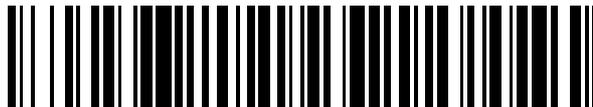


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 628 456**

51 Int. Cl.:

G01B 9/02

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **26.09.2011 PCT/EP2011/004813**

87 Fecha y número de publicación internacional: **04.04.2013 WO13044932**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.09.2011 E 11767165 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **03.05.2017 EP 2761248**

54 Título: **Técnica de Tomografía de Coherencia Óptica**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
02.08.2017

73 Titular/es:

**WAVELIGHT GMBH (100.0%)
Am Wolfsmantel 5
91058 Erlangen, DE**

72 Inventor/es:

**VOGLER, KLAUS, DR. y
WISWEH, HENNING, DR.**

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 628 456 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

Técnica de Tomografía de Coherencia Óptica.

Campo técnico

La presente descripción se refiere a una técnica de Tomografía de Coherencia Óptica (OCT). Más específicamente, y no a modo de limitación, la descripción se refiere a un dispositivo de OCT que incluye una fuente de luz de barrido de pulso alargado y a un método para realizar la OCT utilizando una fuente de luz de banda ancha de pulso alargado.

Antecedentes

La Tomografía de Coherencia Óptica (OCT) es una técnica de formación de imágenes no invasiva y a menudo sin contacto. La luz con una longitud de coherencia definida es irradiada en una muestra que refleja o reemite la luz en diferentes profundidades de penetración, lo cual codifica información en la fase de la luz. La luz de la muestra se superpone con la luz coherente de una rama de referencia.

Los sistemas OCT clásicos utilizan un espejo móvil en una rama de referencia mecánica para una longitud óptica variable de la rama de referencia. Los sistemas OCT modernos utilizan la OCT de dominio de Fourier (FD-OCT). El rendimiento de un sistema OCT se puede caracterizar por su resolución axial y/o su profundidad de escaneo axial.

En algunos de los sistemas OCT existentes, la resolución axial o la profundidad de escaneo axial pueden estar limitadas por las características del sistema OCT. A modo de ejemplo, un sistema OCT que utiliza la OCT de dominio espectral (SD-OCT, que es un caso de FD-OCT) puede tener una profundidad de escaneo axial limitada por la resolución espectral de un espectrómetro. Como otro ejemplo, un sistema OCT que utiliza la fuente de barrido OCT (SS-OCT, que es otro caso de FD-OCT) puede tener una profundidad de escaneo axial limitada principalmente por el ancho de línea instantáneo $\delta\lambda$ de la fuente de barrido. Además, un sistema OCT que utiliza FD-OCT puede tener una resolución axial que no se puede ajustar de manera independiente de su profundidad de escaneo axial. Por ejemplo, la profundidad de escaneo Δz_{\max} puede ser proporcional a la resolución axial δz_{\min} para una resolución espectral o temporal dada del detector. Además, un sistema SS-OCT puede tener una resolución axial más baja, porque su fuente de barrido de luz puede ajustarse sobre un ancho de banda $\Delta\lambda$ espectral global (también denominado intervalo de ajuste) que es más estrecho que un ancho de banda $\Delta\lambda$ completo de una fuente de luz utilizable para SD-OCT sin ajuste de la fuente de luz.

El documento "Tomografía de coherencia óptica de ultra-alta velocidad con una fuente supercontinua de pulso alargado" por S. Moon y otros en Óptica Expreso Vol.14, N° 24 (2006), describe un esquema de Tomografía de Coherencia Óptica de dominio de Fourier (FD-OCT) basado en una fuente supercontinua de pulso alargado. Un pulso de ancho de banda corto de una fuente supercontinua es alargado a un pulso largo, utilizando una fibra dispersiva debido a la dispersión de la velocidad de grupo y se utiliza directamente como luz de barrido de frecuencia. El interferograma espectral se adquiere en el dominio del tiempo y se convierte al dominio espectral mediante la aplicación de una relación del retardo de tiempo con la longitud de onda previamente calibrada. Utilizando este esquema de OCT de pulso alargado, se puede lograr un escaneo de línea axial de ultra-alta velocidad a una frecuencia de 5 MHz.

El documento " Reflectometría óptica ultrarrápida en el dominio de la frecuencia basada en el alargamiento del tiempo inducido por la dispersión: principio y aplicaciones" por T.-J. Ahn y otros en la revista IEEE de Temas Seleccionados en Electrónica Cuántica, Vol.18, N.1 (2012, publicado en línea el 03-2011), revisa el progreso reciente en el alargamiento de tiempo OFDR, que es una técnica particular de la Reflectometría óptica en el dominio de la frecuencia (OFDR). La técnica se basa en la utilización de un mapeo tiempo-frecuencia inducido por dispersión lineal del interferograma del ancho de banda espectral objetivo que permite capturar información espectral en tiempo real utilizando una sola etapa de fotodetección y un convertidor analógico-digital rápido. Se proporciona un marco teórico para el alargamiento de tiempo OFDR y se describe una aplicación de la misma para (a) la medición en tiempo real del retardo de grupo de los dispositivos dispersivos de banda ultra-ancha, (b) la medición del retardo modal de las fibras de modo de orden superior, (c) las mediciones en tiempo real de la respuesta temporal en el campo complejo de los moduladores de alta velocidad y (d) la formación de imágenes biomédicas OCT en tiempo real.

Resumen

Hay una necesidad de una técnica de tomografía de coherencia óptica que mejore, al menos bajo ciertas condiciones, las limitaciones de una resolución axial y/o de una profundidad de escaneo y permita una libre elección de la resolución axial y la profundidad de escaneo. De acuerdo con un aspecto, se proporciona un dispositivo para tomografía de coherencia óptica u OCT, de acuerdo con la reivindicación 1. El dispositivo comprende un generador de luz adaptado para generar una serie de pulsos de entrada de luz coherente, teniendo cada pulso de entrada de la serie una anchura de pulso de entrada; un medio dispersivo que tiene una entrada acoplada ópticamente al generador de luz y una salida para los pulsos de salida, en donde el medio dispersivo está adaptado para alargar la anchura de pulso de entrada hasta una anchura de pulso de salida de cada uno de los pulsos de salida mediante

dispersión cromática; un acoplador óptico adaptado para acoplar los pulsos de salida de la salida en un brazo de referencia y en un brazo de muestra y para sobreponer la luz que retorna del brazo de referencia y del brazo de muestra; y un detector adaptado para detectar una intensidad de interferencia de la luz superpuesta con una resolución temporal de una fracción de la anchura de pulso de salida. Cada pulso de entrada de la serie puede tener un ancho de banda $\Delta\lambda$ completo, también denominado intervalo espectral de entrada. El acoplador óptico puede ser un divisor de haz, por ejemplo, un divisor de haz basado en fibra o un divisor de haz de espacio libre. La fracción de la anchura de pulso de salida se puede designar por δt_{puerta} .

El término "luz", según se utiliza en la presente memoria, puede incluir ondas electromagnéticas que tengan longitudes de onda (vacío) en el intervalo de 600 nm a 1.500 nm, preferiblemente en el intervalo de 650 nm a 1.050 nm o en el intervalo de 850 nm a 1.250 nm o en el intervalo de 1.100 nm a 1.500 nm.

Algunas formas de realización pueden permitir modificar una resolución axial de la OCT modificando un parámetro relacionado con el generador de luz (por ejemplo, un ancho de banda del generador de luz, también denominado intervalo espectral de entrada). La invención permite modificar una profundidad de escaneo axial de la OCT modificando un parámetro relacionado con el medio dispersivo (una longitud de una trayectoria de propagación de la luz en el medio dispersivo) y, en algunas formas de realización, un parámetro relacionado con el detector (por ejemplo, una duración de la fracción). Además, la resolución axial y la profundidad de escaneo axial se pueden modificar de forma independiente en todas las formas de realización. Un espectrómetro y/o un generador de luz ampliamente ajustable (por ejemplo, ajustable en la totalidad del ancho de banda $\Delta\lambda$) capaz de producir simultáneamente un ancho de banda instantáneo muy estrecho (que también se puede designar por el símbolo $\delta\lambda$) se pueden omitir en determinadas formas de realización.

Cada pulso de entrada en la serie o toda la serie puede tener un intervalo espectral de entrada que sea al menos, en esencia, independiente del tiempo. Alternativa o adicionalmente, cada pulso de entrada en la serie o toda la serie puede tener una longitud de onda central de entrada que sea al menos, en esencia, independiente del tiempo. Cada pulso de salida puede tener un intervalo espectral de salida promediado en el tiempo que se corresponda al menos, en esencia, con el intervalo espectral de entrada.

Cada pulso de salida puede tener una longitud de onda máxima de salida instantánea (también designada con el símbolo $\lambda(t)$). La longitud de onda máxima de salida instantánea puede ser dependiente del tiempo y/o diferente para diferentes fracciones de la anchura de pulso de salida. La longitud de onda máxima de salida instantánea puede modificarse de forma repetitiva con el tiempo (durante un periodo que se corresponde con la anchura de pulso de salida). Alternativa o adicionalmente, cada pulso de salida puede tener un intervalo espectral de salida instantáneo (también designado con el símbolo $\delta\lambda$). El intervalo espectral de salida instantáneo también se denomina como un ancho de banda instantáneo, un ancho de línea instantáneo o un intervalo espectral de salida instantáneo. El intervalo espectral de salida instantáneo puede ser dependiente del tiempo y/o diferente para diferentes fracciones de la anchura de pulso de salida. El intervalo espectral de salida instantánea puede desplazarse de forma repetitiva con el tiempo (durante un periodo que se corresponde con la anchura de pulso de salida). El intervalo espectral de entrada puede ser varias veces más amplio que uno o cada uno de los intervalos espectrales de salida instantáneos.

El medio dispersivo puede incluir una fibra óptica o una guía de ondas. La guía de ondas puede incluir estructuras de rejilla, por ejemplo, rejillas de Bragg dispersivas (DBG). La fibra óptica puede incluir estructuras de rejilla, por ejemplo, rejillas de Bragg de fibra chirpeada (FBG chirpeada). Una trayectoria de propagación de la luz en el medio dispersivo puede ser, en esencia, recta. Alternativa o adicionalmente, la trayectoria de propagación de la luz se puede doblar. La trayectoria doblada puede incluir reflexiones en una interfaz o un límite del medio. La trayectoria de propagación de la luz en el medio dispersivo desde la entrada hasta la salida puede ser al menos de 1 km y/o hasta 10 km, hasta 60 km o hasta 100 km (por ejemplo, en fibra). Además, la trayectoria puede tener una longitud de al menos 1 cm o 2 cm y/o hasta 20 cm o 50 cm (por ejemplo, en una guía de ondas o un cristal de Bragg).

