

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 786 923**

51 Int. Cl.:

**G01B 9/02**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **17.06.2014 PCT/EP2014/062666**

87 Fecha y número de publicación internacional: **23.12.2015 WO15192886**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.06.2014 E 14734035 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **18.03.2020 EP 3158281**

54 Título: **Tomografía de coherencia óptica de intervalo completo codificada por dispersión**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**14.10.2020**

73 Titular/es:  
**ALCON INC. (100.0%)  
Rue Louis-d'Affry 6  
1701 Fribourg, CH**

72 Inventor/es:  
**MASSOW, OLE y  
LOERNER, JOHANNES**

74 Agente/Representante:  
**LEHMANN NOVO, María Isabel**

ES 2 786 923 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**

Tomografía de coherencia óptica de intervalo completo codificada por dispersión

Campo técnico

5 La presente invención se refiere a la tomografía de coherencia óptica, TCO. Se refiere en particular a un aparato para la tomografía de coherencia óptica de Intervalo Completo Codificada por Dispersión, ICCD (en inglés DEFR), y a un método para fabricarlo.

Antecedentes

10 El término "Tomografía de coherencia óptica", TCO, define un grupo de técnicas de medición óptica en las que la longitud de coherencia (limitada) de la luz es utilizada para mediciones de distancia de alta precisión en superficies reflectantes. Especialmente para aplicaciones médicas, tales como el diagnóstico oftalmológico y la monitorización, la TCO ha demostrado ser una herramienta valiosa, ya que permite mediciones precisas y no invasivas de hasta varios milímetros por debajo de la superficie del cuerpo. Además, se puede conseguir una alta precisión longitudinal de una medición, en una escala de pocos micrómetros, incluso a una distancia relativamente larga entre el aparato de TCO y el objeto medido.

15 Una sola medición de TCO proporciona habitualmente información solo acerca de las características medias del área reflectante. Sin embargo, una topografía de una superficie reflectante puede resolverse con gran detalle, si para una sola medición el tamaño del área medida se reduce lo más posible y si una multitud de tales mediciones puntuales se realizan densamente distribuidas sobre la superficie. En las técnicas de TCO establecidas, una medición de superficie extendida es realizada típicamente en la forma de un escaneo x-y, también llamado "escaneo B", en una cuadrícula de puntos de medición equiespaciados. Sin embargo, para las mediciones de un solo punto, se han desarrollado diferentes técnicas de tomografía de coherencia óptica para determinar ópticamente la distancia entre el punto medido y un punto de referencia, típicamente dentro del dispositivo de TCO.

20 Los métodos convencionales de TCO pueden implicar una configuración de interferómetro, en el que un haz de luz generado resulta dividido en un haz de muestra y un haz de referencia. Aunque la propagación del haz de referencia está limitada al interior del aparato, el haz de muestra es emitido desde el dispositivo hacia la muestra medida y, después de la reflexión por la muestra, vuelve a entrar en el interferómetro. Allí, el haz de muestra reflejado y el haz de referencia se superponen y, si una diferencia en la longitud de la trayectoria de los dos haces se encuentra por debajo de una longitud de coherencia de la luz utilizada, la superposición de los haces producirá una interferencia detectable. Después de la detección por medios tales como un fotodiodo o un espectrógrafo, la interferencia puede ser analizada, por ejemplo, con respecto a una diferencia en la intensidad espectral o a una diferencia en la longitud de la trayectoria de los dos haces. Como resultado de ese análisis, se pueden determinar diferentes características de la muestra, tales como una reflectividad y una distancia, de la superficie reflectante. Aparte de las superficies individuales, las técnicas descritas también permiten la caracterización simultánea de una pluralidad de planos apilados y parcialmente reflectantes en la muestra.

35 A pesar de las características comunes ya mencionadas, los aparatos de TCO prácticos pueden diferir entre sí, por ejemplo, en los detalles de su configuración, en el uso de una fuente de luz de ancho de banda amplio o estrecho, en las características de señal detectadas o analizadas, en el algoritmo de análisis empleado, etc. De acuerdo con un esquema de clasificación convencional, las técnicas TCO pueden distinguirse por su configuración, en técnicas "secuenciales", si una medición incluye una pluralidad de procesos de detección con una variación controlada de la longitud de la trayectoria óptica del brazo de referencia ("brazo de escaneo") o de la longitud de onda utilizada ("fuente de barrido"), y en técnicas "simultáneas", si una medición puede ser realizada mediante un solo proceso de detección, en cuyo caso habitualmente se graba un espectrograma de la referencia superpuesta y los haces de muestra. Alternativamente, las técnicas de TCO pueden distinguirse por el método predominante de adquisición y procesamiento de datos, en la que se denomina "TCO de dominio de tiempo", TCO-DT, que es realizada habitualmente en conexión con un interferómetro del tipo de brazo de escaneo, y en "TCO de dominio de frecuencia", TCO-DF, que incluye un procesamiento de información de interferencia resuelta espectralmente.

