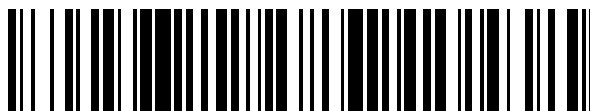


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 742 033**

51 Int. Cl.:

G02F 1/35

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **30.05.2013** **PCT/DK2013/050167**

87 Fecha y número de publicación internacional: **05.12.2013** **WO13178232**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.05.2013** **E 13797223 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **24.07.2019** **EP 2992384**

54 Título: **Una fuente de luz de supercontinuo, un sistema y un método de medición**

30 Prioridad:

01.06.2012 DK 201200378

13.06.2012 US 201261659222 P

18.12.2012 DK 201270792

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

12.02.2020

73 Titular/es:

NKT PHOTONICS A/S (100.0%)

Blokken 84

3460 Birkerød, DK

72 Inventor/es:

THOMSEN, CARSTEN L.;

ANDERSEN, THOMAS VESTERGAARD y

FEUCHTER, THOMAS

74 Agente/Representante:

SÁEZ MAESO, Ana

ES 2 742 033 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

Una fuente de luz de supercontinuo, un sistema y un método de medición

Campo técnico

5 La presente invención se refiere a un sistema de medición óptica que comprende una fuente de luz de supercontinuo que comprende una fuente de luz de supercontinuo (SC) intermedia y una unidad de acoplamiento monomodo. El sistema de medición es, por ejemplo, un sistema en el que una muestra a medir o de otra manera analizada se ilumina con luz que se origina en dicha fuente de luz de supercontinuo, donde el sistema de medición está dispuesto para permitir la detección de la luz de la muestra. La invención también se refiere a un método para medir al menos un parámetro en un objeto del sistema de medición.

10 Antecedentes de la técnica

Los sistemas de medición óptica existen en muchas variaciones. Común a estos sistemas es que un haz de luz se dirige a la muestra y la luz se captura de la muestra. La luz capturada puede ser luz reflejada desde la muestra, transmitida a través de la muestra y/o luz emitida desde la muestra en respuesta al haz entrante, tal como fluorescencia.

15 El supercontinuo (SC) de ancho de banda de octava se ha generado con éxito directamente a través de fibras no lineales, como fibras microestructuradas, fibras estándar cónicas y fibras microestructuradas cónicas bombeando la fibra con láseres pulsados (a menudo en una configuración MOPA) como entrada. Dicha fuente continua espectralmente amplia es potencialmente útil en muchos sistemas de medición, como la tomografía de coherencia óptica (OCT), la metrología de frecuencia óptica, la microscopía fluorescente, la microscopía coherente de dispersión anti-Stokes Raman (CARS) y la microscopía de fluorescencia de dos fotones. Desafortunadamente, para esos experimentos, las grandes fluctuaciones de amplitud de las fuentes continuas convencionales limitan la precisión y/o sensibilidad. Estudios previos de generación SC han demostrado que el proceso de generación SC es muy sensible al ruido cuántico, al ruido técnico y a parámetros específicos como la longitud de onda de entrada, la duración del tiempo y el chirrido de los pulsos láser de entrada. Una fuente de luz derivada de un continuo estable
25 generalmente mejoraría la utilidad de las fuentes SC.

La generación del continuo en holey convencional, cristal fotónico o fibras largas monomodo cónicas es compleja y puede contener subestructuras significativas en los dominios de tiempo y frecuencia que conducen a ruidos e inestabilidad no deseados y distribuidos de manera desigual para diferentes regiones de longitud de onda. Por lo general, la amplitud del continuo muestra grandes fluctuaciones con un exceso significativo de ruido de fondo blanco, que puede revelarse con un detector rápido y una medición del analizador de espectro de RF (RFSA).
30

Un enfoque común para la conversión de longitud de onda es generar un supercontinuo, luego cortar espectralmente parte del continuo y usar este corte como fuente de luz para la configuración de la microscopía. Sin embargo, el continuo seleccionado probablemente contiene grandes fluctuaciones de amplitud (ruido), que pueden no ser adecuadas para algunas aplicaciones.

35 En la Patente de los Estados Unidos 7,403,688, el ruido de la fuente de SC se reduce reduciendo la fibra no lineal y utilizando una fuente de pulso de femtosegundo, que da lugar a la llamada fisión de solitones. El resumen de esta patente establece: "La variación longitudinal de las condiciones de adaptación de fase para la radiación de Cherenkov (CR) y la mezcla de cuatro ondas (FWM) introducidas por DMM permiten la generación de supercontinuo de bajo ruido". El estrechamiento requiere una técnica de procesamiento posterior o una variación del diámetro de la fibra durante la producción, lo que puede complicar la producción de la fuente de luz SC, y la pequeña sección transversal de un cono puede limitar la cantidad de luz, que puede transmitirse de manera segura. Además, las fuentes de bomba de femto-segundo son a menudo relativamente complejas y caras.
40

En el documento US2011/0116282, un aparato de fuente de luz que tiene una estructura base capaz de generar luz SC y que además tiene una estructura que permite la conformación de la forma de onda espectral de la luz SC, Se describe el ajuste de potencia de la luz SC, o el ajuste de la frecuencia de repetición del tren de pulsos que contiene la luz SC. El aparato de fuente de luz del documento US2011/0116282 comprende una fibra SC bombeada a longitudes de onda de aproximadamente 1550 nm y la frecuencia de repetición de un tren de pulsos ópticos SC desde la fuente de luz se encuentra entre 1 MHz o más, pero a 100 MHz o menos. En todo el documento US2011/0116282 el ruido solo se discute en relación con los pulsos individuales, y se describe que la característica de ruido de la luz P1 de pulso no está influenciada. En relación con la característica de ruido del tren P2 de pulsos ópticos SC, se menciona que la detección de bajo ruido es posible a través de la sincronización con un detector óptico dispuesto fuera del aparato de fuente de luz. Los espectros de ruido de una fuente de luz SC que utilizan diferentes longitudes de onda de la bomba difieren y, por lo tanto, la supresión de ruido puede diferir. El documento US2011/0116282 se refiere a trenes P1 de pulsos de femtosegundos. Dichas fuentes de bombeo a menudo son
45
50
55 relativamente complejas y caras.

Divulgación de la invención

En vista de lo anterior, un objeto de la presente invención es proporcionar un sistema de medición con una fuente de luz de supercontinuo de bajo ruido y ventajosamente una fuente de luz de supercontinuo con un impacto reducido de ruido en el supercontinuo generado (SC). La fuente de luz de supercontinuo es adecuada para su uso en un sistema de medición óptica.

- 5 En una realización, la invención se refiere a un sistema adecuado para medir al menos un parámetro en un objeto, comprendiendo dicho sistema la fuente de luz del supercontinuo, y además también es un objeto proporcionar un método de medición usando el sistema.

Estos y otros objetos han sido resueltos por la invención o realizaciones de esta como se define en las reivindicaciones y como se describe a continuación en el presente documento.

- 10 Se ha encontrado que la invención y sus realizaciones tienen una serie de ventajas adicionales que serán claras para el experto en la siguiente descripción.

El sistema de medición es como se define en la reivindicación 1.

- 15 La fuente de luz del supercontinuo comprende una salida de fuente de luz, una fuente intermedia de luz del supercontinuo y una unidad de acoplamiento monomodo, en el que dicha fuente intermedia de luz del supercontinuo comprende

a. un láser semilla dispuesto para proporcionar pulsos semillas con una frecuencia de pulso F_{semilla} ;

b. un multiplicador de frecuencia de pulso (PFM) dispuesto para multiplicar los pulsos semillas y convertir los F_{semilla} en pulsos de bombeo con una de frecuencia de pulso F_{bomba} , donde F_{bomba} es más grande que F_{semilla} ;

- 20 c. un elemento no lineal dispuesto para recibir dichos pulsos de bomba y convertir dichos pulsos de bomba en una luz de supercontinuo proporcionada como salida de dicho elemento no lineal y que tiene un espectro de supercontinuo que abarca desde aproximadamente λ_1 a aproximadamente λ_2 donde $\lambda_1 - \lambda_2 >$ aproximadamente 500 nm.

- 25 La salida del elemento no lineal se acopla a la unidad de acoplamiento monomodo para proporcionar una salida de la unidad de acoplamiento monomodo, y la salida de la fuente de luz comprende la salida de la unidad de acoplamiento monomodo. La unidad de acoplamiento monomodo está dispuesta ventajosamente para amortiguar y dar forma a dicho espectro supercontinuo a partir de dicho elemento no lineal. La bomba es al menos aproximadamente 150 MHz, como al menos aproximadamente 200 MHz, como al menos aproximadamente 300 MHz, como al menos aproximadamente 400 MHz, como al menos aproximadamente 500 MHz, como al menos aproximadamente 600 MHz, como al menos aproximadamente 700 MHz, como al menos aproximadamente 800 MHz, como al menos aproximadamente 1 GHz.

- 30 En una realización preferida del multiplicador de frecuencia, dicha unidad de acoplamiento monomodo está dispuesta para recibir dicha luz de supercontinuo y darle forma espectral de manera que el espectro de salida de dicha unidad de acoplamiento monomodo se extiende desde λ_3 a λ_4 , donde $\lambda_3 - \lambda_4 > 0$, $\lambda_1 \geq \lambda_3$ y $\lambda_2 \leq \lambda_4$, y en el que la salida del espectro de salida de forma espectral de la unidad de acoplamiento monomodo es diferente del espectro en el rango de longitud de onda de λ_1 a λ_2 de la fuente intermedia de supercontinuo.

- 35 Se ha encontrado que la fuente de luz de supercontinuo del sistema de medición de la presente invención tiene un bajo nivel de ruido que da como resultado una fuente de luz de supercontinuo altamente mejorada. El término "bajo nivel de ruido" se toma aquí para significar ruido promedio significativamente más bajo de lo que hubiera sido posible con la fuente SC de luz blanca de la técnica anterior que funciona a un nivel de potencia comparable de potencia de salida en el rango espectral, como significativamente menor de lo que hubiera sido posible con una fuente de luz de supercontinuo de la técnica anterior que funciona a un nivel de potencia comparable de potencia de salida y por encima del régimen de fisión en solitones, por ejemplo, cuando la fuente se aplica en el sistema de medición.

- 40 El láser semilla de la fuente intermedia de luz de supercontinuo puede ser, por ejemplo, un láser de fibra de modo bloqueado, preferiblemente de modo bloqueado a través de un SESAM, preferiblemente el medio de ganancia de dicho láser de fibra se selecciona de una fibra dopada con YtYb, una fibra dopada con Er y una fibra dopada con Er/Yb.

- 45 En una realización, el rango de longitud de onda " λ_3 - λ_4 " es mayor que aproximadamente 100 nm, como mayor que aproximadamente 200 nm, como mayor que aproximadamente 300 nm o como mayor que aproximadamente 500 nm. En una realización, la longitud de onda λ_4 es menor de aproximadamente 1000 nm, como menor de aproximadamente 900 nm, como menor de aproximadamente 800 nm, como menor de aproximadamente 700 nm o como menor de aproximadamente 600 nm. En una realización, λ_3 es mayor que aproximadamente 1070 nm, como mayor que aproximadamente 1100 nm, como mayor que aproximadamente 1200 nm o como mayor que aproximadamente 1300 nm.