El pulso de entrada puede ensancharse espectralmente a lo largo de la trayectoria de propagación. El ensanchamiento espectral puede dar lugar a una correlación de longitud de onda y tiempo de salida. La longitud de onda máxima de salida instantánea del pulso de salida puede correlacionarse con un tiempo de salida. El tiempo de salida puede definirse con relación a un tiempo de generación del pulso de entrada del generador de luz. El tiempo de salida puede ser lineal en la longitud de onda λ o lineal en un número de onda,

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

El medio dispersivo incluye, de acuerdo con la invención, varias tomas en diferentes posiciones a lo largo de la trayectoria de propagación de la luz. El dispositivo comprende además un conmutador óptico adaptado para acoplar selectivamente el generador de luz con una de las tomas como la entrada. Alternativa o adicionalmente, el conmutador óptico puede estar adaptado para acoplar selectivamente una de las tomas como la salida al acoplador óptico.

La dispersión cromática del medio dispersivo puede ser una dispersión lineal. Es decir, el parámetro de dispersión puede ser, en esencia, independiente de la longitud de onda en el intervalo espectral de entrada o lineal en el

número de onda, $k = 2\pi/\lambda$. La dispersión puede ser una dispersión de la velocidad de grupo. Un parámetro de dispersión del medio dispersivo puede ser igual o mayor que 10.000 ps/(km·nm), preferiblemente aproximadamente 13.200 ps/(km·nm) o mayor. El parámetro de dispersión puede ser proporcional a una segunda derivada de un índice de refracción del medio con respecto a la longitud de onda. La dispersión puede ser positiva. La dispersión positiva puede corresponder a un parámetro de dispersión negativo. Las longitudes de onda largas en el pulso de salida pueden estar temporalmente por delante de longitudes de onda cortas en el pulso de salida. El medio dispersivo puede emitir primero longitudes de onda largas en cada pulso de salida. La longitud de onda máxima instantánea de cada pulso de salida puede barrer desde longitudes de onda largas hasta longitudes de onda cortas (es decir, "chirpeada" positivamente). El pulso de entrada puede ser sin chirpear. El pulso de salida puede ser con chirpeado aumentado (en caso de dispersión positiva). Alternativamente, el pulso de salida puede ser con chirpeado disminuido (en caso de dispersión negativa).

El dispositivo puede comprender además un generador de campo adaptado para generar un campo externo. El campo externo puede actuar sobre el medio dispersivo. El parámetro de dispersión del medio puede ser controlado o controlable mediante una fuerza de campo externo.

El medio dispersivo puede ser distinto de un medio de ganancia del generador de luz. El medio dispersivo puede estar fuera de un medio de ganancia del generador de luz. El detector puede detectar la intensidad de al menos una de entre la longitud de onda máxima de salida instantánea dependiente del tiempo ($\lambda(t)$) y el intervalo espectral de salida instantáneo dependiente del tiempo ($\lambda(t) - \delta\lambda / 2 \dots \lambda(t) + \Delta\lambda/2$). El detector puede además adaptarse para muestrear la intensidad para varias fracciones consecutivas. No es necesario que cada una de las intensidades detectadas para las fracciones respectivas se resuelva espectralmente. Las varias fracciones muestreadas pueden cubrir, en esencia, la anchura de pulso de salida o un periodo que se corresponde con la anchura de pulso de salida.

El medio dispersivo puede configurarse para proporcionar el pulso de salida. El pulso de salida puede tener un número de onda máximo de salida instantáneo, $k(t)$ que varíe en función del tiempo. El número de onda máximo de salida instantáneo $k(t)$ puede variar linealmente en el tiempo. El pulso de salida puede tener un "chirp" que sea no lineal en la longitud de onda $\lambda(t)$ y/o lineal en $k(t)$ (también denominado "chirp lineal en k "). Un chirp que es lineal en el número de onda puede ser proporcionado por una fibra de cristal fotónico (PCF). El detector puede estar adaptado para muestrear las fracciones uniformemente en el tiempo, por ejemplo, a intervalos iguales o periódicamente. Alternativamente, el medio dispersivo puede configurarse para proporcionar un "chirp" que sea no lineal en el número de onda, $k(t)$. El chirp puede ser lineal en la longitud de onda, $\lambda(t)$, o la frecuencia, $\omega(t)$. El detector puede estar adaptado para muestrear las fracciones linealmente en el número de onda k . El detector se calibra para una modificación lineal del número de onda $k(t)$ (es decir, una, en esencia, función lineal del tiempo) o para una modificación no lineal del número de onda $k(t)$ (como una función no lineal del tiempo). El detector se calibra, de acuerdo con la invención, mediante una sincronización óptica, por ejemplo, una sincronización k . La sincronización óptica incluye un interferómetro de Mach-Zehnder. La sincronización óptica sigue o rastrea la modificación en el número de onda en tiempo real. Además, el detector puede incluir un almacenamiento en el que puede codificarse una tabla de calibración. La tabla de calibración puede relacionar el número de onda y el tiempo. La tabla de calibración puede incluir o representar una función tabulada $k(t)$. La tabla de calibración puede determinarse y/o codificarse en un momento de fabricación del dispositivo o antes de realizar la OCT. El detector puede muestrear la intensidad de interferencia de las fracciones a veces definidas por la tabla de calibración. El muestreo de la intensidad de interferencia de las fracciones de una manera que sea lineal en el número de onda puede evitar una pérdida en la señal de la interferencia (también denominada como una señal de modulación), particularmente puede evitar un decremento en la sensibilidad y/o la relación señal ruido (SNR). Además, se pueden reducir los requisitos para una unidad de procesamiento, ya que no se requiere ninguna etapa de procesamiento intermedio para generar los datos lineales en el número de onda.

La fracción, o cada una de las fracciones, pueden ser iguales o más cortas que 1/500, 1/1.000 o 1/10.000 de la anchura de pulso de salida, o pueden tener una duración de entre 1/10.000 y 1/500 de la anchura de pulso de salida. Las varias fracciones muestreadas (por pulso de salida) pueden ser al menos 500, o al menos 1.000, o al menos 10.000. Alternativa o adicionalmente, la fracción, o cada una de las fracciones, puede ser menor que 200 ns, preferiblemente más corta que 100 ns.

El detector puede incluir un fotodiodo o una unidad de detector equilibrado dual. La unidad de detector equilibrado dual puede permitir reducir el ruido de la intensidad relativa del generador de luz. El detector puede incluir además una unidad de puerta (que también se denomina como electrónica de puerta) conectada al fotodiodo. La unidad de puerta puede estar adaptada para truncar una señal de intensidad de acuerdo con la fracción y/o leer la intensidad para cada una de las fracciones muestreadas. El detector puede incluir una memoria intermedia adaptada para almacenar las lecturas de intensidad de las varias fracciones muestreadas. El detector puede incluir un procesador adaptado a aplicar la transformada de Fourier a las lecturas de intensidad (que corresponden a un pulso de salida) y/u otras funciones de procesamiento de señal.

El generador de luz puede ser un generador de luz de banda ancha. El generador de luz puede estar adaptado para generar los pulsos de entrada sobre un espectro de banda ancha. El generador de luz puede incluir un láser de titanio-zafiro (también denominado como láser Ti-zafiro o láser Ti:S) o cualquier otro láser de pulso corto o láser de pulso ultra-corto. La longitud de onda central puede estar en el intervalo de 750 nm a 850 nm, preferiblemente

aproximadamente 800 nm. El intervalo espectral de entrada puede ser aproximadamente igual o superior a 200 nm (por ejemplo, 300 nm o 400 nm). El láser de titanio-zafiro puede ser pulsado. Alternativa o adicionalmente, el generador de luz puede incluir un diodo super luminescente (SLD) o cualquier otra fuente de luz de banda ancha, por ejemplo, una fuente de emisión espontánea amplificada (fuente ASE) o una fuente de luz supercontinua pulsada.

5 La fuente de luz supercontinua puede incluir al menos uno de entre un láser de picosegundos, un láser de nanosegundos y una fibra no lineal acoplada al láser. La fibra no lineal puede estar configurada para generar un espectro amplio y, en esencia, continuo por medio de efectos ópticos no lineales.

El detector y el generador de luz pueden estar sincronizados. Un controlador conectado al generador de luz y al detector puede estar adaptado para el control síncrono. La sincronización puede incluir una modificación de tiempo fija. La modificación de tiempo puede ser un retardo de tiempo entre la generación de los pulsos de entrada y el muestreo de las intensidades de las varias fracciones. La serie de pulsos de entrada puede ser periódica. El generador de luz puede generar la serie de pulsos de entrada con una frecuencia de repetición. El muestreo puede ser iniciado o activado con la misma frecuencia de repetición. La frecuencia de repetición puede definir una frecuencia de adquisición de línea-A de la OCT.

10

El generador de luz puede incluir una fuente de luz de onda continua (fuente de luz CW) y un obturador óptico. El obturador puede estar dispuesto operativamente entre la fuente de luz CW y la entrada del medio dispersivo. El obturador puede estar adaptado para truncar o bloquear periódicamente la luz procedente de la fuente de luz CW. El obturador puede funcionar a una frecuencia de obturación que se corresponde con la frecuencia de repetición. La frecuencia de obturación puede ser al menos de 10 kHz, 20 kHz o 50 kHz. La frecuencia de obturación puede ser de hasta 100 kHz, 500 kHz, 1 MHz o 3 MHz.

15
20

El acoplador óptico puede incluir al menos uno de entre un divisor de haz y un acoplador de fibra óptica. El acoplador óptico puede acoplar la salida a los brazos con igual intensidad. Alternativamente, el acoplador óptico puede acoplar la salida a los brazos con diferentes intensidades de forma que aumente la intensidad del brazo de muestra. El brazo de muestra puede proporcionar luz dispersa de retorno. La luz dispersa de retorno puede dispersarse a partir de una muestra. El divisor de haz puede incluir un espejo parcialmente transparente, por ejemplo, un espejo semitransparente. El acoplador óptico puede ser un acoplador de fibra óptica. El acoplador de fibra óptica puede ser un acoplador de fibra fundida o incluir un estrechamiento de fibra. El acoplador óptico puede ser un acoplador 2-por-2. El acoplador óptico puede ser un acoplador de división 50%-50% o puede suministrar cualquier otra relación de división. Alternativa o adicionalmente, el acoplador óptico puede incluir un circulador. El circulador puede ser un circulador de tres puertos. Un primer puerto del circulador puede acoplarse a la salida. Un segundo puerto del circulador (en la dirección de circulación) puede acoplarse a un acoplador 1-por-2. Un tercer puerto del circulador (en la dirección de circulación) puede estar acoplado al detector.

