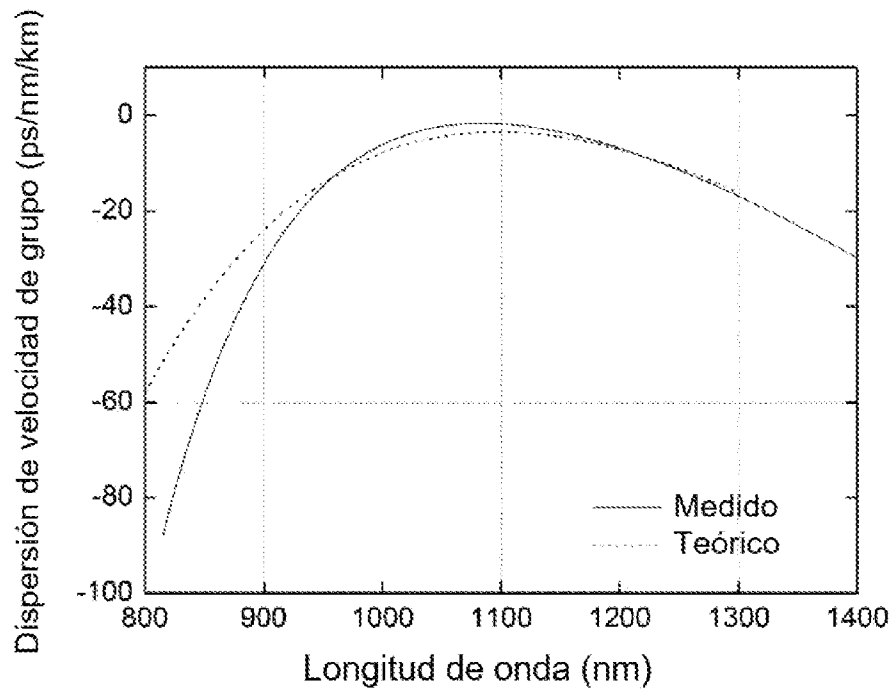


Fig. 9B

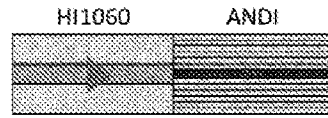


Fig. 10A

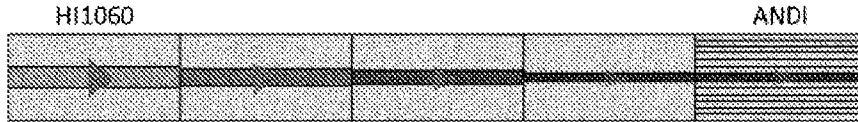


Fig. 10B

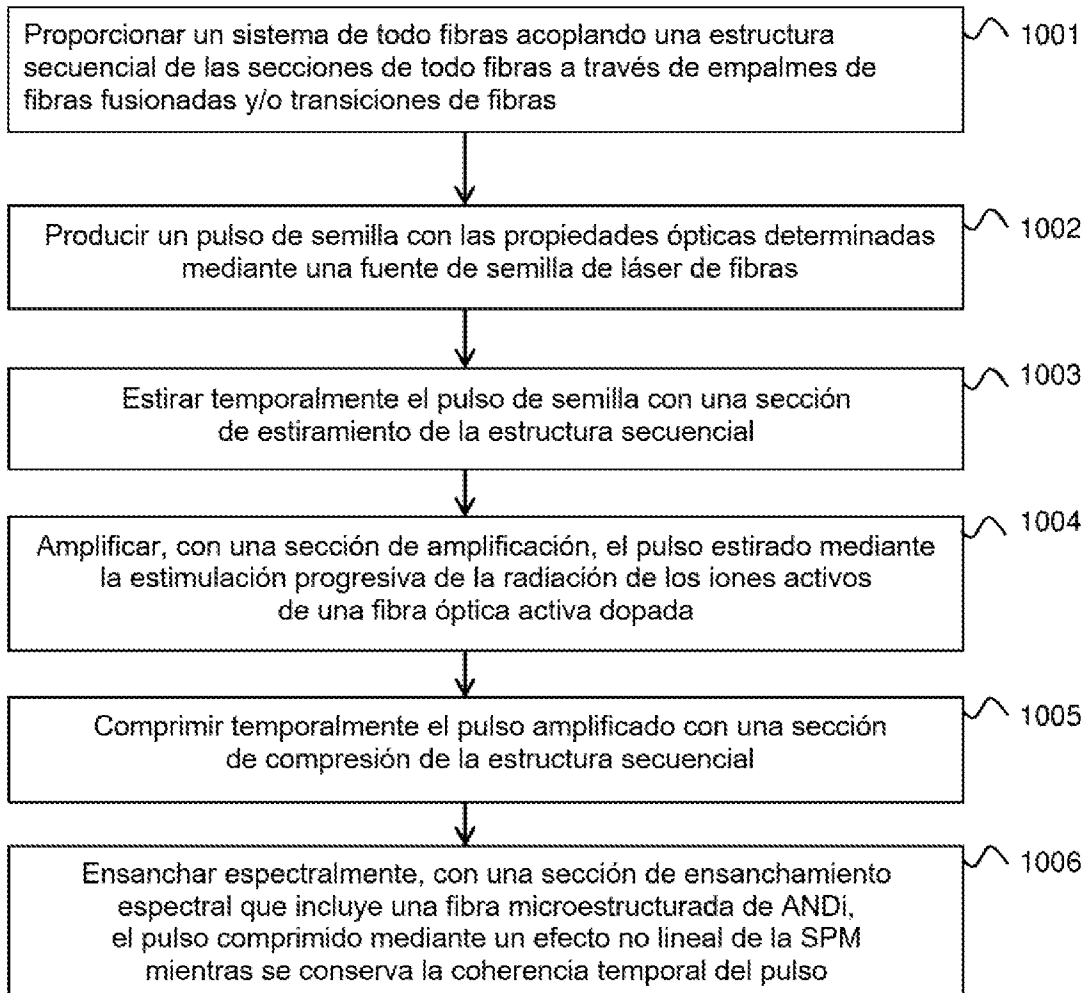


Fig. 11