- En una realización, la unidad de acoplamiento monomodo comprende uno o más de los siguientes: un prisma, un filtro óptico de paso bajo, un filtro óptico de paso alto, un filtro óptico de paso de banda y una fibra monomodo. Ventajosamente, la unidad de acoplamiento monomodo está dispuesta para dar forma al espectro desde la fuente de luz de supercontinuo intermedia en un espectro gaussiano, un espectro de pico doble o un espectro superior plano.
- En una realización, la amortiguación del espectro supercontinuo en dicha unidad de acoplamiento monomodo viene dada por un factor de amortiguación de potencia óptica y, dicho factor de amortiguación de potencia óptica y es una medida de la amortiguación de potencia óptica dentro del intervalo de longitud de onda de λ_4 a λ_3 , en el que dicho factor de amortiguación de potencia óptica y es mayor que aproximadamente 2, como mayor que aproximadamente 3, como mayor que aproximadamente 4, como mayor que aproximadamente 6, como mayor que aproximadamente 8, como mayor que aproximadamente 10.
- En una realización, la unidad de acoplamiento monomodo comprende al menos uno de los siguientes para llevar a cabo dicha amortiguación: i) desalineación o desajuste de la salida del elemento no lineal a la unidad de acoplamiento monomodo; ii) pérdida de empalme en la entrada y/o salida de la unidad de acoplamiento monomodo; y iii) un filtro de atenuación de banda ancha, tal como un filtro de densidad neutra o un divisor de haz de banda ancha.
- En una realización, la unidad de acoplamiento monomodo comprende una entrada para el acoplamiento al elemento no lineal; un elemento dicróico en la entrada de la unidad de acoplamiento monomodo, estando dispuesto dicho elemento dicróico para transmitir longitudes de onda por debajo de una longitud de onda umbral λ_5 , en el que $\lambda_5 > \lambda_3$; al menos uno de los siguientes: un prisma, un filtro óptico de paso bajo, un filtro óptico de paso alto o un filtro óptico de paso de banda; y una fibra monomodo, cuya salida es la salida de la unidad de acoplamiento monomodo. Ventajosamente, el elemento dicróico es una fibra monomodo, siendo dicha fibra monomodo una fibra de índice escalonado o una fibra microestructurada que comprende microestructuras en forma de aire o material de vidrio de bajo índice.
- En una realización, la potencia óptica total en la salida de dicha unidad de acoplamiento monomodo es inferior a aproximadamente 100 mW, como inferior a aproximadamente 50 mW, como inferior a aproximadamente 30 mW, como inferior a aproximadamente 20 mW.
- En una realización, el láser semilla está dispuesto para proporcionar pulsos semilla con duración t_{semilla} del pulso, siendo dicha duración t_{semilla} del pulso mayor de aproximadamente 0.1 ps. como más de aproximadamente 0.25 ps, tal como más de aproximadamente 0.5 ps, tal como más de aproximadamente 0.75 ps, tal como más de aproximadamente 1 ps, tal como más de aproximadamente 2 ps, tal como más de aproximadamente 3 ps, tal como más de aproximadamente 5 ps, tal como más de aproximadamente 10 ps, tal como más de aproximadamente 20 ps, tal como más de aproximadamente 50 ps, tal como más de aproximadamente 100 ps, tal como más de aproximadamente 200 ps, tal como más de aproximadamente 300 ps, tal como más de aproximadamente 400 ps, tal como más de aproximadamente 500 ps, tal como más de aproximadamente 1 ns.
- En una realización, el láser semilla está dispuesto para proporcionar pulsos semilla con duración t_{semilla} del pulso, en el que dicha duración t_{semilla} del pulso es más corta que aproximadamente 1 us, tal como más corta que aproximadamente 500 ns, tal como más corta que aproximadamente 200 ns, tal como más corta que aproximadamente 100 ns, tal como más corta que aproximadamente 50 ns, tal como más corta que aproximadamente 20 ns, tal como más corta que aproximadamente 10 ns, tal como más corta que aproximadamente 1 ns, tal como más corta que aproximadamente 500 ps, tal como más corta que aproximadamente 100 ps, tal como más corta que aproximadamente 50 ps, tal como más corta que aproximadamente 25 ps, tal como más corta que aproximadamente 20 ps, tal como más corta que aproximadamente 15 ps, tal como más corta que aproximadamente 10 ps.
- Ventajosamente, el elemento no lineal es una fibra óptica, tal como una fibra microestructurada cónica y/o no cónica.
- En una realización, la fuente de luz de supercontinuo intermedia comprende un compresor de pulso, tal como una fibra PBG, estando dispuesto dicho compresor de pulso para recibir los pulsos desde dicho multiplicador de frecuencia de pulso (PFM) y para emitir pulsos comprimidos en el tiempo a dicho elemento no lineal. Ventajosamente, la fuente de luz de supercontinuo intermedia es una fuente de luz incoherente.
- El sistema es adecuado para medir al menos un parámetro de un objeto, comprende la fuente de luz de supercontinuo, y está dispuesta para iluminar el objeto a medir con al menos parte de una salida de dicha unidad de acoplamiento monomodo, como la parte principal, tal como al menos aproximadamente el 90%, de toda la salida de dicha unidad de acoplamiento monomodo, el sistema además comprende un detector para detectar luz de dicho objeto.
- Debido a la fuente de luz de supercontinuo que comprende una fuente intermedia de luz de supercontinuo de bajo ruido, se logra un sistema de medición óptica muy preciso.

El objeto puede ser parte de un cuerpo humano o animal, como un ojo de mamífero o cualquier parte de este. De este modo, son posibles mediciones in vivo y/o in vitro de partes del cuerpo humano o animal.

Ventajosamente, el detector tiene un tiempo de integración superior a $50/F_{\text{bomba}}$, tal como más de $100/F_{\text{bomba}}$, tal como más de $200/F_{\text{bomba}}$, tal como más de $500/F_{\text{bomba}}$, tal como más de $1000/F_{\text{bomba}}$, tal como más de $5000/F_{\text{bomba}}$.

- 5 En una realización, el sistema de medición es un sistema de medición en modo de reflexión dispuesto para medir la luz reflejada desde dicho objeto, tal como un sistema basado en interferometría de luz blanca, tal como tomografía de coherencia óptica (OCT). Ventajosamente, el sistema se basa en el dominio del tiempo, el dominio de la frecuencia o fuente OCT de barrido.
- 10 En un ejemplo, el sistema de medición se utiliza para el diagnóstico de la degeneración macular relacionada con la edad (DMAE), la retinopatía diabética o el glaucoma.
En un ejemplo, el sistema de medición se utiliza para el diagnóstico en relación con el tratamiento para corregir las correcciones oculares refractivas, como, por ejemplo, cirugía ocular con láser para corregir las condiciones oculares refractivas (LASIK). En un ejemplo, el sistema de medición se usa para medir los límites de la capa de Bowman dentro de un ojo humano.
- 15 El método de la invención para medir al menos un parámetro de un objeto a medir comprende proporcionar un sistema de medición óptica de la invención; iluminar el objeto a medir con al menos parte de una salida de dicha unidad de acoplamiento monomodo de la fuente de luz de supercontinuo, tal como toda la salida de dicha unidad de acoplamiento monomodo; y detectar luz de dicho objeto por el detector.
- 20 Debido a la alta precisión del sistema de medición óptica, el objeto es ventajosamente una parte de un cuerpo humano o animal, como un ojo de mamífero o una parte de este. De este modo, son posibles mediciones in vivo y/o in vitro de partes del cuerpo humano o animal.
A continuación, la invención se describirá en relación con fibras no lineales a base de sílice; sin embargo, como será claro para la persona experta, la invención también incluirá fuentes SC basadas en otros tipos de elementos no lineales tales como fibras basadas en otros materiales (como por ejemplo polímeros, calcogenuro y vidrios de fluoruro), guías de onda planas no lineales y fibras de núcleo hueco rellenas de gas. En relación con los parámetros de fibra basados en sílice, el material y/o los parámetros basados en guías de onda, como, por ejemplo, dispersión y no linealidad, deberán ajustarse en consecuencia.
- 25 Típicamente, SC se genera aplicando una fuente de luz de bomba pulsada dispuesta para bombear una fibra no lineal, tal como una fibra no lineal como se discutió anteriormente. Los procesos no lineales en el elemento no lineal convierten los pulsos de la bomba en un supercontinuo que sale de la fibra. De particular interés es el caso en el que se proporciona energía de bombeo sustancial a las longitudes de onda en la fibra no lineal que exhibe una dispersión anómala, ya que esto amplía en gran medida el ancho de banda alcanzable. En particular, la generación de supercontinuo basada en la llamada inestabilidad de modulación donde el pulso de la bomba se divide en una serie de pulsos cortos (solitones) que permiten la generación de espectros de supercontinuo eficientes y amplios, según lo descrito por Dudley et al en Rev. Mod. Phys. Vol. 78, número 4, (2006). En el régimen de dispersión normal, la generación del supercontinuo se debe principalmente a la modulación de fase propia (SPM) que requiere una intensidad de pico muy alta para inducir un ensanchamiento espectral significativo (por ejemplo, >100nm de ancho de banda de 10dB).
- 30 Por consiguiente, en una realización, los pulsos de la bomba y la fibra no lineal (es decir, el elemento no lineal) están dispuestos de modo que el espectro supercontinuo se genera principalmente a través de la ruptura inducida por la inestabilidad de modulación (MI) de los pulsos de la bomba, es decir, la mayor parte de la potencia de pulso de entrada se lanza a longitudes de onda situadas en el régimen anómalo, o lo suficientemente cerca como para permitir la ampliación espectral inicial a través de SPM para desplazar una parte sustancial de la potencia al régimen anómalo. Preferiblemente, más del 50% del espectro supercontinuo generado se genera a través de MI y procesos posteriores que involucran los solitones generados por MI, tal como más del 60%, tal como más del 70%, tal como más del 80% como más del 90%, tal como más del 95%, como el 100%. Cualquier luz residual de la bomba que salga del elemento no lineal no se considera parte del supercontinuo generado. En una realización, estos porcentajes se calculan como parte de la potencia total del supercontinuo. En una realización, el porcentaje se calcula como un porcentaje del ancho de banda abarcado por el supercontinuo.
- 35 40 45 50 55 La alta no linealidad de las llamadas Fibras 'Altamente no Lineales (HNLF) es generalmente una consecuencia de secciones transversales relativamente pequeñas que dan lugar a una mayor intensidad de pico, pero lo más importante, la dispersión de estas fibras es típicamente baja y anómala al menos para parte de la longitud de onda y la fibra guiará, por ejemplo, a la longitud de onda de la bomba. El primero asegura una larga duración de interacción no lineal efectiva porque se mantiene la potencia máxima, y el segundo admite la formación de solitones y la ruptura de MI. En una realización, la formación de solitones y la ruptura inducida por MI son mecanismos clave en la generación de luz de banda ultra ancha a partir de fibras no lineales. Otros procesos no lineales, como la

modulación de fase propia, la modulación de fase cruzada, el autoempinamiento, la dispersión Raman, aunque no requieren una dispersión anómala, también juegan un papel importante.

Los pulsos de la bomba y el elemento no lineal pueden estar dispuestos de modo que la longitud de onda central de los pulsos de la bomba esté preferiblemente en el régimen de dispersión normal, pero lo suficientemente cerca del régimen anómalo como para que la ampliación espectral moderada pueda transferir una parte sustancial de la energía de la bomba al régimen anómalo (por ejemplo, mediante SPM o cambio de Raman), tal como más de o igual a ZDW-150nm, tal como más de o igual a ZDW-100nm, tal como más de o igual a ZDW-50nm, tal como más de o igual a ZDW, tal como más de o igual a ZDW+10nm, tal como más de o igual a ZDW+20nm, tal como más de o igual a ZDW+30nm, tal como más de o igual a ZDW+50, tal como más de o igual a ZDW+100nm, tal como más igual o igual a ZDW+150nm. En una realización, la forma del espectro del supercontinuo resultante puede controlarse en gran medida variando la distancia desde la longitud de onda de la bomba hasta el cruce entre la dispersión normal y anómala, la denominada longitud de onda de dispersión cero (ZDW).

El término "energía sustancial de la bomba desplazada hacia la región anómala" significa que más del 30% de la energía del pulso ingresa a la región anómala antes de que el pulso se rompa, tal como más del 50%, tal como más del 60%, tal como más del 70%, tal como más del 80% tal como más del 90%, tal como más del 95%, tal como el 100%.

Según lo descrito por Dudley et al. en "Supercontinuum generation in photonic crystal fiber", Rev. Mod. Phys., Vol. 78, No. 4, (2006) pp.1159-1162, un supercontinuo será incoherente si la inestabilidad de la modulación es el proceso dominante en la ruptura de los pulsos de la bomba. Se puede entender que un supercontinuo incoherente se origina del ruido y, por lo tanto, la estabilidad temporal y espectral de la luz generada se ve comprometida. Según los autores, los pulsos de bomba que tienen un orden (N) de solitones en la fibra de N<10 proporcionan un supercontinuo coherente, mientras que los pulsos de bomba que tienen N>30 proporcionan un supercontinuo incoherente. Los valores de 10≤N≤30 proporcionan una transición entre estos dos estados, donde se puede generar un espectro supercontinuo de manera coherente o incoherente dependiendo de los parámetros exactos de la bomba y la fibra. Aquí el orden de solitones se define como (Ec. 1):

$$N = \sqrt{\frac{\gamma \cdot P_0 \cdot T_0^2}{\beta_2}},$$

donde gamma es la no linealidad de la fibra, P0 es la potencia máxima del pulso, T0 es la longitud del pulso y β₂ es la dispersión de la velocidad del grupo de la fibra en la longitud de onda de la bomba. Por lo tanto, esta ecuación confirma que los pulsos cortos reducen el orden de los solitones proporcionando un supercontinuo más coherente y, por lo tanto, un ruido más bajo.