25
30

De acuerdo con otro aspecto, se proporciona un método para realizar la tomografía de coherencia óptica u OCT de acuerdo con la reivindicación 15. El método comprende generar una serie de pulsos de entrada de luz coherente, teniendo cada pulso de entrada de la serie una anchura de pulso de entrada; alargar la anchura de pulso de entrada de cada uno de los pulsos de entrada hasta una anchura de pulso de salida de los pulsos de salida mediante dispersión cromática en un medio dispersivo; acoplar los pulsos de salida de la salida desde la salida en un brazo de referencia y en un brazo de muestra y superponer la luz que retorna del brazo de referencia y del brazo de muestra; y detectar una intensidad de interferencia de la luz superpuesta con una resolución temporal de una fracción de la anchura de pulso de salida.

35
40

El método puede ser realizado por el dispositivo. El método puede comprender además cualquier característica o etapa mencionada en el contexto del aspecto dispositivo.

Breve descripción de los dibujos

Otras características, ventajas y efectos técnicos de la descripción se pondrán de manifiesto en la descripción detallada siguiente de formas de realización de ejemplo con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

45 La Fig. 1 ilustra esquemáticamente una primera forma de realización de un dispositivo para tomografía de coherencia óptica que incluye un medio dispersivo;

La Fig. 2 ilustra esquemáticamente una segunda forma de realización de un dispositivo para tomografía de coherencia óptica que incluye un medio dispersivo;

50 La Fig. 3 ilustra esquemáticamente una tercera forma de realización de un dispositivo para tomografía de coherencia óptica que incluye un medio dispersivo;

La Fig. 4 muestra un diagrama esquemático de una primera distribución de energía de entrada en una entrada del medio dispersivo de la Fig. 1, 2 o 3;

La Fig. 5 muestra un diagrama esquemático de una primera distribución de energía de salida en una salida del medio dispersivo de la Fig. 1, 2 o 3 como resultado de la primera distribución de energía de entrada;

La Fig. 6 muestra un diagrama esquemático de una segunda distribución de energía de entrada en una salida del medio dispersivo de la Fig. 1, 2 o 3;

La Fig. 7 muestra un diagrama esquemático de una segunda distribución de energía de salida en una salida del medio dispersivo de la Fig. 1, 2 o 3 como resultado de la segunda distribución de energía de entrada; y

5 La Fig. 8 muestra un diagrama de medición de un parámetro de dispersión del medio dispersivo de la Fig. 1, 2 o 3.

Todas las formas de realización de acuerdo con la invención comprenden varias tomas, un conmutador óptico y un interferómetro de Mach-Zehnder como el reivindicado, incluso si estos elementos no están incluidos en las figuras.

Descripción detallada

10 La tomografía de coherencia óptica (OCT) moderna está dominada por la llamada OCT de dominio de Fourier (FD-OCT), que logra una mejor relación señal ruido (SNR) en comparación con la OCT de dominio en el tiempo (TD-OCT) clásica. Además, al evitar un escaneo z mecánico (es decir, un brazo de referencia cuya longitud óptica se modifique mecánicamente), son alcanzables frecuencias de escaneo significativamente más altas, por ejemplo, $f_R > 100$ kHz, es alcanzable. La FD-OCT se implementa como OCT de dominio espectral (SD-OCT) u OCT de fuente de barrido (SS-OCT).

15 Un sistema de SD-OCT moderno se describe en el artículo "Formación de imágenes de los segmentos oculares interiores ampliadas in vivo con tomografía de coherencia óptica de dominio espectral compleja de intervalo completo" por J. Jungwirth y otros en la Revista de Óptica Biomédica, juego de páginas 050501, Vol. 14 (5), 2009. Se describe una limitación intrínseca de una profundidad de escaneo y una forma de duplicar la profundidad de escaneo limitada por medio de una técnica denominada compleja de intervalo completo (FRC).

20 Se describe un sistema SS-OCT con referencia a la Fig. 2 en el artículo "Formación de imágenes ópticas en el dominio de la frecuencia de alta velocidad" por S.H. Yun y otros en Óptica Expreso, Vol. 11, N° 22, páginas 2.953 – 2.963. Aparte de la frecuencia de escaneo, un ancho de banda $\Delta\lambda$ emitido por una fuente de luz de un dispositivo OCT y un ancho de línea instantáneo $\delta\lambda$ del ancho de banda $\Delta\lambda$ de emisión influye significativamente en un rendimiento del dispositivo OCT, que incluye una resolución axial δz_{min} y una profundidad de escaneo axial Δz_{max} , según se detalla más adelante.

25 La resolución axial δz_{min} (tanto en SD-OCT como SS-OCT) se determina por el ancho de banda $\Delta\lambda$ de la fuente de luz de acuerdo con:

$$\delta z_{min} = \frac{2 \ln 2}{\pi} \frac{\lambda_0^2}{n \Delta\lambda},$$

30 En donde n designa un índice de refracción de una muestra, tal como tejido. Por ejemplo, $n = 1,37$ para una córnea de un ojo. El símbolo λ_0 designa una longitud de onda central en el ancho de banda $\Delta\lambda$ definido por el ancho de banda de anchura completa a la mitad del máximo (FWHM) de la fuente de luz.

Se establece una limitación de la profundidad de escaneo axial Δz_{max} , en SD-OCT y SS-OCT, mediante la resolución espectral $\delta\lambda$ de detección o el ancho de línea instantáneo del láser de barrido, respectivamente, de acuerdo con:

$$\Delta z_{max} = \frac{\ln 2}{n\pi} \frac{\lambda_0^2}{\delta\lambda},$$

35 en donde λ_0 y n designan la longitud de onda central y el índice de refracción, respectivamente. En el caso de SD-OCT utilizando un espectrómetro con una matriz de detectores lineales, la resolución espectral $\delta\lambda$ está limitada por un tamaño de píxel de la matriz de detectores lineales, en la que se irradia un espectro de luz transversalmente descompuesto.

Los principios físicos subyacentes de la FD-OCT relacionan de este modo los límites de la profundidad de escaneo Δz_{max} y la resolución axial δz_{min} de acuerdo con:

40
$$\Delta z_{max} = \frac{\Delta\lambda}{2 \cdot \delta\lambda} \delta z_{min}.$$

Por consiguiente, un requisito para un sistema de SD-OCT puede apuntar a la detección de la anchura espectral completa (es decir, el objetivo de un gran $\Delta\lambda$) y, al mismo tiempo, puede apuntar a una resolución espectral alta (es decir, en una pequeña $\delta\lambda$). Sin embargo, la resolución espectral $\delta\lambda$ y el ancho de banda $\Delta\lambda$ cubiertos por el detector no son independientes, sino que están relacionados por un número de píxeles en la matriz de detectores lineales. Si se mejora la resolución espectral $\delta\lambda$ aumentando el ensanchamiento transversal de la descomposición espectral que se irradia en la matriz de detectores lineales, se puede reducir el ancho de banda $\Delta\lambda$ cubierto por la matriz de detectores lineales. El tamaño de píxel fabricable y el número de píxeles en la matriz de detectores lineales de los

espectrómetros, así como las aberturas de lentes acromáticas y las rejillas de difracción, determinan las limitaciones técnicas para mejorar de forma independiente la resolución axial δz_{\min} y la profundidad de escaneo Δz_{\max} .

5 Las limitaciones técnicas limitan de este modo el rendimiento de los sistemas de SD-OCT y pueden excluir determinadas aplicaciones. A modo de ejemplo, los sistemas modernos de SD-OCT pueden lograr una resolución axial δz_{\min} bastante alta, pero con una profundidad de escaneo Δz_{\max} relativamente baja, según se ilustra por el ejemplo numérico más adelante.

10 El uso de un láser de Ti-zafiro (láser TIS) como fuente de luz con longitud de onda central $\lambda_0 = 800$ nm y un bastante avanzado ancho de banda $\Delta\lambda = 200$ nm es posible en combinación con un avanzado número de píxeles de $N = 4.096$ píxeles, una buena resolución axial $\delta z_{\min} = 1,0$ μm y una profundidad de escaneo $\Delta z_{\max} = 2,1$ mm en tejido con $n = 1,37$. En este ejemplo, el número limitado de píxeles implica una resolución espectral limitada

$$\delta\lambda = \Delta\lambda / N = 200 \text{ nm} / 4096 \text{ px} = 0.05 \text{ nm/px},$$

que a su vez limita la profundidad de escaneo Δz_{\max} . La alta resolución axial obvia de este modo una gran profundidad de escaneo y viceversa.

15 En el caso de SS-OCT, una fuente de luz láser se ajusta rápidamente a través de la totalidad del ancho de banda emisible $\Delta\lambda$, dando lugar a un ancho de línea instantáneo $\delta\lambda$ con el que la fuente de luz láser oscila en un tiempo t del ajuste. Sin embargo, el ancho de banda instantáneo $\delta\lambda$ está limitado por un factor de calidad (o factor Q) de una cavidad de la fuente de luz láser y por un tiempo de estabilización de la oscilación. Por otra parte, el ancho de banda $\Delta\lambda$ de las fuentes de luz ajustables requerido para la SS-OCT es normalmente inferior de 120 nm, que es la razón
20 ligeramente más ancha en comparación con la SD-OCT. Además, actualmente no hay fuentes de luz láser disponibles para la SS-OCT con suficiente ancho de banda $\Delta\lambda$ ajustable con un intervalo espectral que cubra una $\lambda_0 = 800$, lo que reduce significativamente la resolución axial, puesto que δz_{\min} es proporcional al cuadrado de λ_0 . Utilizando fuentes de luz láser de barrido muy avanzadas, un sistema de SS-OCT puede lograr el rendimiento del ejemplo numérico de más adelante.

25 Asumir que las fuentes de luz láser de barrido tienen una longitud de onda central $\lambda_0 = 1.060$ nm, un ancho de banda total $\Delta\lambda = 120$ nm y proporcionan un ancho de línea instantánea $\delta\lambda = 0,06$ nm, da lugar a una resolución axial $\delta z_{\min} = 3,0$ μm (para tejido corneal) o $\delta z_{\min} = 4,1$ μm (en el aire) y una profundidad de escaneo $\Delta z_{\max} = 3,0$ mm (para tejido corneal) o $\Delta z_{\max} = 4,1$ mm (en el aire).

30 Como se ha hecho evidente a partir de las consideraciones anteriores del método para la FD-OCT y los correspondientes ejemplos numéricos, una alta resolución axial δz_{\min} y una amplia profundidad de escaneo Δz_{\max} no se pueden realizar simultáneamente.

35 La Fig. 1 ilustra esquemáticamente una disposición de componentes ópticos y su acoplamiento mutuo de acuerdo con una primera forma de realización de un dispositivo 100a para tomografía de coherencia óptica. El dispositivo 100a comprende un generador de luz 110, un medio dispersivo 120 que tiene una entrada 122 y una salida 124, un acoplador óptico 130 y un detector 140. El generador de luz 110 está ópticamente acoplado a la entrada 122. El generador de luz 110 y el medio dispersivo 120 forman una fuente de luz 150 del dispositivo 100a.

40 El acoplador óptico 130 recibe la luz que es emitida por la fuente de luz 150 y divide equitativamente la luz por medio de un espejo semitransparente 132 en un brazo de referencia 160 terminado por un espejo 162 y en un brazo de muestra 170. La luz que se propaga hacia el acoplador 130 en el brazo de referencia 160 y en el brazo de muestra 170 se superpone mediante el acoplador 130 en un brazo de detección 180.

45 El detector 140 comprende un fotodiodo 142, una unidad de puerta 144, una memoria intermedia 146, una unidad de adquisición de datos 143, una unidad de procesamiento 145, una unidad de almacenamiento 147 y una pantalla 148. El fotodiodo 142 está dispuesto en el brazo de detección 180. El fotodiodo 142 tiene un tiempo de respuesta inferior de 50 ps, preferiblemente del orden de 35 ps o 40 ps o entre ellos. Una resolución temporal también puede depender del tiempo muerto del fotodiodo de aproximadamente 100 ps, que puede reducirse o evitarse utilizando de forma consecutiva más de un fotodiodo 142 o más de un detector 140. La unidad de puerta 144 está conectada eléctricamente al fotodiodo 142. La unidad de puerta 144 secuenciar una señal de intensidad del fotodiodo 142 en fracciones temporales δt_{puerta} . La memoria intermedia 146 almacena temporalmente muestras de la señal de intensidad secuenciada. Cada muestra representa una fracción en la secuencia de fracciones. La memoria intermedia 146 almacena la intensidad de cada fracción en asociación con un número consecutivo de la fracción, un tiempo de detección o una longitud de onda dependiente del tiempo (que se detalla con referencia a las Fig. 5 y 7). La unidad de adquisición de datos 143 es una interfaz a través de la cual la unidad de procesamiento 145 recupera los datos de aquellas fracciones que se corresponden con uno de los pulsos de salida 302, 304, 306.

55 La unidad de procesamiento está adaptada para leer las muestras de intensidad de una secuencia de la memoria intermedia 146 a través de la unidad de adquisición de datos 143 y para realizar una transformación de Fourier de las mismas. Un resultado de la transformada de Fourier se almacena de forma permanente en la unidad de almacenamiento 147 y/o se muestra a un usuario en la pantalla 148.

El brazo de muestra 170 comprende un escáner xy 172 y una lente 174. El escáner xy 172 incluye un par de espejos pivotantes 176 y 178 que desvían la luz en el brazo de muestra 170 (propagándola ya sea desde el acoplador 130 a la lente 174 o en la otra dirección) en una primera dirección transversal y una segunda dirección transversal perpendicular a la primera dirección transversal, respectivamente. La lente de escaneo 174 forma un foco de haz aproximadamente gaussiano, cuya cintura de haz está enfocada dentro de una muestra 190, tal como la córnea o la retina de un ojo.

La Fig. 2 ilustra esquemáticamente una segunda forma de realización de un dispositivo 100b para tomografía de coherencia óptica. Los signos de referencia correspondientes se refieren a componentes y características según se describe en el contexto de la forma de realización 100a. El dispositivo 100b difiere en que el acoplador óptico 130 incluye un acoplador de fibras fusionadas 2-a-2. Una primera pareja interfaz de fibras fusionadas se acopla ópticamente a la salida 124 del medio dispersivo 120 y al detector 148, respectivamente. Una segunda pareja interfaz de fibras fusionadas se acopla ópticamente al escáner xy 172 y al brazo de referencia 160, respectivamente.

La Fig. 3 ilustra esquemáticamente una tercera forma de realización de un dispositivo 100c para tomografía de coherencia óptica. El dispositivo 100c incluye componentes y características designadas por los signos de referencia correspondientes según lo descrito anteriormente con referencia a las Fig. 1 o 2. El dispositivo 100c difiere en que el acoplador óptico 130 incluye un circulador 134 y un acoplador 1-a-2 136. El circulador 134 tiene tres puertos y está adaptado para transmitir energía que entra por cualquier puerto a un puerto siguiente en una dirección de circulación indicada por una flecha 138. Un primer puerto del circulador 134 está acoplado ópticamente a la salida 124 del medio dispersivo 120. Un segundo puerto (que sigue al primer puerto en la dirección de circulación) del circulador 134 está acoplado ópticamente al único puerto del acoplador 1-a-2 136. Un tercer puerto (que sigue al segundo puerto en la dirección de circulación) del circulador 134 define el brazo de detección 180. El acoplador 1-a-2 136 genera luz desde el segundo puerto del circulador 134 tanto en el brazo de referencia 160 como en el brazo de muestra 170. La luz que retorna desde el brazo de referencia 160 y/o el brazo de muestra 170 se combina en el único puerto del acoplador 1-a-2 y entra de este modo en el segundo puerto del circulador 134. Uno o ambos de entre el brazo de referencia 160 y el brazo de muestra 170 incluyen opcionalmente un controlador de polarización.

El generador de luz 110 es un láser TiS de banda ancha o una fuente supercontinua pulsada (fuente SC). El generador de luz 110 genera pulsos con una longitud de onda central $\lambda_0 = 800 \text{ nm}$, 1.050 nm o 1.300 nm con una frecuencia de repetición $f_R = 1/T_R$ de los pulsos. Una distribución de energía espectral-temporal S_{ENTRADA} para (una parte corta de) una serie de pulsos 202, 204 y 206 en los instantes T_1 , T_2 y T_3 se ilustra esquemáticamente en un diagrama 200a de la Fig. 4. El tiempo se muestra en el eje horizontal y la longitud de onda en el eje vertical del diagrama 200a. La distribución de energía espectral-temporal se ilustra esquemáticamente como una densidad espectral-temporal que es una función de tanto el tiempo como la longitud de onda. La Fig. 6 ilustra esquemáticamente en un diagrama 200b una variante de la distribución de energía espectral-temporal S_{ENTRADA} en la entrada 122. Las longitudes de onda extremas en el intervalo espectral $\Delta\lambda$ amplio son proporcionadas por el generador de luz 110 sobre, en esencia, la anchura de pulso completa T_0 . Las líneas cerradas indican esquemáticamente las líneas de igual densidad de energía.

En una variante de cada uno de los dispositivos 100a, 100b y 100c, el generador de luz 110 incluye una fuente de luz de onda continua (CW) de banda ancha, tal como un diodo súper luminiscente (SLD) o una emisión espontánea amplificada (ASE). La fuente de luz CW tiene una alta intensidad o luminiscencia. La fuente de luz CW proporciona un espectro de banda ancha correspondiente al intervalo espectral de entrada $\Delta\lambda$. La fuente de luz CW se trunca ópticamente por medio de un obturador rápido. El obturador funciona a una frecuencia de aproximadamente $f_R = 1 \text{ MHz}$. La luz truncada se introduce en el medio dispersivo 120. El diagrama 200b en la Fig. 6 puede ilustrar esquemáticamente (por ejemplo, de forma más realista que el diagrama 200a en la Fig. 4) la distribución de energía espectral-temporal S_{ENTRADA} proporcionada por el obturador.

Cada pulso 202, 204 o 206 en la serie de pulsos es esencialmente idéntico en cuanto a su distribución de energía en tiempo y frecuencia o longitud de onda. Los pulsos láser TiS tienen un intervalo espectral de entrada $\Delta\lambda$ del orden de 200 nm . Un láser TiS de ejemplo se describe en el artículo "Láser Ti:Al₂O₃ compacto, de bajo costo para tomografía de coherencia óptica de ultra alta resolución in vivo" por A. Unterhuber y otros, Cartas ópticas, Vol. 28, No. 11, p. 905-907, 2003. Una anchura de pulso de entrada T_0 es una duración de pulso definida como el tiempo de energía por encima de un nivel de $1/e^2$ con respecto a un máximo de energía. (Una definición alternativa utiliza un nivel de -3 dB, es decir, el FWHM en el tiempo.) El ancho de pulso de entrada T_0 está en el intervalo de 10 fs a 10 ns , preferiblemente de 1 ps a 1 ns o 2 ns . El intervalo espectral de entrada $\Delta\lambda$ se define como el ancho de banda FWHM, es decir, a un nivel de -3 dB del espectro. Una definición alternativa puede utilizar un nivel de -10 dB (es decir, el intervalo espectral se define en un nivel del 10%) para los espectros complejos o rara vez en un nivel de $1/e^2$. El intervalo espectral de entrada $\Delta\lambda$ define un espectro de barrido eficaz mediante el medio dispersivo 120, según se describe más adelante con referencia a las Fig. 5 y 7.

El pulso de entrada de banda ancha 202, 204 o 206 se alarga en el tiempo cuando el pulso pasa a través del medio altamente dispersivo 120. En las formas de realización 100a, 100b y 100c mostradas en la Fig. 1, 2 y 3, respectivamente, el medio dispersivo 120 es una fibra óptica. El pulso de entrada es sometido a una dispersión lineal de la velocidad de grupo. La alternativa de una dispersión de la velocidad de grupo no lineal se describe más adelante con referencia a la Fig. 8. Como resultado, las componentes espectrales del pulso de entrada se retrasan

de forma diferente o se dispersan de forma temporal entre sí. El retardo es una función de la longitud de onda de modo que, en el caso de dispersión positiva, las longitudes de onda largas se propagan más rápido en el medio dispersivo 120 resultante en pulsos de salida 302, 304 y 306, cuya distribución de energía espectral-temporal S_{SALIDA} se ilustra esquemáticamente mediante el diagrama 300a en la Fig. 5. Una distribución de energía espectral-temporal S_{SALIDA} en la salida 124 del medio dispersivo 120 que resulta de los pulsos de entrada de acuerdo con el diagrama 200b de la Fig. 6 se ilustra esquemáticamente mediante el diagrama 300b en la Fig. 7. Un espectro original 308 de los pulsos de entrada 202, 204 y 206 permanece, en esencia, sin cambios cuando se promedia sobre una escala de tiempo más larga que un pulso de salida con el T_p de cada uno de los pulsos de salida 302, 304 y 306. Más específicamente, los efectos no lineales tales como una ganancia paramétrica, una generación de segundo armónico, una dispersión de órdenes arbitrarios, una auto modulación de fase y una mezcla de cuatro ondas están ausentes o son insignificantes en el medio dispersivo 120. El medio dispersivo 120 es un medio lineal. Específicamente, la longitud de onda central λ_0 se conserva.