La coherencia puede reducirse dramáticamente (y el ruido aumenta dramáticamente) cuando N>16. El mayor valor de N hace que la inestabilidad de la modulación, que es una ruptura del pulso inducida por el ruido cuántico, avance más rápido que el proceso determinista de fisión en solitones. Por lo tanto, la transición de la fisión de solitones a la ruptura inducida por MI marca la separación entre bajo ruido/alta coherencia y alto ruido/baja coherencia. En "Generation of a broadband continuum with high spectral coherence in tapered single-mode optical fibers", Fei Lu, et al., Optics Express, 26 de enero de 2004, vol. 2, No. 2, págs. 347-353 (que se menciona en el documento US 7,403,688 y tiene autores correspondientes a los inventores), los pulsos cortos de 50fs proporcionan un N relativamente bajo y el orden de solitones se reduce aún más disminuyendo gradualmente proporcionando una alta coherencia espectral y bajo ruido. En "Generación súper continua para tomografía de coherencia óptica de resolución ultraalta en tiempo real", Proc. de SPIE Vol. 6102, 61020H, (2006) el supercontinuo se genera utilizando pulsos de bombeo de 95fs y se concluye que solo los espectros generados por bombeo en el régimen normal tienen un ruido suficientemente bajo para ser aplicable. Como se señaló anteriormente, dichos espectros están formados por SPM, que es un proceso determinista y, por lo tanto, permite la generación de SC altamente coherente y de bajo ruido.

En una realización, la fibra no lineal es no cónica; sin embargo, en una realización, la presente invención se combina con el efecto de reducción de ruido que se puede obtener mediante reducción gradual. En la Solicitud internacional PCT/DK2011/050328 se describen nuevos tipos de fibras cónicas adecuadas para la generación SC.

Sin embargo, en una realización, la presente invención permite la aplicación de un supercontinuo incoherente o parcialmente incoherente de modo que en una realización la fibra no lineal y los pulsos de la bomba están dispuestos de manera que el orden de solitones de dichos pulsos de la bomba sea sustancialmente mayor o igual a 16, como igual o mayor que 18, como igual o mayor que 20, como igual o mayor que 22, como igual o mayor a 24, como igual o mayor a 26, como igual o mayor a 28, como igual o mayor a 30, como igual o mayor a 40, como igual o mayor a 50, igual o mayor a 75, igual o mayor a 100, como igual o mayor a 200, como igual o mayor a 300, como igual o mayor a 400, como igual o mayor a 500. De este modo, el proceso de generación de supercontinuo procede principalmente a través de la inestabilidad de modulación. En una realización, el orden de solitones se define cuando

el pulso se rompe, por ejemplo, después de cambiar al régimen anómalo y/o atravesar una sección cónica de la fibra. En una realización, el orden de solitones se define en la entrada del pulso de la bomba en la fibra.

Comúnmente, el ancho espectral del SC generado depende de la potencia máxima de los pulsos de la bomba, por lo que para pulsos más largos la potencia máxima no puede reducirse arbitrariamente para reducir el orden de solitones. Los pulsos más largos, como los pulsos en el régimen ps o el régimen ns, a menudo son preferibles ya que estos pulsos a menudo permiten un diseño láser de bomba más simple en relación con los láseres fs. Por consiguiente, en una realización, la invención permite la aplicación de duraciones de pulso más largas, tales como la aplicación en la que la duración del pulso es mayor de aproximadamente 0.1 ps, tal como más de aproximadamente 0.25 ps, tal como más de aproximadamente 0.5 ps, tal como más de aproximadamente 0.75 ps, tal como más de aproximadamente 1 ps, tal como más de aproximadamente 2 ps, tal como más de aproximadamente 3 ps, tal como más de aproximadamente 5 ps, tal como más de aproximadamente 10 ps, tal como más de aproximadamente 20 ps, tal como más de aproximadamente 50 ps, tal como más de aproximadamente 100 ps, tal como más de aproximadamente 200 ps, tal como más de aproximadamente 300 ps, tal como más de aproximadamente 400 ps, tal como más de aproximadamente 500 ps, tal como más de aproximadamente 1 ns, tal como más de aproximadamente 10 ns.

Por otro lado, SC generado a partir de un pulso de bombeo muy largo y CW, el bombeo sufre de un mayor ruido. Si bien la presente invención puede reducir la sensibilidad al ruido, también puede ser preferible disminuir el ruido mediante la reducción de la duración del pulso, de modo que, en una realización, el láser semilla está dispuesto para proporcionar pulsos semilla con duración de pulso t_{semilla} , en el que dicha duración de pulso t_{semilla} es más corto que aproximadamente 1 μs , tal como más corto que aproximadamente 500 ns, tal como más corto que aproximadamente 200 ns, tal como más corto que aproximadamente 100 ns, tal como más corto que aproximadamente 50 ns, tal como más corto que aproximadamente 20 ns, tal como más corto que aproximadamente 10 ns, tal como más corto que aproximadamente 1 ns, tal como más corto que aproximadamente 500 ps, tal como más corto que aproximadamente 100 ps, tal como más corto que aproximadamente 50 ps, tal como más corto que aproximadamente 25 ps, tal como más corto que aproximadamente 20 ps, tal como más corto que aproximadamente 15 ps, tal como más corto que aproximadamente 10 ps.

Los intervalos abiertos mencionados anteriormente se pueden combinar para formar intervalos cerrados para la duración del pulso, como la duración del pulso entre 0.1 ps y 1 μs , como entre 0.25 ps y 100 ps, como entre 1 ps y 50 ps.

Como se señaló anteriormente, SC se genera típicamente aplicando una fuente de luz de bombeo pulsada. En la fuente de luz de supercontinuo de la invención, los pulsos de la bomba están provistos de una tasa de repetición, F_{bomba} , que da como resultado una modulación de amplitud del supercontinuo generado con la misma frecuencia, F_{bomba} . Por otro lado, el sistema de medición de la invención aplica típicamente un tiempo de medición, que es más largo que $1/F_{\text{bomba}}$ sobre el cual se integra la medición para que la tasa de repetición no se resuelva y el SC aparezca como radiación CW. Los láseres pulsados que funcionan en el rango de MHz a menudo se denominan "cuasi CW" por ese motivo. Sin embargo, la naturaleza pulsada del supercontinuo reduce el tiempo efectivo de medición donde hay luz presente. Por lo tanto, en una realización, la fuente de luz SC aplica una alta tasa de repetición de modo que F_{bomba} sea de 100 MHz o más, como 150 MHz o más, como 200 MHz o más, como 300 MHz o más, como 400 MHz o más, como 500 MHz o más, como 600 MHz o más, como 700 MHz o más, como 800 MHz o más, como 1 GHz o más.

Como se discutirá más adelante, un sistema láser de bombeo consiste típicamente en un oscilador láser maestro también conocido como láser semilla seguido de uno o más amplificadores ópticos opcionales que aumentan el nivel de potencia de los pulsos del láser semilla, es decir, el láser de bombeo puede comprender una configuración MOPA. Dependiendo del tipo de láser semilla, puede no ser práctico o posible proporcionar tasas de repetición tan altas. El láser de bombeo (también conocido como sistema láser de bombeo) comprende un láser semilla dispuesto para proporcionar pulsos semilla con frecuencia de pulso, F_{semilla} , más bajo que F_{bomba} y uno o más multiplicadores de frecuencia de pulso (PFM) dispuestos para convertir F_{semilla} a F_{bomba} .

Preferiblemente, el multiplicador de frecuencia de pulso de la fuente de luz de supercontinuo comprende un divisor que divide al menos un haz de los pulsos semilla en varios haces secundarios y un primer combinador dispuesto para recombinar al menos algunos de los haces secundarios, preferiblemente el multiplicador de frecuencia de pulso comprende además un atenuador ajustable dispuesto para ajustar al menos uno de los haces secundarios

Un haz aquí significa un tren de pulsos.

El divisor puede ser cualquier tipo de divisor. Tales divisores son bien conocidos en la técnica.

En una realización, el multiplicador de frecuencia de pulso comprende el atenuador ajustable dispuesto para recibir al menos un haz secundario. Preferiblemente, el atenuador ajustable está dispuesto para recibir al menos un haz secundario con una potencia superior a la potencia promedio del haz secundario, opcionalmente, el multiplicador de frecuencia de pulso comprende una pluralidad de atenuadores ajustables, preferiblemente cada uno dispuesto para recibir al menos un haz secundario que tiene pulsos dentro de un rango de potencia de pico seleccionado.

Ventajosamente para reducir significativamente el ruido, el atenuador ajustable está dispuesto para recibir y ajustar los pulsos de al menos un haz secundario a un valor de potencia pico correspondiente al valor de potencia pico de los pulsos de al menos otro haz secundario de manera que los pulsos de los haces secundarios combinados en el primer combinador tengan un valor de potencia pico sustancialmente idéntico.

- 5 En una realización, el multiplicador de frecuencia de pulso está configurado para retrasar al menos uno de los haces secundarios. El retraso de tiempo se puede proporcionar, por ejemplo, organizando primero una ruta desde el divisor hasta el combinador de un haz secundario para que sea más corta que una segunda ruta desde el divisor hasta el combinador de un segundo haz secundario. Preferiblemente, el multiplicador de frecuencia de pulso está configurado para retrasar el tiempo de al menos un haz secundario de manera que los pulsos de los haces secundarios recombinados en el primer combinador estén espaciados, preferiblemente con una separación sustancialmente uniforme.

La figura 1a ilustra la configuración de una fuente 100 de luz de supercontinuo intermedia preferida que está comprendida en la fuente de luz de supercontinuo según la invención. El oscilador maestro (o láser semilla) proporciona una salida a lo largo de la trayectoria 106 del haz. Los componentes están preferiblemente acoplados a fibra, pero también pueden acoplarse a través de óptica de espacio libre. La fuente 100 de luz de supercontinuo intermedia comprende dos amplificadores 102 y 104 de potencia (PA1 y PA2). Como se señaló anteriormente, estos amplificadores son opcionales, pero proporcionan un aumento en la energía del pulso y la potencia máxima en relación con la salida del láser 101 semilla. Los láser 101, PA1 102 y PA4 104 semilla son bombeados cada uno por láser de diodo, sin embargo, otras fuentes de bombeo, como una fuente de energía eléctrica, podrían usarse alternativamente. Se incluye un regulador 105 opcional para ilustrar que la fuente de luz de supercontinuo intermedia puede comprender un sistema de retroalimentación. Un bucle de retroalimentación está formado en esta realización por el fotodiodo 109 que mide una parte de la salida 108 y proporciona uno o más parámetros relacionados con el haz a un punto 114 de decisión, que regula la entrada al elemento 107 no lineal. Tal regulador puede, como ejemplo, estar formado por el atenuador ajustable dispuesto para ajustar la potencia óptica que ingresa al elemento 107 no lineal. La solicitud de patente estadounidense pendiente 12/865,503 (que se incorpora por la presente) discute varias realizaciones de bucles de retroalimentación en fuentes de luz SC (véase, por ejemplo, la figura 1 y las reivindicaciones), tales como ubicaciones alternativas del regulador 105 y el fotodiodo 109, diversas realizaciones del regulador, recolección de haz al fotodiodo y la posibilidad de aplicar una respuesta de retroalimentación a una o más de las fuentes 110-112 de bomba.

El PFM 103 puede colocarse antes del primer amplificador, entre los amplificadores y antes de la fibra no lineal. En una realización, el tren de pulsos satura el amplificador (PA1 y/o PA2) de modo que la potencia máxima de los pulsos fuera del amplificador sea constante, independientemente de su potencia de entrada. En la figura 1, el PFM se coloca entre dos amplificadores de potencia (en este caso, PA1 y PA2). Esto puede ser preferible porque en la mayoría de los casos el PFA redistribuirá la potencia óptica del láser semilla a un mayor número de pulsos y puede tener una pérdida de inserción significativa, de modo que, si los pulsos de salida del láser semilla son relativamente débiles, El PFA puede producir un tren de pulsos con una potencia media demasiado baja para que pueda amplificarse eficientemente en un amplificador posterior. Por esta razón, en una realización es preferible colocar el PFM después de uno o más amplificadores, como entre dos amplificadores. Por otro lado, colocar el PFM después de uno o más amplificadores aumentará la potencia nominal perdida debido a dicha pérdida de inserción. Por esta razón, es preferible colocar el PFM antes de uno o más amplificadores, como entre dos amplificadores. Esto también puede tener el efecto de reducir la potencia máxima de los pulsos que pasan uno o más amplificadores de potencia (u otros componentes en el sistema) que a su vez pueden tener uno o más beneficios, como la no linealidad reducida en el sistema láser de bombeo. Tal no linealidad a menudo tiene el efecto de ampliar los pulsos, lo que puede dar como resultado un nivel de potencia pico reducido en el elemento no lineal, que a su vez puede reducir el ancho espectral del supercontinuo generado. En una realización, se aplican múltiples PFM tales como múltiples PFM separados por un componente óptico tal como un amplificador óptico, atenuador, compresor o filtro.