En la escala de tiempo significativamente más corta de las fracciones δt_{puerta} resuelta temporalmente por el detector 140, la separación espectral de las diferentes longitudes de onda da lugar a un pulso de salida "con chirpeado aumentado", cuya longitud de onda $\lambda(t)$ es una función del tiempo, según se indica en cada uno de los diagramas 300a y 300b para los tiempos t_1 y t_2 . Un espectro de salida 310 instantáneo, mostrado a modo de ejemplo para el instante t_1 en las Fig. 5 y 7, es una línea estrecha con un intervalo espectral instantáneo $\delta\lambda$ fuera del intervalo espectral de entrada $\Delta\lambda$ completo.

La dispersión del medio 120 es una dispersión cromática o una dispersión de la velocidad de grupo (GVD). La dispersión se describe (al menos parcialmente) por un parámetro de dispersión D. Las fibras diseñadas específicamente están disponibles con grandes parámetros de dispersión para casi cualquier intervalo espectral $\Delta\lambda$ de interés dado, particularmente para 600 nm hasta 1000 nm. Las fibras con elevada área modal (fibras LMA) son fibras de cristal fotónico (PCF) que proporcionan una GVD de las diferentes componentes espectrales con el parámetro de dispersión $|D| > 500 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$.

La Fig. 8 muestra un diagrama 400 de la dispersión para una fibra con elevada área modal UV que mantiene de polarización. El diagrama 400 es un resultado de medición del Prof. P. Hartmann, Westsächsische Hochschule. La fibra LMA UV tiene un diámetro de 125 μm , un primer diámetro de campo modal $\text{MFD}_x = 2,6 \mu\text{m}$ y un segundo diámetro de campo modal $\text{MFD}_y = 4,3 \mu\text{m}$. Un retraso por longitud, τ/L , se muestra con el signo de referencia 402 y el parámetro de dispersión D se muestra con el signo de referencia 404. Los resultados correspondientes en el parámetro de dispersión de un PCF se proporcionan en la revista Óptica Expreso, vol. 12, No. 2, 2004, pág. 301 en la Fig. 1 (a). Además, una variante avanzada de la cada una de las formas de realización de los dispositivos 100a, 100b y 100c utiliza una denominada "fibra de núcleo concéntrico" con un parámetro de dispersión D del orden de -13.200 $\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$, como se informó en la revista el mundo del foco laser, julio 2.011, p. 9.

La anchura de pulso de entrada T_0 del pulso de entrada 202, 204 o 206 está fuertemente alargada, es decir, se prolonga en el tiempo, hasta la anchura de pulso de salida T_p del pulso de salida 302. La anchura de pulso de entrada T_0 es del orden de 1 fs a 1 ns. La anchura de pulso de salida T_p es del orden de 100 ns a 10 μs . La dispersión del medio 120 relaciona la anchura de pulso de salida T_p con el pulso de entrada con T_0 de acuerdo a:

$$\tau_p = \tau_0 + |D| \cdot L \cdot \Delta\lambda,$$

con el parámetro de dispersión espectral D del medio dispersivo 120 (en $\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$), una longitud L de una trayectoria de propagación de la luz (en km, por ejemplo, la longitud de fibra) y el intervalo espectral de entrada $\Delta\lambda$ (en nm). Las longitudes preferidas L incluyen 1 km, 10 km o cualquier longitud L intermedia, como se detalla en el ejemplo numérico más adelante. Se elige una potencia del generador de luz 110 de tal manera que la potencia (máxima) de los pulsos de salida 302, 304, 306 (por ejemplo, en la salida 124) sea al menos 1 mW, 5mW, 10 mW, 20 mW, 50 mW o una potencia entre 5 y 50 mW. La potencia puede tener en cuenta una atenuación en el medio dispersivo 120.

El espectro de entrada de banda ancha $S_{ENTRADA}$ de los pulsos de entrada 202, 204 y 206 con el intervalo espectral de entrada $\Delta\lambda$ amplio y la anchura de pulso de entrada T_0 corta se alarga de este modo ampliamente en el tiempo hasta la anchura de pulso de salida T_p sin modificar el intervalo espectral de tiempo-promedio $\Delta\lambda$ en la salida 124. En el caso de la dispersión positiva mostrada en cada una de las Fig. 5 y 7, las componentes espectrales rojas están en el comienzo del pulso de salida alargado 302, 304 o 306. Las componentes espectrales azules siguen en una cola temporal del pulso de salida 302, 304 o 306. Las diferentes componentes espectrales de este modo alcanzan el detector 140 en diferentes instantes, que detecta de forma secuencial las componentes espectrales en las fracciones δt_{puerta} que subdividen la anchura de pulso de salida T_p .

De acuerdo con un ejemplo, el ensanchamiento temporal, es decir, la anchura de pulso de salida T_p , se selecciona, dependiendo de una aplicación, modificando el parámetro de dispersión D. El parámetro de dispersión D se modifica cambiando de forma selectiva el medio dispersivo 120 entre varios medios dispersivos diferentes. Con el fin de evitar los componentes móviles en la disposición óptica del dispositivo 100a, 100b o 100c, una variante del ejemplo modifica el parámetro de dispersión D mediante la aplicación de un campo eléctrico o magnético externo que actúa sobre un medio dispersivo 120, en donde el parámetro de dispersión D del medio 120 es sensible al campo externo.

5 Alternativa o adicionalmente, se modifica la longitud L del medio dispersivo 120. De acuerdo con la invención, en el dispositivo 100a, 100b o 100c, el medio de dispersión 120 incluye varias tomas a lo largo de la longitud L. Cada una de las varias tomas permite el acoplamiento de la luz en o fuera del medio dispersivo 120 en una posición de la toma a lo largo de la longitud L. Al menos una de entre la entrada 122 y la salida 124 se puede seleccionar a lo largo de la longitud L del medio dispersivo 120. Un conmutador óptico utiliza automáticamente una de las tomas como la entrada 122 o como la salida 124 en función de la aplicación.

10 En una dilatación temporal suficiente del pulso de salida 302, 304 o 306 (es decir, con una suficientemente grande T_p) y para un detector suficientemente rápido 140 (es decir, para un suficientemente corto δt_{puerta}), sólo el intervalo espectral instantáneo $\delta\lambda$ agudo (es decir, el ancho de línea espectral instantáneo) se detecta dentro de la fracción temporal δt_{puerta} definida por la unidad de puerta 144. El intervalo espectral de salida instantáneo $\delta\lambda$ (es decir, el ancho de línea espectral instantáneo) define de este modo la longitud de coherencia, que es el doble que la profundidad de escaneo axial de acuerdo a:

$$l_c = 2 \cdot \Delta z_{max} = \frac{2 \cdot \ln 2}{n \cdot \pi} \cdot \frac{\lambda_0^2}{\delta\lambda}$$

15 Aquí se supone que la profundidad a la que la señal OCT cae a -6 dB (correspondiente a $20 \cdot \log(A)$, en donde A es la amplitud de la señal) define la profundidad de escaneo axial. En otras palabras, la profundidad de escaneo axial Δz_{max} es la mitad de la longitud de coherencia. Se señala que, incluso para una resolución temporal dada δt_{puerta} del detector 140, la resolución espectral (es decir, el intervalo espectral instantáneo $\delta\lambda$) puede mejorarse aumentando la anchura de pulso de salida T_p , que es causada por el medio dispersivo 120, independientemente del intervalo espectral $\Delta\lambda$ del generador de luz 110 y/o disminuyendo la resolución del tiempo de puerta δt_{puerta} .

20 Como resultado de la independencia, la resolución axial δz_{min} (que es proporcional a $1/\Delta\lambda$) y la profundidad de escaneo axial Δz_{max} (que es proporcional a $1/\delta\lambda$, y por lo tanto proporcional a $T_p/(\Delta\lambda \cdot \delta t_{puerta})$) pueden ser elegidas independientes entre sí. En otras palabras, la técnica OCT, que también se puede denominar como una Fuente OCT de barrido de pulso-alargado (PSSS-OCT), permite elegir casi libremente la resolución axial δz_{min} y la profundidad de escaneo axial Δz_{max} , por ejemplo, en función de la aplicación. La resolución espectral $\delta\lambda$ ya no está limitada por un tamaño de píxel de una matriz de detectores en un espectrómetro (en contraposición con la SD-OCT) y ya no se determina mediante un ancho de banda instantáneo de una fuente de luz ajustable o de barrido (en contraposición con la SS-OCT). Un ancho de banda grande $\Delta\lambda$ (que es proporcionado por la fuente de luz 110) y una pequeña resolución espectral $\delta\lambda$ (que es provocada por el medio dispersivo 120) no son mutuamente excluyentes utilizando la PSSS-OCT.

30 Se resumen los parámetros para una implementación de ejemplo de cada uno de los dispositivos 100a, 100b y 100c. El láser TiS utilizado como el generador de luz tiene una longitud de onda central $\lambda_0 = 800$ nm y un ancho de banda $\Delta\lambda = 200$ nm para una anchura de pulsos de entrada $T_0 = 1$ ps a 1 ns. El medio dispersivo 120 es una fibra de $L = 2$ km de longitud dispuesta como una bobina. La fibra tiene un parámetro de dispersión $D = -13.200$ ps/(nm·km). El detector 140 tiene una resolución temporal para el muestreo de las fracciones $\delta t_{puerta} \leq 100$ ps, cuya sincronización es soportada por todas las componentes 142 a 148 del detector 140. La anchura de pulso de salida T_p es por lo tanto (al menos, desde que la contribución del primer término, T_0 , es poco significativa):

$$\tau_p = |D| \cdot L \cdot \Delta\lambda = 5.3 \mu s$$

Para un intervalo de muestreo $\delta t_{puerta} = 100$ ps, varias fracciones de N se muestrean por pulso:

$$N = \frac{5.3 \mu s}{100 ps} = 5.3 \cdot 10^4$$

40 El intervalo espectral de salida instantáneo $\delta\lambda$, que es la resolución espectral detectada por el detector 140 que detecta la señal de intensidad del fotodiodo 142 en la fracción temporal δt_{puerta} , es por lo tanto:

$$\delta\lambda = \frac{\Delta\lambda}{N} = 0.004 nm$$

45 La implementación de ejemplo del dispositivo 100a, 100b o 100c puede lograr de este modo una resolución axial $\delta z_{min} = 1,0$ μm y una profundidad de escaneo axial $\Delta z_{max} = 26$ mm. Las formas de realización de los dispositivos 100a, 100b y 100c logran de este modo la alta resolución axial (comparable a la SD-OCT) en combinación con una profundidad de escaneo axial que (por suficiente intensidad de señal, es decir, energía espectral) es lo suficientemente larga para explorar la totalidad de la longitud de un ojo.

La profundidad de escaneo Δz_{max} es ajustable libremente, incluso sin modificar la disposición óptica del dispositivo 100a, 100b o 100c, modificando el intervalo de muestreo de las fracciones δt_{puerta} .

Alternativa o adicionalmente, particularmente conveniente para el caso de una anchura de pulso de entrada T_0 muy corta, el ensanchamiento temporal del pulso de entrada que produce el pulso de salida de anchura de pulso de salida T_p , se puede describir mediante la relación:

$$\tau_p = \tau_0 \sqrt{1 + (4 \cdot \ln(2) \cdot \frac{D_2}{\tau_0^2})^2} \approx 4 \cdot \ln(2) \cdot \frac{D_2}{\tau_0},$$

- 5 en donde $D_2 = \beta_2 \cdot L$ es la dispersión de retardo de grupo (por ejemplo, la dispersión de la velocidad de grupo relacionada con la longitud específica L del medio dispersivo). El símbolo β_2 indica la dispersión de la velocidad de grupo:

$$\beta_2 = -\frac{D_\lambda \cdot \lambda_0^2}{2\pi \cdot c} \text{ (en unidades de fs}^2\text{/m),}$$

- 10 en la que D_λ designa el parámetro de dispersión (también denominado como parámetro de dispersión de retardo de grupo) en unidades de ps/(km·nm), un ejemplo del cual se muestra en la Fig. 8.

En un conjunto de ejemplos numéricos, el parámetro de dispersión es $D_\lambda = -13.200$ ps/(km·nm) y la luz se genera con una longitud de onda central $\lambda_0 = 800$ nm, la cual produce $\beta_2 = 4.481.781$ fs²/m, de manera que para una longitud $L = 2$ km el pulso de salida T_p sea aproximadamente 1,65 μs; para una longitud $L = 10$ km el pulso de salida T_p sea aproximadamente 8,25 μs; o para una longitud $L = 20$ km el pulso de salida T_p sea aproximadamente 16,5 μs.

- 15 Al aumentar adicionalmente el intervalo espectral de entrada $\Delta\lambda$ de la luz generada mediante el láser TiS 110, la resolución axial δz_{\min} se mejora adicionalmente, incluso sin un efecto negativo en la profundidad de escaneo Δz_{\max} .

- 20 Como ha llegado a ser evidente a partir de la descripción anterior de las formas de realización de un dispositivo para tomografía de coherencia óptica, la invención permite superar las limitaciones o interdependencias mutuas de al menos una de entre la resolución axial δz_{\min} y una profundidad de escaneo Δz_{\max} . Una anchura de un pulso de salida T_p puede exceder de 1 μs. El detector puede resolver fracciones temporales δt_{puerta} más cortas que 100 ps. Una dispersión puede ser lineal con respecto a un número de onda o la frecuencia de los componentes espectrales en un pulso de entrada, lo que permite el muestreo de las fracciones δt_{puerta} de una señal de intensidad de manera uniforme en el tiempo para la transformación de Fourier directa.

- 25 Será evidente que pueden hacerse varias modificaciones en la forma, construcción y disposición de las formas de realización de ejemplo anteriores sin apartarse del alcance de la invención o sin sacrificar todas sus ventajas. Debido a que la invención se puede modificar de muchas maneras, se reconocerá que la invención debe limitarse sólo por el alcance de las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Un dispositivo (100a; 100b; 100c) para tomografía de coherencia óptica u OCT, comprendiendo el dispositivo:
 - un generador de luz (110) adaptado para generar una serie de pulsos de entrada (202, 204, 206) de luz coherente, teniendo cada pulso de entrada de la serie una anchura de pulso de entrada (T_0);
- 5 - un medio dispersivo (120) que tiene una entrada (122) ópticamente acoplada al generador de luz y una salida (124) para los pulsos de salida (302, 304, 306), en donde el medio dispersivo está adaptado para alargar la anchura de pulso de entrada (T_0) hasta una anchura de pulso de salida (T_p) de cada uno de los pulsos de salida por medio de dispersión cromática, en donde el medio dispersivo (120) incluye varias tomas en diferentes posiciones a lo largo de una trayectoria de propagación de la luz;
- 10 - un acoplador óptico (130) adaptado para acoplar los pulsos de salida de la salida en un brazo de referencia (160) y en un brazo de muestra (170) y para superponer la luz que retorna del brazo de referencia y del brazo de muestra;
 - un conmutador óptico adaptado para acoplar de forma selectiva el generador de luz a una de las tomas como la entrada y/o para acoplar de forma selectiva una de las tomas como la salida al acoplador óptico; y
- 15 - un detector (140) adaptado para detectar una intensidad de interferencia de la luz superpuesta con una resolución temporal de una fracción (δt_{puerta}) de la anchura de pulso de salida (T_p), en donde el detector se calibra por medio de una sincronización óptica basada en un interferómetro de Mach-Zehnder.
2. El dispositivo de la reivindicación 1, en donde cada pulso de entrada en la serie tiene un al menos, en esencia, intervalo espectral de entrada ($\Delta\lambda$) independiente del tiempo y/o una al menos, en esencia, longitud de onda central de entrada (λ_0) independiente del tiempo y/o en donde cada pulso de salida tiene al menos una de entre una longitud de onda máxima de salida instantánea ($\lambda(t)$) dependiente del tiempo y un intervalo espectral de salida instantáneo ($\lambda(t) - \delta\lambda/2 \dots \lambda(t) + \delta\lambda/2$) dependiente del tiempo.
- 20 3. El dispositivo de la reivindicación 2 en donde el intervalo espectral de entrada ($\Delta\lambda$) es varias veces más amplio que el intervalo espectral de salida instantáneo ($\delta\lambda$).
4. El dispositivo de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en donde el medio dispersivo (120) incluye una fibra óptica.
- 25 5. El dispositivo de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en donde una trayectoria (L) de propagación de la luz en el medio dispersivo desde la entrada hasta la salida es más largo de 1 km y/o más corta de 10 o 20 km.
6. El dispositivo de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en donde un parámetro de dispersión (D) del medio dispersivo (120) es mayor de 10.000 ps/(km·nm).
- 30 7. El dispositivo de la reivindicación 6, que comprende además un generador de campo adaptado para generar un campo externo que actúa sobre el medio, en donde el parámetro de dispersión (D) del medio se controla o es controlable por el campo externo.
8. El dispositivo de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en donde el detector (140) está adaptado además para muestrear la intensidad para varias fracciones consecutivas (δt_{puerta}) que se corresponden con a una anchura de pulso de salida (T_p), opcionalmente, en donde las varias fracciones muestreadas son al menos 500, 1.000 o 10.000.
- 35 9. El dispositivo de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en donde la fracción (δt_{puerta}) es más corta de 200 ns, más corta de 100 ns, más corta de 1 ns o más corta de 100 ps.
10. El dispositivo de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, en donde el detector (140) incluye al menos uno de entre un fotodiodo y un detector equilibrado, opcionalmente, en donde el detector (140) incluye además una unidad de puerta (144) conectada al fotodiodo y adaptada para leer la intensidad para cada una de las fracciones.
- 40 11. El dispositivo de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, en donde el generador de luz (110) incluye un láser de titanio-zafiro pulsado o una fuente de luz supercontinua pulsada.
12. El dispositivo de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11, en donde el generador de luz (110) genera la serie de pulsos de entrada con una frecuencia de repetición (f_R) y el detector (140) inicia el muestreo a la frecuencia de repetición.
- 45 13. El dispositivo de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, en donde el generador de luz (110) incluye una fuente de luz de onda continua y un obturador dispuesto operativamente entre la fuente de luz de onda continua y la entrada (122) del medio dispersivo (120).

14. El dispositivo de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 13, en donde el acoplador óptico (130) incluye al menos uno de entre un divisor de haz (132), un acoplador de fibra óptica, un circulador (134) y un acoplador 1-a-2 (136).

15. Un método de para realizar tomografía de coherencia óptica u OCT, comprendiendo el método:

- 5 - generar una serie de pulsos de entrada (202, 204, 206) de luz coherente, teniendo cada pulso de entrada de la serie una anchura de pulso de entrada (T_0);
- alargar la anchura de pulso de entrada (T_0) de cada uno de los pulsos de entrada hasta una anchura de pulso de salida (T_p) de los pulsos de salida (302, 304, 306) por medio de dispersión cromática en un medio dispersivo (120);
- 10 - acoplar los pulsos de salida en un brazo de referencia (160) y en un brazo de muestra (170) y superponer la luz que retorna del brazo de referencia y del brazo de muestra por medio de un acoplador óptico;
- acoplar de forma selectiva el generador de luz a una de las tomas como la entrada y/o acoplar de forma selectiva una de las tomas como la salida al acoplador óptico; y
- 15 - detectar una intensidad de interferencia de la luz superpuesta con una resolución temporal de una fracción (δt_{puerta}) de la anchura de pulso de salida (T_p), en donde el detector se calibra por medio de una sincronización óptica basada en un interferómetro de Mach-Zehnder.