En una realización, hay un límite superior para la potencia óptica promedio permitida que ilumina el objeto a medir (también denominado muestra). Los ejemplos de tales aplicaciones incluyen aplicaciones en las que el objeto es sensible a la potencia óptica (potencia media y/o potencia máxima) sobre un cierto umbral, que sería el caso para la mayoría de las muestras biológicas, y en particular para partes de un ojo de mamífero, como la retina. Un ejemplo de aplicación donde el objeto es un ojo oftálmico de mamífero incluye imágenes usando OCT para obtener imágenes de la retina o la córnea y microscopía de fluorescencia de fotones múltiples de la retina o la córnea.

En una realización, la salida de la fuente de luz SC o una subsección de esta debe cumplir con uno o más de los estándares láser Clase 1, 1M, 2, 2M, 3R, 3B. En una realización, la potencia de salida de la fuente SC se reduce de modo que la fuente SC en sí misma puede tener un AEL de salida más alto (nivel de emisión aceptable) que las clases citadas anteriormente, como 100% más o más, como 200% más o más, como 400% más o más, como 800% más o más.

En una realización, es deseable un ruido relativamente bajo inducido debido a la longitud del pulso, de modo que la duración del pulso en el rango de 0.5ps-30ps es preferible tal como la duración del pulso en el rango de 1ps-20ps es preferible tal como 2ps-20ps. En una realización, no es deseable una potencia óptica promedio aumentada en relación con los sistemas actuales, de modo que la potencia óptica promedio de la fuente SC es menor que 5 vatios

de salida por duración de pulso ps, como una salida de menos de 3 vatios por pulso ps, como una duración de pulso inferior a 2 vatios por ps, como una duración de pulso inferior a 1 vatio por ps. En una realización, una potencia óptica media total en el rango visible (400nm-850nm) está dispuesta para ser inferior a 100mW, como inferior a 50mW, como inferior a 30mW, como inferior a 20mW. Como se señaló en otra parte, la reducción de la potencia promedio después de la salida de la fuente SC a menudo es indeseablemente compleja o imposible ya que los componentes ópticos necesarios para reducir la potencia alteran el espectro.

Como se señaló anteriormente, en una realización, el ancho espectral del SC generado depende de la potencia máxima de los pulsos al menos a un cierto nivel de saturación donde el aumento adicional de la potencia máxima no aumenta el ancho espectral. Además, la eficiencia de conversión de la luz de la bomba a la luz SC depende de la potencia máxima, lo que significa que, para un ancho de pulso fijo, la potencia máxima (y la potencia media correspondiente) no se puede reducir. Por debajo de un cierto valor, el ancho espectral deseado del espectro generado se verá comprometido y, finalmente, una eficiencia de conversión deficiente dará como resultado que ingrese demasiada luz de la bomba no convertida a través de la fibra, lo que podría comprometer la muestra bajo observación. Por lo tanto, en una realización como consecuencia de una potencia pico mínima, la inserción de un PFM provoca un aumento en la potencia de salida óptica promedio en relación con la configuración donde se omite el PFM. Esto ocurre porque la tasa de repetición de los pulsos de la bomba aumenta mientras que la potencia máxima y la duración del pulso son constantes. En una realización, la potencia óptica se reduce ajustando la energía de la bomba proporcionada al último amplificador de potencia antes del elemento no lineal, pero como se mencionó, esto puede comprometer el ancho espectral resultante.

En una realización, se puede efectuar una reducción de la potencia óptica promedio introduciendo una amortiguación después del elemento no lineal, tal como atenuación o división de parte del haz lejos de la trayectoria del haz. La aplicación que requiere una fracción sintonizable del espectro generado dirigido a la muestra puede aplicar un AOTF para realizar dicha función. En una realización, el AOTF puede controlarse para reducir la cantidad de potencia óptica promedio directa a la muestra. Para aplicaciones que requieren iluminación de banda ancha, como, por ejemplo, en un sistema de imagen OCT, puede ser más difícil aplicar componentes ópticos al haz sin alterar la forma del espectro y/o dañar dicho elemento óptico. En una realización, el sistema láser de bombeo comprende un compresor de pulso, tal como una fibra PBG (núcleo hueco o sólido), dispuesto para comprimir los pulsos de la bomba y así aumentar la potencia máxima. Este uso de la fibra PBG se discutió en la solicitud PCT WO2005041367. Al aumentar la potencia máxima del pulso individual, el uso de un compresor de pulso permitirá, en una realización, el uso de una potencia óptica promedio más baja mientras se mantienen las características espectrales del espectro generado.

En principio, un PFM de la fuente de luz de supercontinuo intermedia de la invención puede ser cualquier componente óptico adecuado para recibir un tren de pulsos a una tasa de repetición, y convertir esta entrada en un tren de pulsos con una tasa de repetición más alta. En una realización, los pulsos de entrada y salida tienen sustancialmente la misma duración de pulso y longitud de onda. En una realización, el PFM funciona dividiendo el tren de pulsos en la entrada en una pluralidad de trenes de subpulsos que experimentan un retraso diferente (longitud del camino óptico) antes de ser recombinados. El (los) retraso(s) relativo(s) causa(s) un cambio temporal de los trenes de pulsos secundarios cuando se recombinan, de modo que el tren de pulsos combinado comprende un mayor número de pulsos que la entrada. Por ejemplo, el tren de pulsos de entrada puede dividirse en dos trenes de pulsos secundarios (o haces secundarios) donde un tren de pulsos se retrasa en relación con el otro. La tasa de repetición del tren combinado se duplicará. Preferiblemente, el desplazamiento relativo entre los haces corresponde a la mitad del espacio entre dos pulsos en el tren de pulsos de entrada. En una realización, este principio se expande de modo que el haz de entrada se divide inicialmente en más de dos haces secundarios, tales como dos, tres o cuatro haces secundarios, cada uno retrasado en relación entre sí y recombinado. Es bien sabido que los divisores ópticos (o combinadores) funcionan de manera simétrica. La combinación de varios haces ópticos da como resultado la misma cantidad de haces de salida. En una realización, solo se usa/está disponible una única salida, mientras que la potencia óptica designada para las otras salidas se pierde en el sistema óptico. Por lo tanto, en una realización es ventajoso conectar/separar en cascada los acopladores/divisores como se discute en relación con la figura 2b a continuación.

En una realización, la invención se refiere a un PFM que comprende un divisor que divide un haz en haces secundarios, un atenuador ajustable opcional dispuesto para recibir un haz secundario y un primer combinador dispuesto para combinar los haces secundarios. De esta manera, el atenuador ajustable puede ajustarse para compensar las variaciones de producción en el divisor y/o el combinador, así como las variaciones de acoplamiento, de modo que se pueda producir un tren de pulsos resultante de pulsos con potencia de pico uniforme. En una realización, no se requiere el ajuste preciso de la amplitud de pico, y es aceptable una diferencia sustancial entre la potencia de pico de los haces secundarios recombinados.

En una realización, uno o más divisores y combinadores están dispuestos para tener una relación de división desigual (como $\frac{x}{1-x}$ donde x es un porcentaje, por ejemplo, 45/55, 40/60, 35/65 o 30/70) y dicho atenuador está dispuesto para recibir el haz secundario más potente (o el haz secundario contribuyente más grande en la combinación del haz) lo que puede garantizar que el haz secundario más potente pueda atenuarse para proporcionar un nivel de potencia igual que el otro haz secundario cuando se combinan los haces secundarios De

este modo, el ruido se reduce significativamente en comparación con situaciones en las que el haz secundario tenía diferentes niveles de potencia.

En una realización, el PFM comprende múltiples atenuadores dispuestos cada uno para recibir un haz secundario separado. En una realización, el divisor divide el haz en dos haces secundarios. En una realización, el divisor divide el haz en más de dos haces secundarios, como 3 o más, como 4 o más, como 5 o más, 6 o más, como 7 o más, como 8 o más. En una realización, el primer combinador actúa además como divisor que divide el haz combinado en segundos haces secundarios seguido de un segundo combinador. En una realización, el PFM comprende un atenuador ajustable dispuesto para recibir uno de dichos segundos haces secundarios. Este atenuador se puede aplicar para ajustar las variaciones en el primer combinador y el segundo combinador, así como las pérdidas de acoplamiento y otras variaciones. En una realización, el segundo combinador está dispuesto para tener una relación de división desigual (y, por lo tanto, también una combinación desigual de los haces entrantes) y la salida de dicho atenuador ajustable está dispuesta para proporcionar la fracción más grande a la salida. Nuevamente, esto puede garantizar que el PFM pueda proporcionar un tren de pulsos con una potencia uniforme entre los pulsos.

En una realización, el PFM está formado por ópticas de espacio libre tales como divisores de haz a granel. En una realización, el PFM está formado por divisores y/o acopladores de fibra óptica que a menudo son preferibles en relación con el coste y la robustez del sistema.

Detalles de la invención

La figura 1a muestra una fuente de luz de supercontinuo intermedia esquemática adecuada para el sistema de medición óptica de la presente invención.

La figura 1b muestra un ejemplo de un espectro (10) supercontinuo que abarca desde λ_2 siendo aproximadamente 460 nm hasta λ_1 siendo aproximadamente 2400 nm.

Las figuras 2a y 2b muestran ejemplos de moduladores de frecuencia de pulso (PFM) de una fuente de luz de supercontinuo intermedia.

La figura 3a muestra la configuración de medición adecuada para medir el ruido de intensidad en el espectro de una fuente de luz SC, como la de la figura 1.

La figura 3b muestra un ejemplo de una salida de espectro supercontinuo de la fuente de luz intermedia de supercontinuo 100, así como un ejemplo de la salida de espectro de la unidad 300 de acoplamiento monomodo, respectivamente.

Las figuras 3c, 3d y 3e muestran la salida de espectros ejemplificada de la unidad de acoplamiento monomodo.

Las figuras 4a y 4b muestran el ruido de intensidad media de una fuente de luz de supercontinuo intermedia después y antes de la compensación del ruido del espectrómetro.

La figura 5 muestra un sistema de medición óptica ejemplificado como un sistema OCT que utiliza una fuente de luz SC como fuente de luz.

La figura 6 muestra un ejemplo de una unidad de acoplamiento monomodo que comprende un elemento dicróico que es un espejo dicróico, un elemento dispersivo que es un prisma y una fibra monomodo dispuesta para dar forma al espectro.

La figura 7 muestra un ejemplo de una unidad de acoplamiento monomodo que comprende un elemento dicróico que es una fibra monomodo, un elemento óptico de amortiguación y/o conformación y una segunda fibra monomodo.

Las figuras 8a-8c muestran tres ejemplos de cómo amortiguar la potencia óptica.

La figura 1b muestra un ejemplo de un espectro (10) supercontinuo que abarca desde λ_2 siendo aproximadamente 460 nm hasta λ_1 siendo aproximadamente 2400 nm. El espectro se obtiene del producto SuperK EXW-12 de NKT Photonics A/S.

Las figuras 2a y 2b muestran ejemplos de moduladores de frecuencia de pulso (PFM) de una fuente de luz de supercontinuo intermedia según la presente invención. La figura 2a muestra una realización de un PFM 200. El haz de entrada (ya sea en espacio libre o mediante una fibra) ingresa al PFM en la entrada 201. El divisor 214 se ejemplifica como un divisor 1x2, pero puede ser cualquier divisor 1xN o incluso divisor MxN. Para un divisor MxN, se pueden combinar múltiples entradas o, alternativamente, solo se utiliza 1 entrada de las M entradas disponibles. El primer divisor 214 divide el haz de entrada en dos haces 202 203 secundarios con una relación de división $x_1/(1-x_1)$. Como se discutió anteriormente, el mayor de x_1 y $(1-x_1)$ está en una realización enviada al atenuador 204 ajustable. En una realización, se omite el atenuador, en cuyo caso es preferible que x_1 sea aproximadamente 0.5 (es decir, 50%), de modo que las variaciones en la potencia máxima del tren de pulsos en la salida 207 se puedan minimizar. El haz 202 secundario está sujeto a una línea 205 de retardo, que está preferiblemente dispuesta para retrasar el

haz 202 secundario con la mitad del período entre dos pulsos en el haz 201 de entrada. En una realización, la línea de retardo es ajustable para acomodar variaciones en la tasa de repetición del haz de entrada. En una realización, pequeñas desviaciones (como, por ejemplo, menos del 75%, como menos del 50%, como menos del 25%, como menos del 15%, como menos del 10%, como menos del 5%, como menos del 1%) de una separación uniforme de los pulsos en el haz de salida se puede tolerar para que la línea de retardo sea fija. Los haces 202 203 secundarios se combinan en el combinador 206 proporcionando una salida 207. El combinador 206 tiene una relación dividida de $x_2/(1-x_2)$. En una realización, el divisor 214 o el combinador están dispuestos para tener una relación de división desigual, es decir, x_1 o x_2 se desvía del 50%, de esta manera, el atenuador 204 puede ajustarse de manera que el haz 202 y 204 contribuya de manera uniforme para que un pulso en la entrada dividido en dos pulsos se recombine para tener sustancialmente la misma potencia de pico en la salida, donde "sustancialmente" significa incluir lo que está dentro de las tolerancias ordinarias. El efecto del PFM es duplicar la frecuencia del pulso del haz de entrada. El combinador 206 tiene además una salida 208, que puede o no ser una salida físicamente disponible y real. Sin embargo, la salida 208 se incluye para ilustrar que el combinador introduce una pérdida de inserción debido a la simetría inherente de un divisor/combinador de haces para que la potencia máxima se reduzca a aproximadamente el 25% de la de la entrada cuando otras pérdidas ópticas (como en los acoplamientos y el atenuador) se ignoran. En una realización, el haz en la salida 208 se aplica para controlar el haz y ajustar el atenuador 204.

La figura 2b muestra el PFM de la figura 2a, pero que además comprende un segundo acoplador 209 de modo que el PFM proporciona un cuadruplicado de la frecuencia del pulso. En principio, también se podría obtener un cuadruplicado expandiendo el divisor 214 a un 1×4 y el acoplador 206 a un acoplador 4×1 . Sin embargo, el acoplador impondría en este caso una pérdida de inserción de aproximadamente el 75% debido a la simetría de un divisor de haz en relación con la pérdida de aproximadamente el 50% impuesta por el segundo combinador 213. La primera línea de retraso se ajusta preferiblemente a la mitad del período de la entrada en 201, lo que da como resultado una duplicación de la frecuencia del pulso después de combinar en el combinador 206 y la segunda línea 212 de retardo está dispuesta preferiblemente para proporcionar una mitad de retardo de eso, es decir, una cuarta parte de la entrada en 201. La relación dividida $x_2/(1-x_2)$ está en una realización dispuesta para que sea uniforme donde x_1 y x_3 están dispuestos de manera desigual para que el atenuador 204 pueda realizar la función como se describe en relación con la figura 2a y la atenuación 211 puede realizar una función similar de compensar las variaciones en la división en 206, así como la combinación en el combinador 213. Es notable que se pueda duplicar aún más expandiendo aún más el PFM agregando acopladores sin aumentar la pérdida de inserción debido a la división simétrica.

La figura 3a muestra una configuración de medición en la que la fuente de luz SC 1000 de la invención está dispuesta para iluminar un espectrómetro en lugar de un objeto a medir. La figura 3a muestra que la fuente 1000 de luz de supercontinuo de la invención comprende una fuente de 100 luz de supercontinuo intermedia y una unidad 300 de acoplamiento monomodo. La salida de la fuente 1000 de luz SC es la salida de la unidad 300 de acoplamiento monomodo. La salida de la fuente 100 de luz SC intermedia es la salida del elemento 107 no lineal (no mostrado en la figura 3a). Esta salida de la fuente 100 de luz SC intermedia está acoplada a la entrada a la unidad de acoplamiento monomodo 300. La salida de la fuente 100 de luz SC intermedia es al menos aproximadamente la salida del elemento no lineal (107 en la figura 1a) de la fuente de luz de supercontinuo intermedia (100 en la figura 1a; no se muestra en la figura 3a). La unidad de acoplamiento monomodo 300 comprende una adaptación en forma de amortiguación y/o conformación del espectro de acuerdo con los requisitos de la aplicación. En una realización, la unidad 300 de acoplamiento SM comprende una de las realizaciones de la solicitud PCT en tramitación PCT/DK2011/050475 (incorporada en este documento), véanse en particular las realizaciones relacionadas con las figuras 5a, 6, 7, 8-10, 13-15 y 17-19, así como sus variaciones, así como cualquiera de los artículos y/o reivindicaciones.

La figura 3b muestra un ejemplo de una salida de espectro supercontinuo de la fuente 100 de luz de supercontinuo intermedia (espectro 10), así como un ejemplo de la salida de espectro de la unidad 300 de acoplamiento monomodo (espectro 12), respectivamente. En este ejemplo, el espectro después de la unidad de acoplamiento monomodo tiene una distribución gaussiana y se extiende desde λ_4 a aproximadamente 650 nm hasta λ_3 a aproximadamente 950 nm. La figura 3b muestra, por lo tanto, que la forma espectral después de la unidad de acoplamiento monomodo es diferente de la forma espectral en el mismo rango de longitud de onda de la fuente de supercontinuo intermedio.

Las figuras 3c, 3d y 3e muestran ejemplos de la salida del espectro de la unidad 300 de acoplamiento monomodo, siendo las formas espectrales gaussianas (figura 3c), una parte superior plana (figura 3d) y una distribución de doble pico (figura 3e), respectivamente. Una distribución de doble pico puede ser ventajosa si la salida de la fuente de luz se envía a través de un elemento óptico con una función de transferencia similar a Gauss (como, por ejemplo, una lente óptica) antes de iluminar el objeto y es ventajoso iluminar el objeto con una distribución superior plana.

En una realización, la forma espectral después de la unidad de acoplamiento monomodo es diferente del espectro en el mismo rango de longitud de onda de la fuente de supercontinuo intermedio, tal como una distribución gaussiana, parte superior plana o una distribución de doble pico. Las figuras 4a y 4b muestran el resultado de la medición de una configuración de acuerdo con la figura 3a. La fuente de luz SC intermedia se diseñó de acuerdo con la figura 1.

La figura 4a muestra el ruido de intensidad promedio de una fuente de luz de supercontinuo intermedia 100 (ver figura 1) medida entre 790-870 nm utilizando un espectrómetro Wasatch Cobra UD (310) con una cámara Basler Sprint SPL4096-70km en función de la potencia de la fuente de luz de supercontinuo entre 400 y 850 nm. La figura 4a muestra el ruido de intensidad media después de la compensación del ruido del espectrómetro, mientras que la figura 4b muestra el ruido de intensidad media antes de la compensación del ruido del espectrómetro. La figura 4a contiene mediciones para tres frecuencias de pulsos de bomba diferentes (F_{bomba}) que son 80 MHz (curva 401) 160 MHz (curva 402) y 320 MHz (curva 403). Se ve que el ruido disminuye cuando aumenta la frecuencia del pulso de la bomba. El ruido de intensidad se compensa por el ruido agregado por el espectrómetro.

La figura 4b muestra los datos de ruido de intensidad de la figura 4a, antes de la compensación por el ruido del espectrómetro. La figura 4b contiene mediciones para tres frecuencias diferentes de pulsos de bomba (F_{bomba}) que son 80 MHz (curva 411), 160 MHz (curva 412) y 320 MHz (curva 413). De nuevo, se ve que el ruido disminuye cuando aumenta la frecuencia del pulso de la bomba.

El MO 101 es un láser de fibra Yb de modo bloqueado con una salida que tiene una longitud de onda central de aproximadamente 1060 nm y una duración de pulso de alrededor de 6 ps. El láser está bloqueado de modo pasivo a través de un SESAM y proporciona pulsos con una frecuencia de repetición de 80MHz. Este tipo de láser es muy adecuado para la siembra porque el diseño de fibra completa proporciona un láser que es robusto y relativamente simple de producir en relación con una configuración óptica a granel. La tasa de repetición máxima se determina por lo corta que se puede hacer la cavidad y las propiedades de respuesta del SESAM. En la práctica, estas limitaciones a menudo imponen un límite superior práctico a la tasa de repetición de aproximadamente 100MHz. En una realización, se pueden aplicar otros medios de ganancia para proporcionar otras longitudes de onda de salida, y la duración del pulso y la velocidad de repetición también se pueden alterar dentro de los límites discutidos en otra parte.

En una realización, el láser semilla es un láser de fibra, tal como un láser de fibra de modo bloqueado, tal como un modo bloqueado a través de un SESAM. El medio de ganancia puede estar formado por cualquier medio de ganancia láser adecuado, por ejemplo, fibra dopada con Yb, una fibra dopada con Er y una fibra dopada con Er/Yb. El láser semilla puede ser, por ejemplo, un láser de cavidad lineal o un láser de anillo.

El medio 107 no lineal es una fibra PCF microestructurada formada por un núcleo de sílice rodeado por un patrón hexagonal de agujeros dispuestos de modo que el núcleo esté formado por un agujero faltante en el patrón. La fibra está diseñada para que el ZDW de la fibra esté relativamente cerca de la longitud de onda de la bomba, de modo que la energía sustancial de la bomba se proporcione en el régimen anómalo de la fibra.

Como en la figura 1, un conjunto de amplificadores 102,104 de fibra óptica está dispuesto alrededor de un PFM opcional. Sin un PFM, el sistema de bombeo bombea la fibra con aproximadamente 10W, 8-10 ps a 80 MHz. Al insertar un PFM de acuerdo con la figura 2a, la tasa de repetición aumenta a 160MHz y al insertar un PFM de acuerdo con la figura 2b, la tasa de repetición se cuadruplica a 320MHz. Las figuras 4a y 4b muestran resultados experimentales obtenidos usando un espectrómetro UD Wasatch Cobra con cámara Basler Sprint SPL4096-70km dispuesta para medir el rango espectral de 790-870 nm con 4096 píxeles, es decir, aproximadamente 0.02 nm/píxel. Se aplicó un tiempo de medición de 12.9us y se registró la fluctuación de la potencia medida en cada píxel. Son posibles tiempos de medición largos y cortos, como entre 1 μ s y 1 ms o más. A menudo es deseable un tiempo de medición corto, como en el caso de la OCT de Fourierdomain (ver figura 4b) donde a menudo se requieren imágenes en tiempo real. En la figura 4, la desviación estándar relativa promedio por píxel en el rango espectral de 790-870nm se mide en función de la parte visible del espectro. Se observa que la desviación estándar y, por lo tanto, el ruido de intensidad disminuye significativamente a medida que la tasa de repetición de los pulsos de la bomba se duplica, y aún más cuando se cuadruplica para obtener la misma cantidad de potencia promedio en el rango visible. La cantidad de energía en el rango visible depende de cuán efectivamente se convierta la energía de la bomba en luz visible, que depende de la potencia máxima de los pulsos de la bomba y de la cantidad total de energía de la bomba (potencia promedio). En la figura 4a, la contribución de ruido estimada del espectrómetro se ha restado, mientras que esto se incluye en la figura 4b.

La figura 5 muestra un sistema de medición óptica ejemplificado como un sistema OCT que utiliza una fuente SC como fuente de luz. El sistema que se muestra en la figura 5 es un sistema OCT de dominio de Fourier (FD-OCT) según la invención en el que se aplica una fuente de luz SC 1000 como fuente de luz, por lo que es adecuado para un sistema de medición óptico según la invención. Un divisor/acoplador direccional 2x2 50/50 (501), acoplado a la fuente de luz y al espectrómetro (310) que actúa como detección en un lado y una lente (502), el objeto a medir (503) y un reflector (504) de referencia en el otro lado, forman el núcleo del interferómetro del sistema OCT. Una exploración de línea (perfil de profundidad de la muestra) se realiza mediante una medición del espectrómetro donde la profundidad de medición está determinada por la resolución espectral, y la resolución espacial en la muestra está determinada por el ancho espectral de la medición. A menudo, el haz se escanea sobre el objeto para proporcionar perfiles de profundidad 2D o 3D de la reflectividad en la muestra. OCT es un campo extenso que comprende una gran cantidad de variaciones de la configuración del sistema, que se espera que se beneficien de los aspectos de la presente invención. El espectro de salida es preferiblemente gaussiano, de modo que, en una realización, la unidad de acoplamiento SM está dispuesta para dar forma al espectro desde la fuente de luz SC en un espectro gaussiano, tales como las realizaciones discutidas en relación con la figura 5a (espectro gaussiano de banda única) y la figura 6

(espectro gaussiano de banda dual) en PCT/DK2011/050475, así como la figura 16 dispuestas para proporcionar espectros amplios sintonizables. En una realización, la unidad de acoplamiento SM comprende un filtro dispuesto para proporcionar un espectro gaussiano. El acoplador 50/50 debe estar dispuesto para manejar un amplio espectro y generalmente es un acoplador de fibra fundida o un acoplador óptico a granel.

5 La figura 6 muestra un ejemplo de una unidad 300 de acoplamiento monomodo que comprende un elemento dicroico que es un espejo dicroico, un elemento dispersivo que es un prisma y una fibra monomodo dispuesta para dar forma al espectro. Por lo tanto, la figura 6 muestra un ejemplo de cómo construir la unidad 300 de acoplamiento monomodo. La salida de la fuente 100 de luz de supercontinuo intermedia se dirige a un elemento 60 dicroico y un elemento 61 dispersivo. El espejo y/o el elemento dispersivo angular están conectados a un control 6 electrónico, que permite una rotación entre estos dos elementos. El sistema también podría incluir opcionalmente un filtro 62 de amortiguación sintonizable y/o un filtro 63 espacial sintonizable. La luz es colimada por un sistema 64 de lente y recolectada por una fibra 65, que de este modo está dando forma al espectro. El sistema podría incluir opcionalmente un divisor 66 de banda ancha, que envía una parte de la luz a la salida 67 y otra parte de la luz a un sistema 68 detector. Dicho sistema detector está conectado al sistema 6 de control electrónico, que nuevamente está conectado a la fuente 100 de luz de supercontinuo y/o al elemento 500 dicroico para estabilizar la potencia de salida. En una realización, el elemento dispersivo es un prisma. En una realización, la fibra 65 es una fibra monomodo, tal como una fibra de índice de pasos o fibra microestructurada. En una realización, el sistema 64 de lente de colimación comprende múltiples lentes.