100a

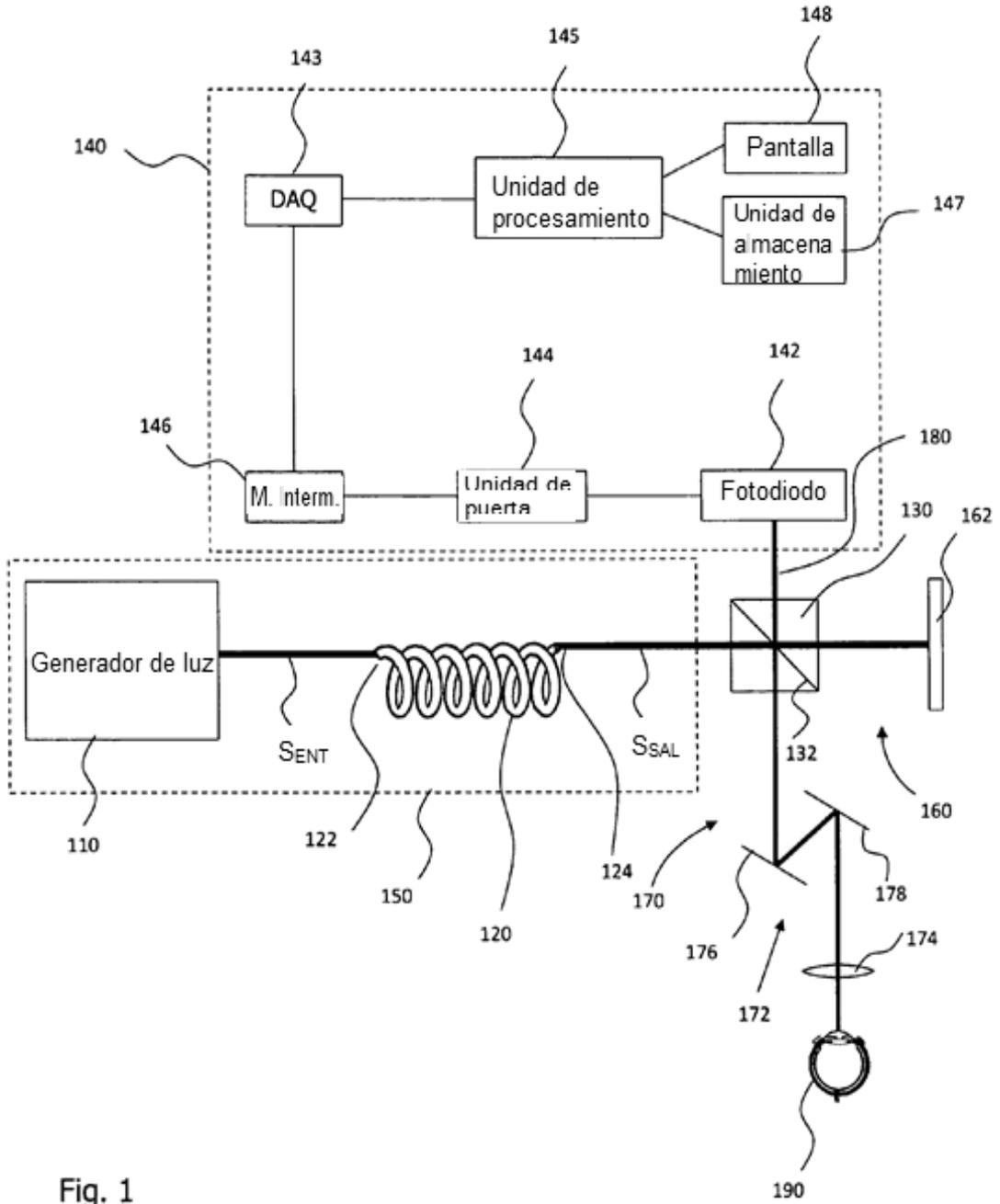


Fig. 1

100b

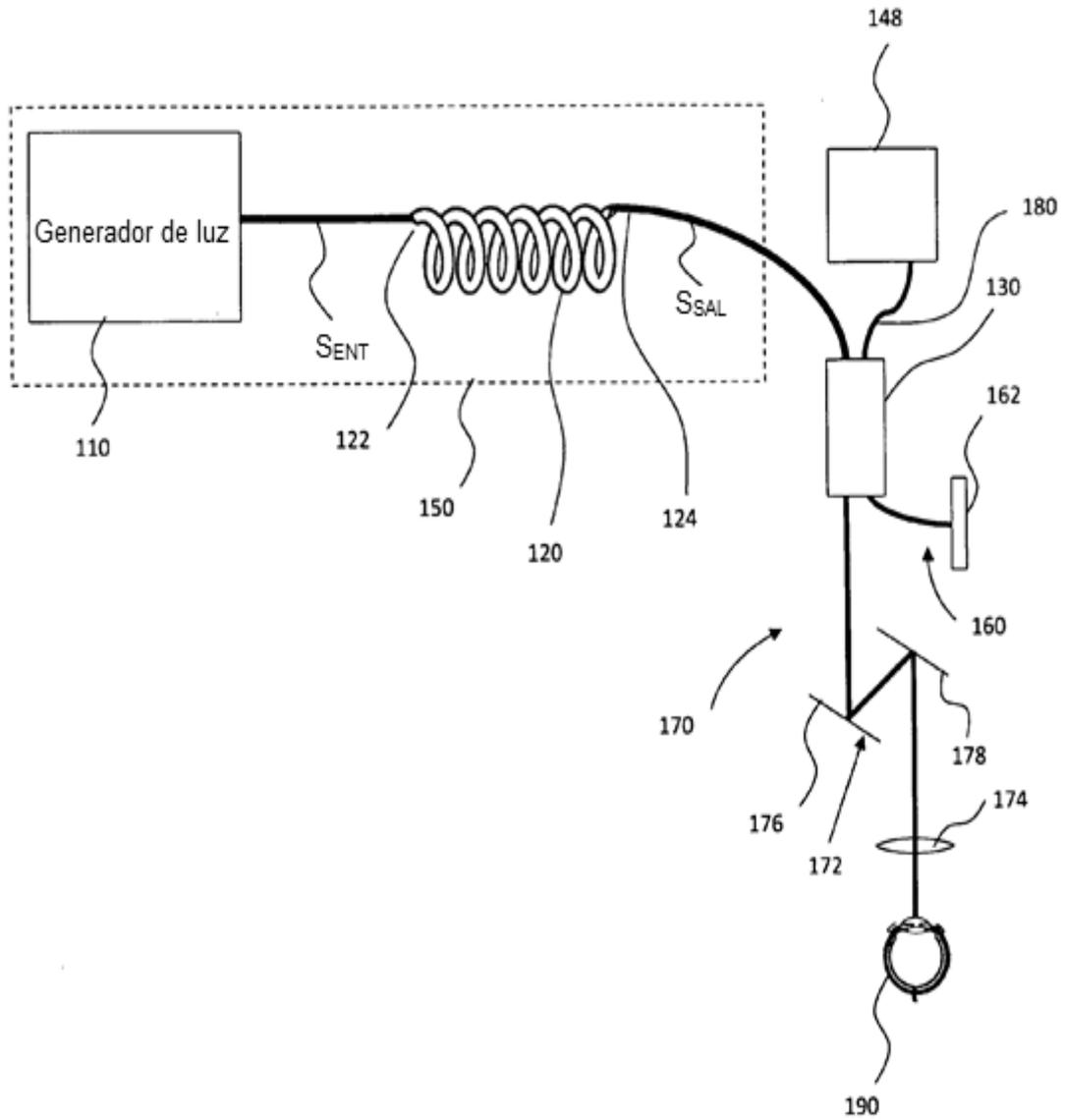


Fig. 2

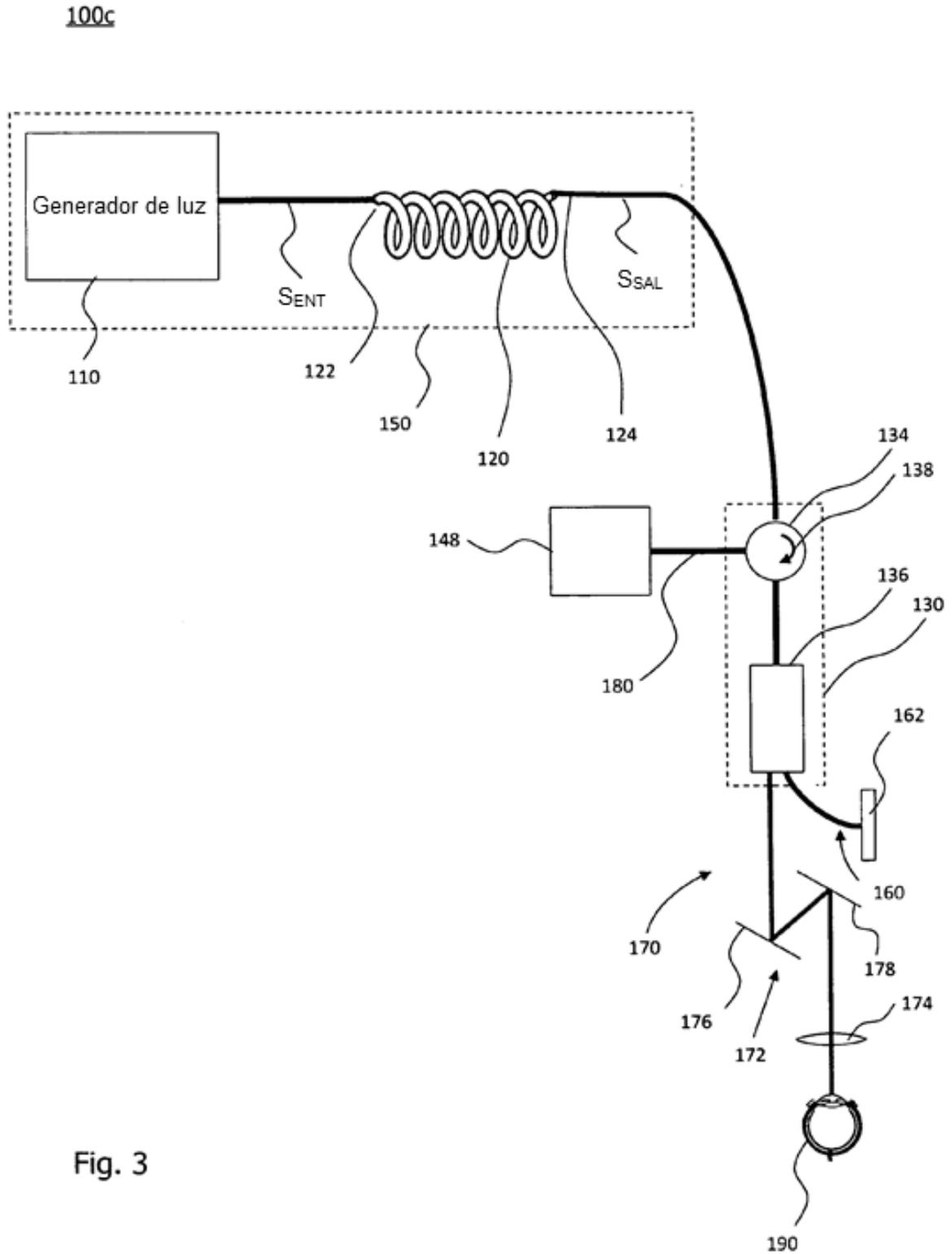


Fig. 3

Distribución de energía espectral-temporal $S_{ENTRADA}$

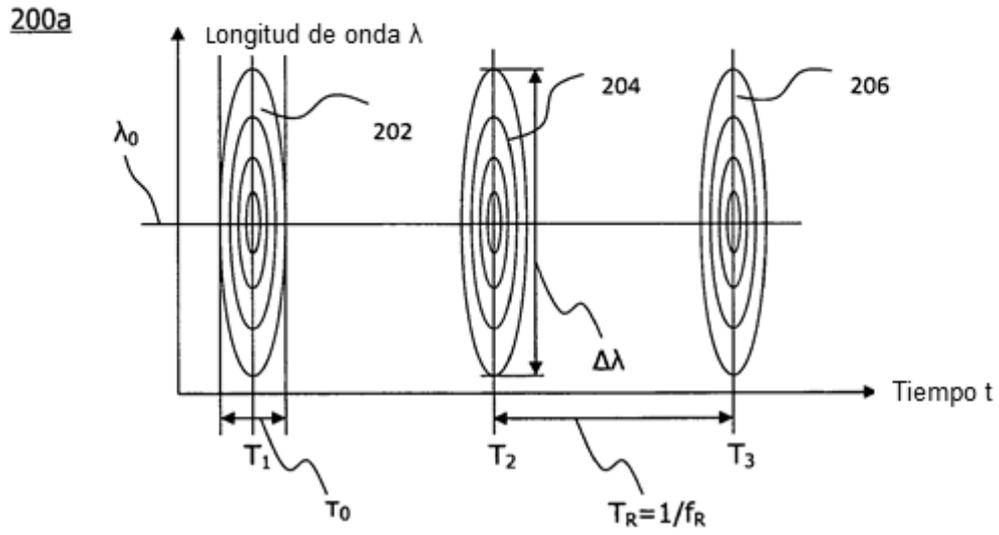


Fig. 4

Distribución de energía espectral-temporal S_{SALIDA}