20 La figura 7 muestra un ejemplo de una unidad 300 de acoplamiento monomodo que comprende un elemento dicroico que es una fibra monomodo 60, un elemento óptico de amortiguación y/o conformación 70 y una segunda fibra 65 monomodo.

En una realización, la primera fibra 60 monomodo tiene una alta pérdida por encima de un cierto umbral de longitud de onda λ_0 y por lo tanto actúa como un filtro espectral. En una realización, el elemento óptico de amortiguación y/o conformación se selecciona de la lista de un prisma, un filtro óptico de paso bajo y óptico de paso alto y paso de banda óptico, un filtro de densidad neutra.

25 Las figuras 8a-8c muestran tres ejemplos de cómo amortiguar la potencia óptica en la fuente de luz de supercontinuo de la invención.

En cada una de las figuras 8a a 8c, la fuente de luz de supercontinuo se denota con el número 1000 de referencia, mientras que la fuente de luz de supercontinuo intermedia se denota con el número 100 de referencia y la unidad de acoplamiento monomodo con el número 300 de referencia.

35 En la figura 8a, la unidad 300 de acoplamiento monomodo comprende una unidad de amortiguación y conformación 81, donde el diámetro del campo de modo a la salida de la unidad 81 de amortiguación y conformación es diferente del diámetro del campo de modalidad de una segunda fibra 82 de modalidad única. La figura 8a muestra, por lo tanto, un desajuste del diámetro del campo de modo a la salida de la unidad 81 de amortiguación y conformación de la unidad 300 de acoplamiento monomodo.

En la figura 8b, la unidad 300 de acoplamiento de monomodo comprende una unidad de amortiguación y conformación en forma de un elemento 83 de conformación y un elemento 84 de amortiguación.

40 La figura 8c muestra un ejemplo en el que la amortiguación en la unidad 300 de acoplamiento de monomodo se obtiene al tener un empalme óptico con gran pérdida 86 entre la fuente 100 de supercontinuo intermedio y la entrada de la unidad 300 de acoplamiento de monomodo.

Debe enfatizarse que el término "comprende/que comprende" cuando se usa en el presente documento debe interpretarse como un término abierto, es decir, se debe tomar para especificar la presencia de características especificadas específicamente, como elementos, unidades, enteros, paso(s) componente(s) y combinación(es) de los mismos, pero no excluye la presencia o adición de una o más de las otras características establecidas.

45 Además, el término "sustancialmente" pretende incluir lo que está dentro de las tolerancias ordinarias.

Todas las características de las invenciones, incluidos los intervalos y los intervalos preferidos, se pueden combinar de varias maneras dentro del alcance de la invención, a menos que existan razones específicas para no combinar tales características.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema de medición óptica adecuado para medir al menos un parámetro de un objeto, el sistema comprende una fuente (1000) de luz de supercontinuo y un detector (68, 310) para detectar la luz de dicho objeto,
dicha fuente (1000) de luz de supercontinuo tiene una salida de fuente de luz y que comprende una fuente (100) de luz de supercontinuo intermedia y una unidad (300) de acoplamiento monomodo, en el que dicha fuente de luz de supercontinuo intermedia comprende
a. un láser (101) semilla dispuesto para proporcionar pulsos semilla con una frecuencia de pulso F_{semilla} ;
b. un multiplicador (200) de frecuencia de pulso (PFM) dispuesto para multiplicar los pulsos semilla y convertir F_{semilla} en pulsos de bombeo con una frecuencia de pulso F_{bomba} donde F_{bomba} es más grande que F_{semilla} y F_{bomba} es al menos aproximadamente 150 MHz;
c. un elemento (107) no lineal, tal como una fibra óptica microestructurada, dispuesto para recibir dichos pulsos de bomba y convertir dichos pulsos de bomba en una luz de supercontinuo provista como salida de dicho elemento no lineal y que tiene un espectro supercontinuo que abarca al menos de aproximadamente λ_1 a aproximadamente λ_2 donde $\lambda_1 - \lambda_2 >$ aproximadamente 500 nm,
en el que la salida del elemento (107) no lineal está acoplada a la unidad (300) de acoplamiento monomodo para proporcionar una salida de la unidad (300) de acoplamiento monomodo, en el que la salida de la fuente de luz comprende la salida de la unidad (300) de acoplamiento monomodo, en el que dicha fuente (1000) de luz de supercontinuo está dispuesta para iluminar el objeto a medir con al menos parte de la salida de dicha unidad (300) de acoplamiento monomodo, dicho detector está dispuesto para recibir luz reflejada desde dicho objeto a medir, en el que dicho detector (68, 310) tiene un tiempo de integración de al menos aproximadamente $1/F_{\text{bomba}}$.
2. El sistema de medición óptica según la reivindicación 1, en el que dicha unidad (300) de acoplamiento monomodo está dispuesta para amortiguar y/o dar forma a dicho espectro supercontinuo a partir de dicho elemento (107) no lineal.
3. El sistema de medición óptica según la reivindicación 2, en el que dicha unidad (300) de acoplamiento monomodo está dispuesta para recibir dicha luz de supercontinuo y darle forma espectral de manera que el espectro de salida de dicha unidad (300) de acoplamiento monomodo se extiende desde λ_3 a λ_4 , donde $\lambda_3 - \lambda_4 > 0$, $\lambda_1 \geq \lambda_3$ y $\lambda_2 \leq \lambda_4$, y en el que la salida del espectro de salida de forma espectral de la unidad (300) de acoplamiento monomodo es diferente del espectro en el rango de longitud de onda de λ_3 a λ_4 de la fuente (100) de supercontinuo intermedio.
4. El sistema de medición óptica según la reivindicación 3, donde es $\lambda_3 - \lambda_4$ es mayor que aproximadamente 100 nm, como mayor que aproximadamente 200 nm, como mayor que aproximadamente 300 nm o como mayor que aproximadamente 500 nm.
5. El sistema de medición óptica según la reivindicación 3 o la reivindicación 4, donde λ_3 es menor que aproximadamente 1000 nm, como menor que aproximadamente 900 nm, como menor que aproximadamente 800 nm, como menor de aproximadamente 700 nm o como menor de aproximadamente 600 nm.
6. El sistema de medición óptica según cualquiera de las reivindicaciones 3 a 4, donde λ_4 es mayor que aproximadamente 1070 nm, como mayor que aproximadamente 1100 nm, como mayor que aproximadamente 1200 nm, o como mayor que aproximadamente 1300 nm.
7. El sistema de medición óptica según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que dicha unidad (300) de acoplamiento monomodo comprende uno o más de los siguientes: un prisma, un filtro óptico de paso bajo, un filtro óptico de paso alto, un filtro óptico de paso de banda y una fibra (60) monomodo, preferiblemente, dicha unidad de acoplamiento monomodo está dispuesta para dar forma al espectro desde la fuente de luz de supercontinuo intermedia en un espectro gaussiano, un espectro de pico doble o un espectro superior plano.
8. El sistema de medición óptica según cualquiera de las reivindicaciones 3 a 7, en el que la amortiguación de dicho espectro supercontinuo en dicha unidad (300) de acoplamiento de monomodo está dada por un factor de amortiguación de potencia óptica y, dicho factor de amortiguación de potencia óptica y es una medida de la amortiguación de potencia óptica dentro del rango de longitud de onda de λ_4 a λ_3 , en el que dicho factor de amortiguación de potencia óptica y es mayor que aproximadamente 2, como mayor que aproximadamente 3, como mayor que aproximadamente 4, como mayor que aproximadamente 6, como mayor que aproximadamente 8, como mayor que aproximadamente 10.
9. El sistema de medición óptica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde dicha unidad (300) de acoplamiento de monomodo comprende al menos uno de los siguientes para llevar a cabo dicha amortiguación: i) desalineación o desajuste de la salida del elemento no lineal a la unidad de acoplamiento monomodo; ii) pérdida de empalme en la entrada y/o salida de la unidad de acoplamiento monomodo; y iii) un filtro de atenuación de banda ancha, tal como un filtro de densidad neutra o un divisor de haz de banda ancha.

10. El sistema de medición óptica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la unidad (300) de acoplamiento monomodo comprende
- una entrada para acoplar al elemento no lineal;
 - un elemento (60) dicróico en la entrada de la unidad de acoplamiento monomodo, dicho elemento dicróico está dispuesto para transmitir longitudes de onda por debajo de una longitud de onda umbral λ_5 , en el que $\lambda_5 > \lambda_3$ y preferiblemente dicho elemento (60) dicróico es una fibra monomodo, siendo dicha fibra monomodo una fibra de índice escalonado o una fibra microestructurada que comprende microestructuras en forma de aire o material de vidrio de bajo índice;
 - al menos uno de los siguientes: un prisma, un filtro óptico de paso bajo, un filtro óptico de paso alto o un filtro óptico de paso de banda; y
 - una fibra monomodo, cuya salida es la salida de la unidad (300) de acoplamiento monomodo.
11. El sistema de medición óptica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la potencia óptica total en la salida de dicha unidad (300) de acoplamiento monomodo es inferior a aproximadamente 100 mW, como menos de aproximadamente 50 mW, como menos de aproximadamente 30 mW, como menos de aproximadamente 20 mW.
12. El sistema de medición óptica de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicho láser (101) semilla está dispuesto para proporcionar pulsos semilla con semilla de duración de pulso t_{semilla} , siendo dicha duración de pulso t_{semilla} mayor de aproximadamente 0.1 ps, tal como más de aproximadamente 0.25 ps, tal como más de aproximadamente 0.5 ps, tal como más de aproximadamente 0.75 ps, tal como más de aproximadamente 1 ps, tal como más de aproximadamente 2 ps, tal como más de aproximadamente 3 ps, tal como más de aproximadamente 5 ps, tal como más de aproximadamente 10 ps, tal como más de aproximadamente 20 ps, tal como más de aproximadamente 50 ps, tal como más de aproximadamente 100 ps, tal como más de aproximadamente 200 ps, tal como más de aproximadamente 300 ps, tal como más de aproximadamente 400 ps, tal como más de aproximadamente 500 ps, tal como más de aproximadamente 1 ns.
13. El sistema de medición óptica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha fuente (100) de luz de supercontinuo intermedia comprende un compresor de pulso, tal como una fibra PBG, dicho compresor de pulsos está dispuesto para recibir los pulsos de dicho multiplicador (200) de frecuencia de pulso (PFM)s y para emitir pulsos comprimidos en el tiempo a dicho elemento no lineal, preferiblemente dicha fuente (100) de luz de supercontinuo intermedia es una fuente de luz incoherente.
14. El sistema de medición óptica de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el detector (68, 310) tiene un tiempo de integración mayor que $50/F_{\text{bomba}}$, tal como más de $100/F_{\text{bomba}}$, tal como más de $200/F_{\text{bomba}}$, tal como más de $500/F_{\text{bomba}}$, tal como más de $1000/F_{\text{bomba}}$, tal como más de $5000/F_{\text{bomba}}$.
15. El sistema de medición óptica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el sistema está adaptado para realizar tomografía de coherencia óptica (OCT).
16. Un método para medir al menos un parámetro de un objeto a medir, el método comprende
- a. proporcionar un sistema de medición óptica de cualquiera de las reivindicaciones anteriores;
 - b. iluminar el objeto a medir con al menos parte de una salida de dicha unidad de acoplamiento monomodo, tal como la parte principal, tal como al menos aproximadamente el 90%, de toda la salida de dicha unidad de acoplamiento monomodo; y
 - c. detectar la luz de dicho objeto mediante un detector,
- en el que el método funciona preferiblemente en modo de reflexión en el que el sistema de medición óptica está dispuesto para medir la luz reflejada desde dicho objeto, tal como en base a interferometría de luz blanca, tal como tomografía de coherencia óptica.

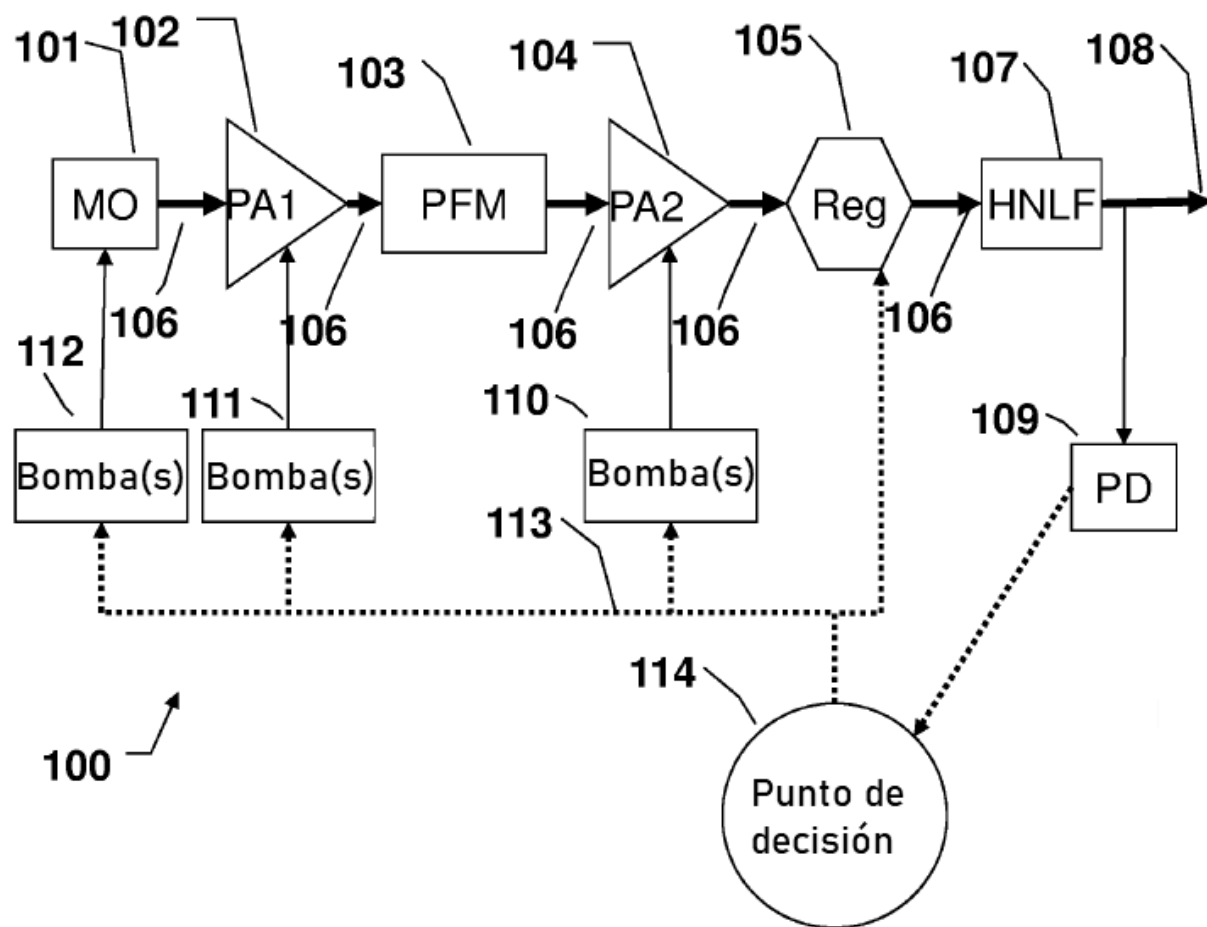


Fig. 1a

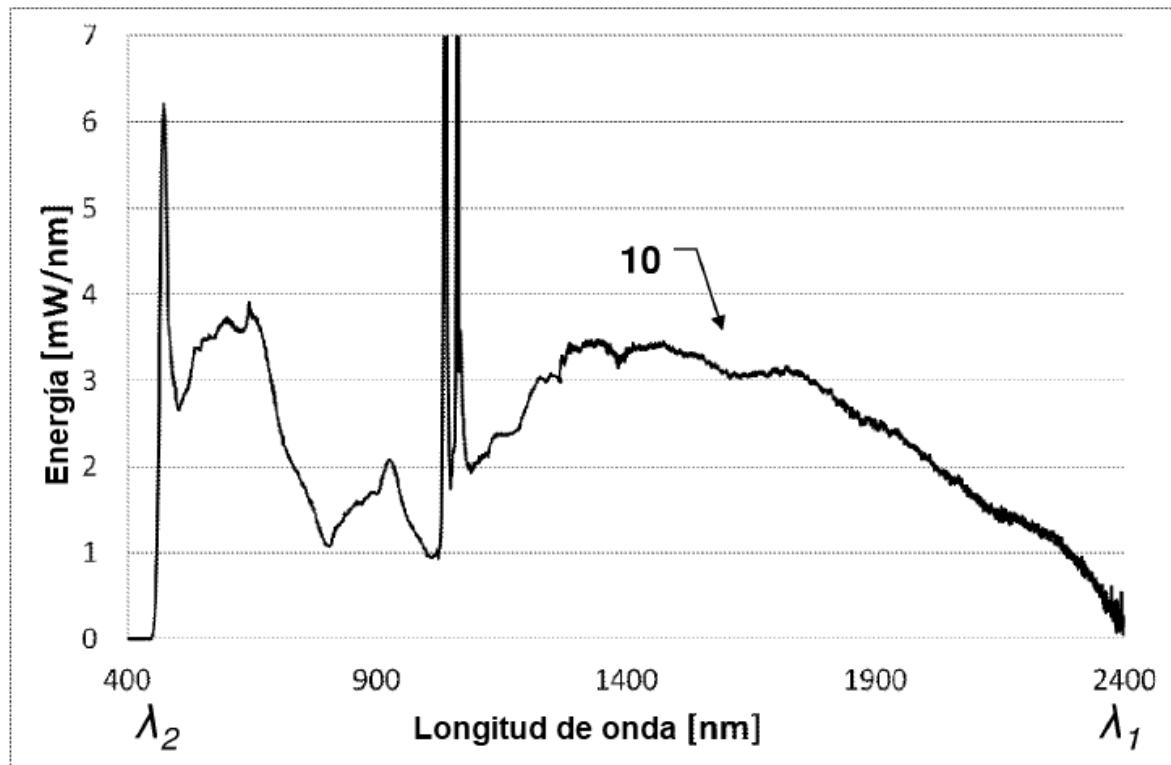


Fig. 1b

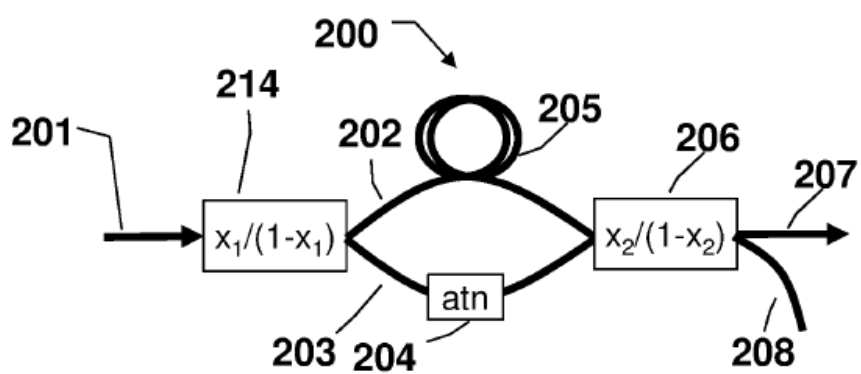


Fig. 2a

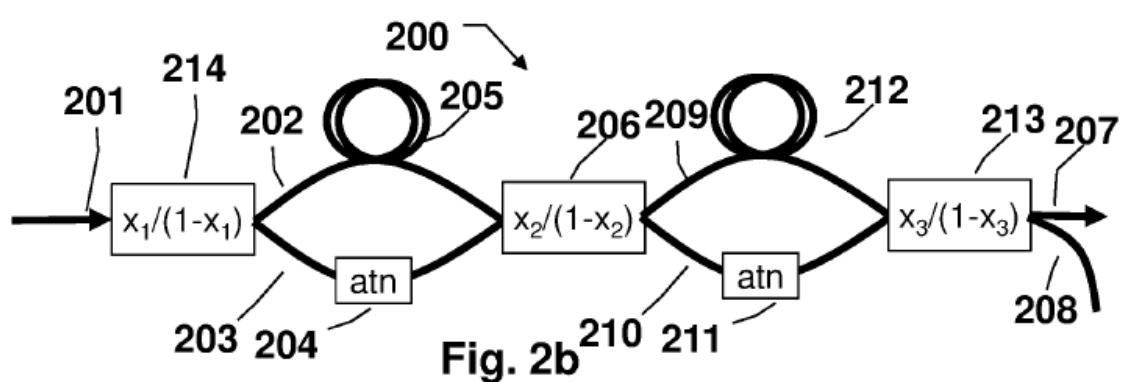


Fig. 2b

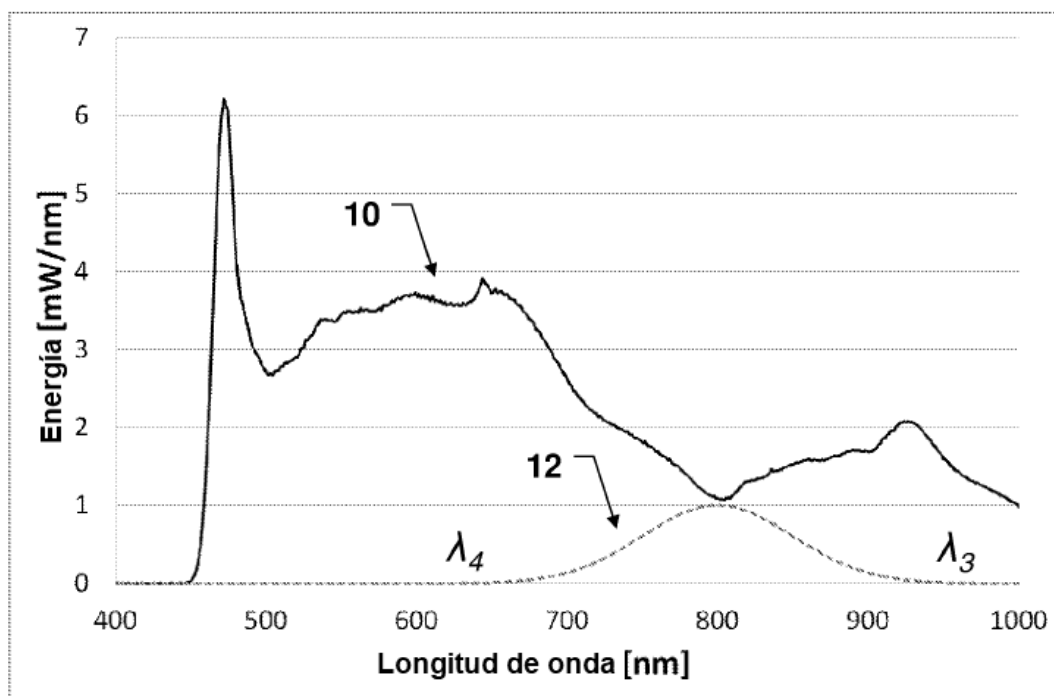
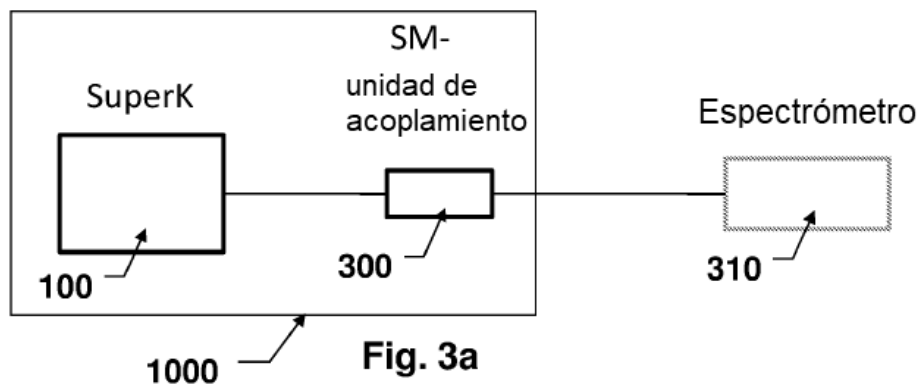