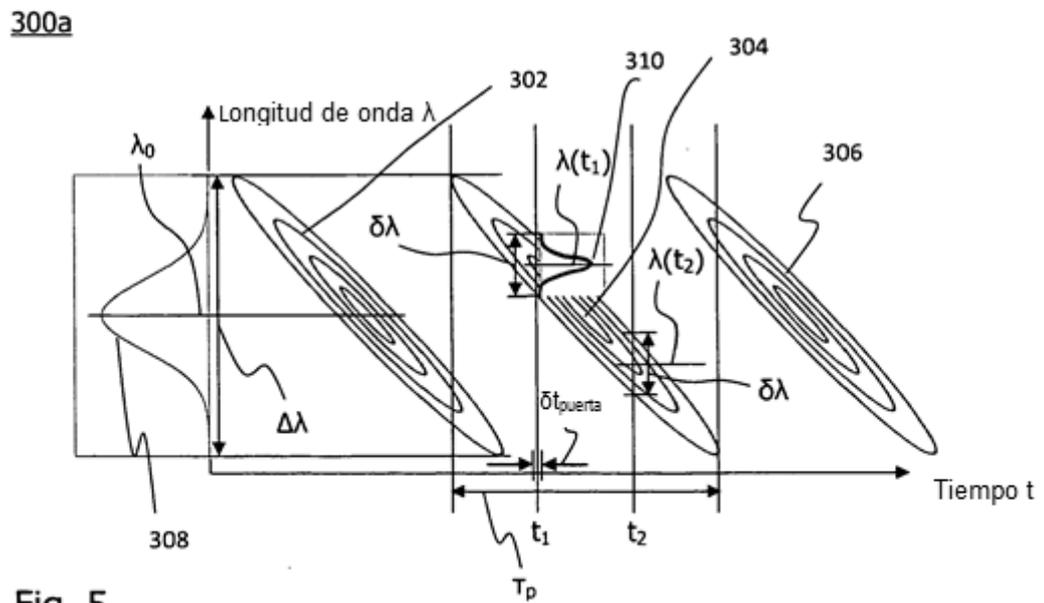


Fig. 5

Distribución de energía espectral-temporal $S_{ENTRADA}$

200b

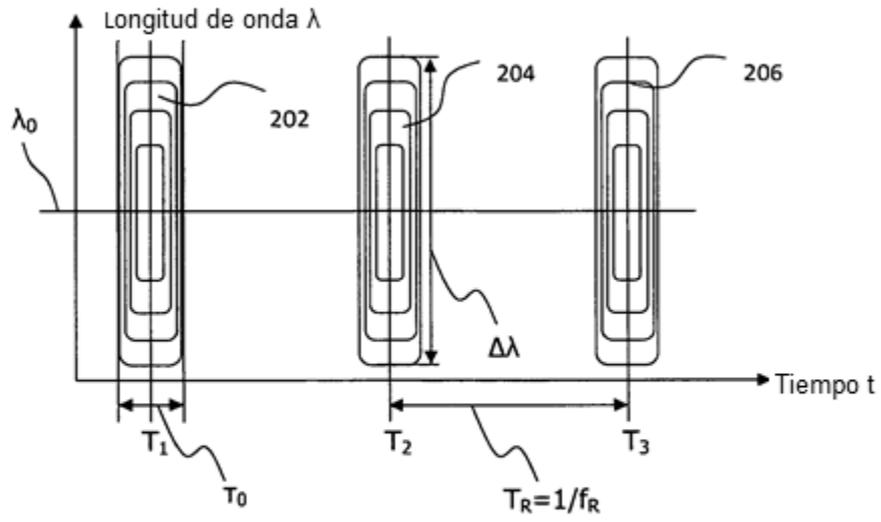


Fig. 6

Distribución de energía espectral-temporal S_{SALIDA}

300b

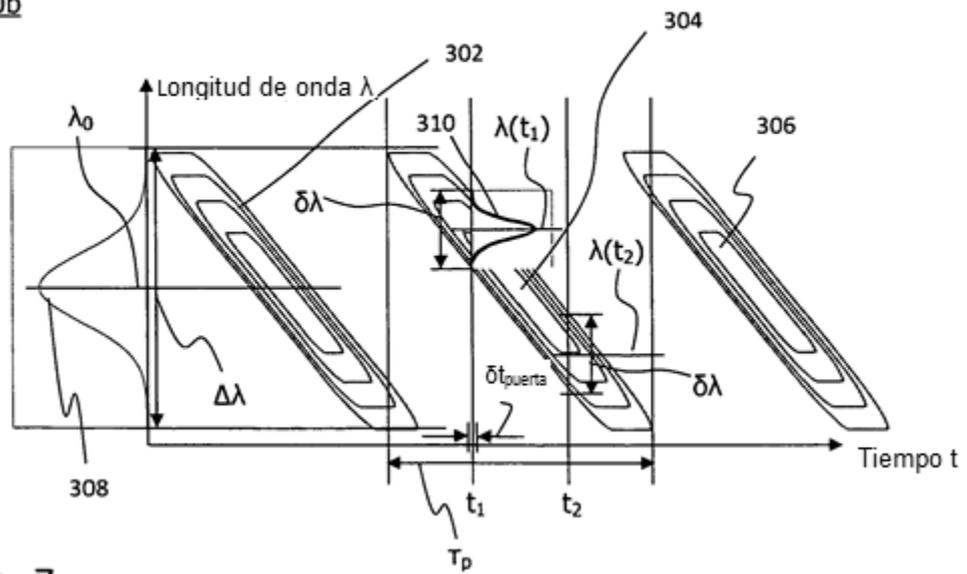


Fig. 7

400

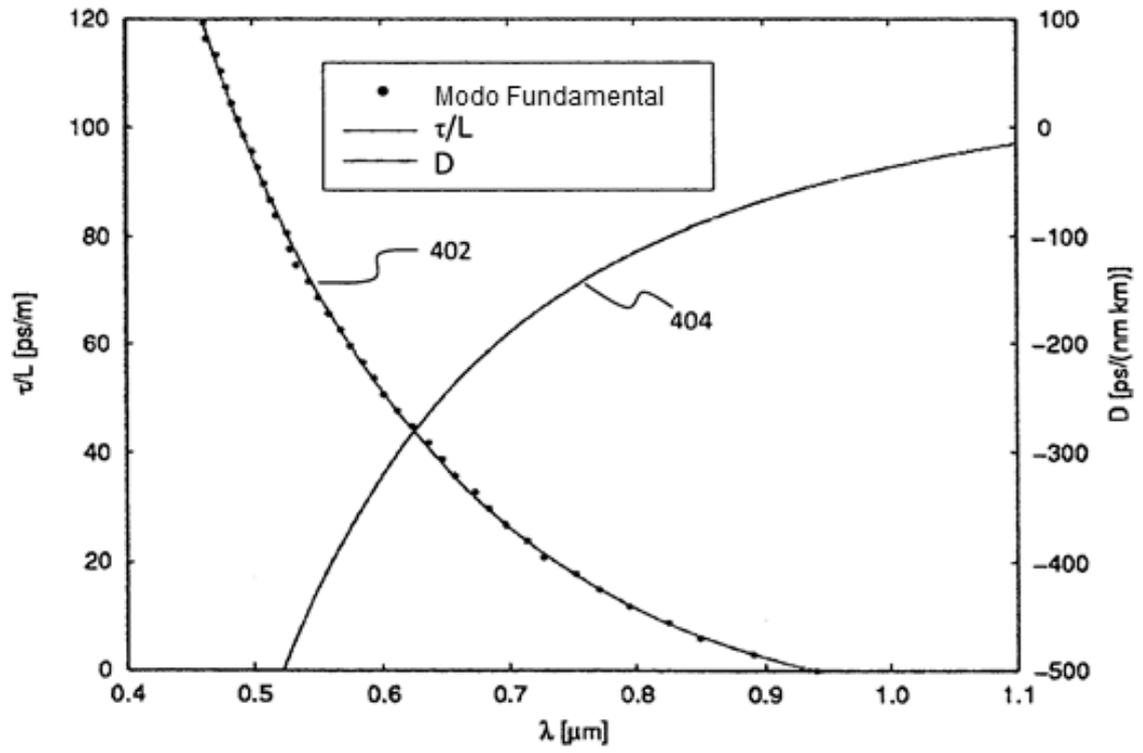


Fig. 8