Fig. 3b

Fig. 3c

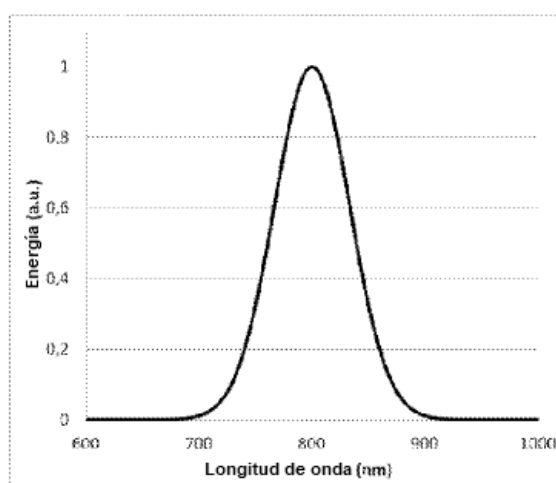


Fig. 3d

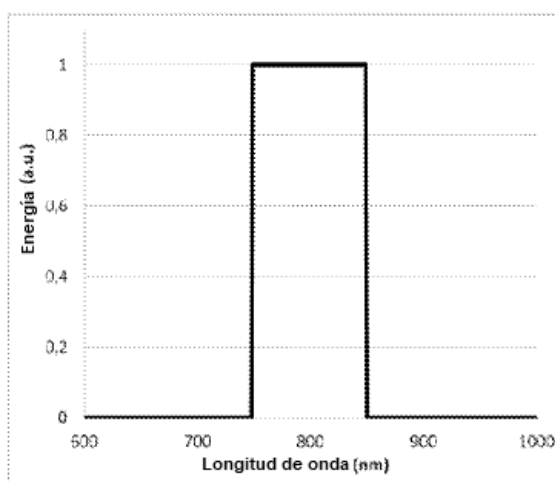
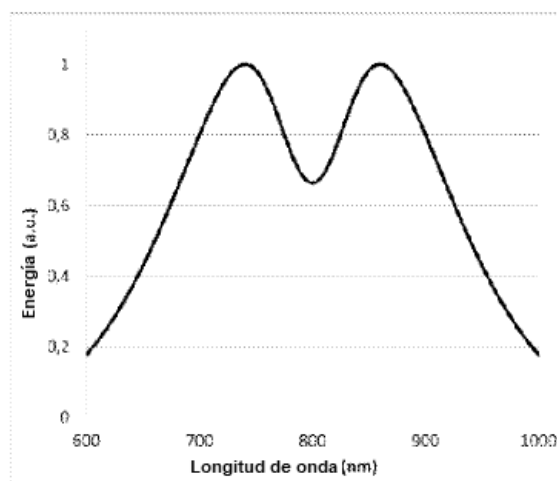


Fig. 3e



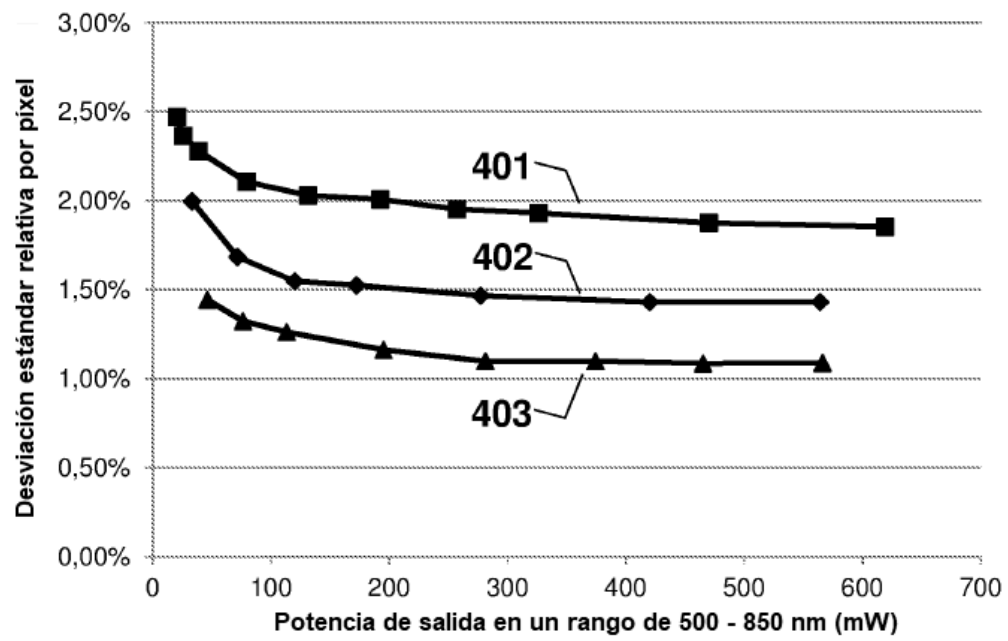


Fig. 4a

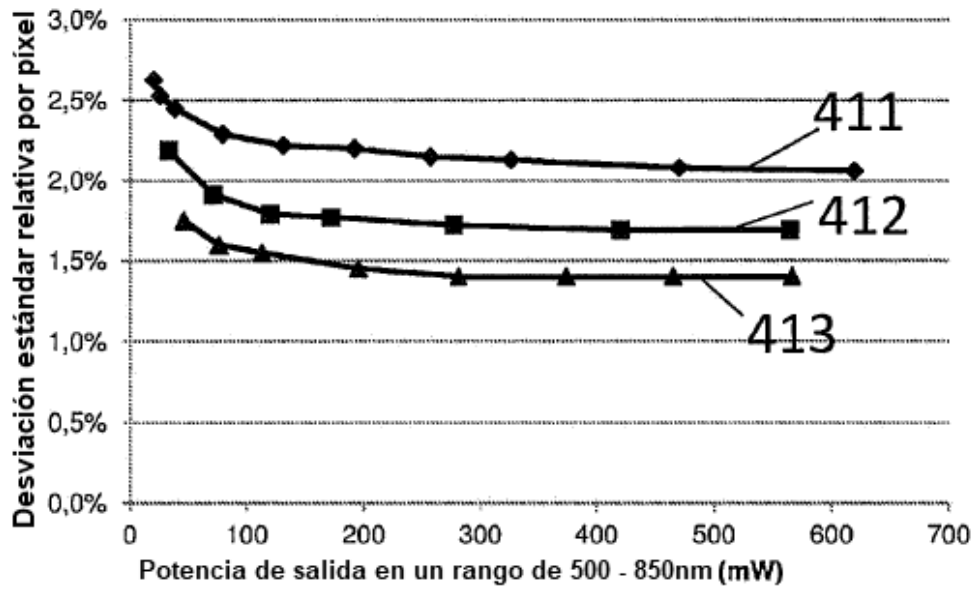


Fig. 4b

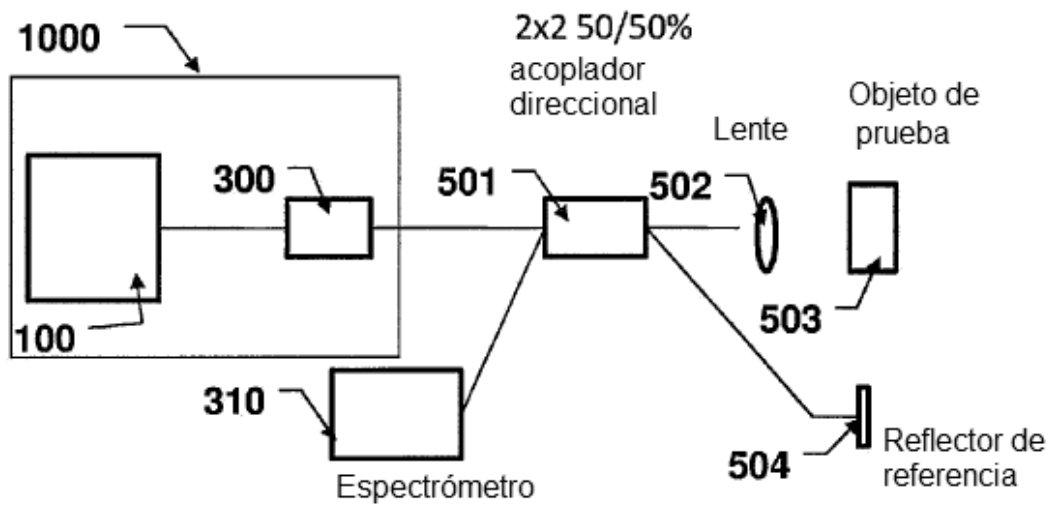


Fig. 5

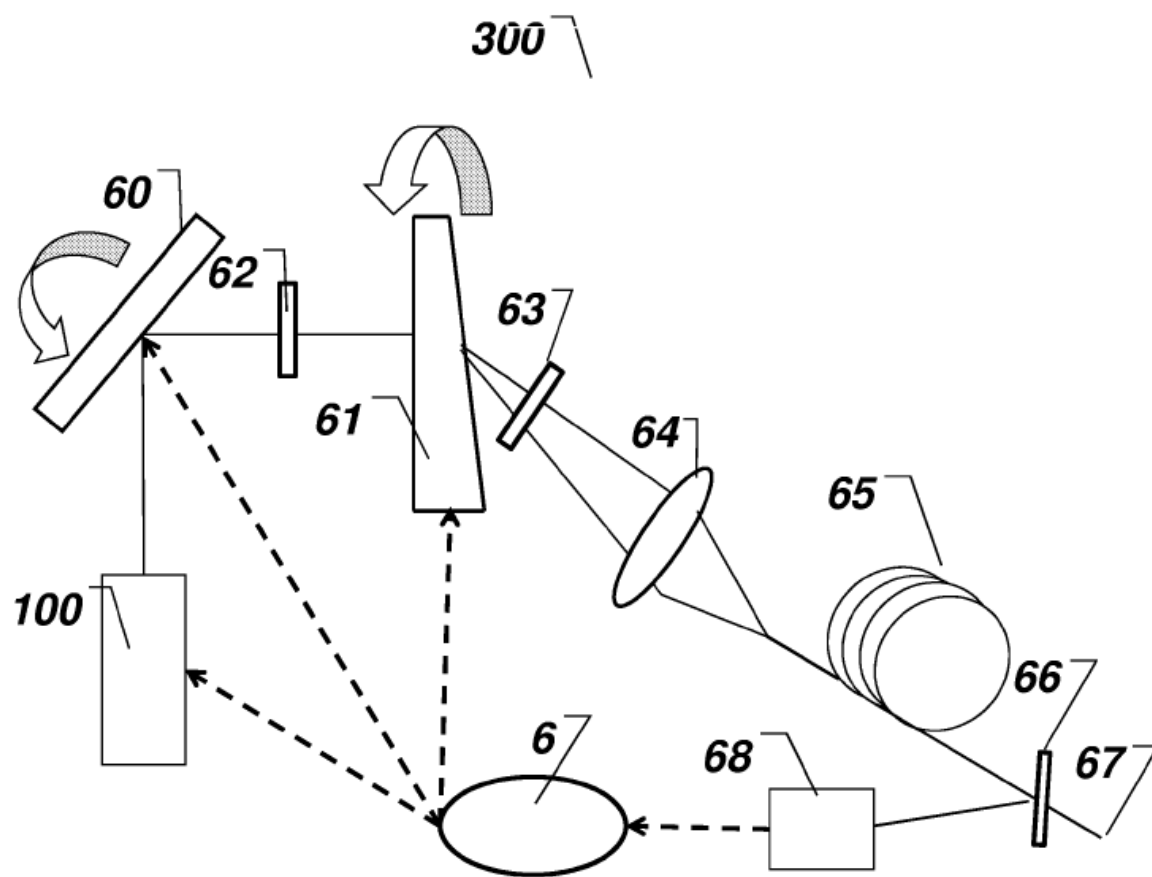


Fig. 6

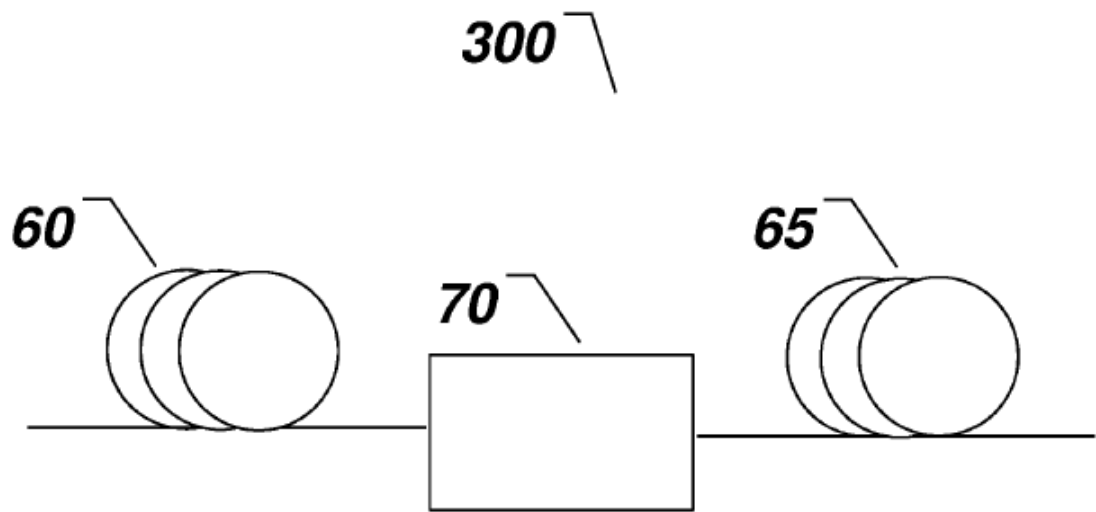


Fig. 7