50 Recientemente, se ha sugerido una variante del dominio de frecuencia, TCO-DF, que resultó conocida como "tomografía de coherencia óptica de intervalo completo codificada por dispersión", TCO-ICCD. En TCO-ICCD, se ha introducido a propósito una diferencia bien definida en la dispersión entre los dos brazos del interferómetro. En relación con algoritmos de procesamiento particulares, se ha mostrado que ese desequilibrio de dispersión permite una recuperación más eficiente y conveniente de la información de profundidad a partir de un espectrograma de transformada de Fourier. Esto ha sido descrito, por ejemplo, por Hofer et al.: "Fast dispersion encoded full range coherence tomography for retinal imaging at 800 nm and 1060 nm" ("Tomografía de coherencia óptica de intervalo completo codificada por dispersión rápida para la formación de imágenes de la retina a 800 nm y 1060 nm") en Optics Express, vol. 18, nº 5, 2010, págs. 4898-4919.

55 Se han descrito otras técnicas de ICCD, por ejemplo, por Koettig et al.: "An advanced algorithm for dispersion encoded

full range frequency domain optical coherence tomography” (“Un algoritmo avanzado para tomografía de coherencia óptica de dominio de frecuencia de intervalo completo codificada por dispersión”), en Optics Express, vol. 20, nº 22, 2012, págs. 24925-24948, por Hofer y col.: “Dispersion encoded full range frequency domain optical coherence tomography” (“Tomografía de coherencia óptica de dominio de frecuencia de intervalo completo codificada por dispersión”), en Optics Express, vol. 17, nº 1, 2009, págs. 7-24, y por Witte et al.: “Single-shot two-dimensional full-range optical coherence tomography achieved by dispersion control” (“Tomografía de coherencia óptica de intervalo completo bidimensional de una sola toma conseguida por control de dispersión”), en Optics Express, vol. 17, nº 14, 2009, págs. 11335-11349.

Se ha descrito un método para la corrección de dispersión para aplicación de TCO en el contexto de la formación de imágenes de la retina por Wojtkowski et al.: “Ultrahigh-resolution, high-speed, Fourier domain optical coherence tomography and methods for dispersion compensation” (“Tomografía de coherencia óptica de dominio de Fourier, de alta velocidad, de ultra alta resolución y métodos para la compensación de dispersión”), en Optics Express, vol. 12, nº 11, 2004, págs. 2404-2422.

## RESUMEN

Aunque las técnicas descritas anteriormente proporcionan así una amplia gama de posibles realizaciones, cada una de ellas requiere un control meticuloso sobre la longitud de la trayectoria óptica en cada uno de los brazos del interferómetro. Esto se debe o bien a la muy corta longitud de coherencia de la luz detectada, que define el intervalo en el que se puede detectar la interferencia de los haces, o bien se debe a la limitación que es establecida por el espectrómetro para resolver franjas de interferencia de orden superior. Para la construcción de un aparato de TCO, por lo tanto, se requiere un ajuste fino de la longitud de la trayectoria óptica de cada longitud de onda detectada en cada uno de los brazos del interferómetro. Esto incluye un ajuste preciso tanto de la longitud geométrica de los brazos del interferómetro como también de una dependencia de la longitud de onda de la longitud de la trayectoria óptica en los brazos como resultado de la dispersión. Un desequilibrio de la dispersión entre los dos brazos es a menudo inducido inevitablemente por diferentes componentes ópticos, tales como medios de guiado o de enfoque del haz, que se utilizan en cualquiera de los brazos. Un equilibrio de esa dispersión inevitable es entonces realizado típicamente insertando componentes dispersivos adicionales con el fin de compensar una diferencia previa en la dispersión.

Aunque la TCO-ICCD permite así una dispersión desigual en los dos brazos, sin embargo, esta desigualdad de dispersión es conseguida incrementando, de manera bien controlada, la dispersión en uno de los brazos de un interferómetro equilibrado.

En consecuencia, cualquiera de las técnicas mencionadas anteriormente para la tomografía de coherencia óptica requiere un control y ajuste exhaustivos de la dispersión en el aparato de TCO. Además, las diferentes técnicas plantean diferentes demandas para el potencial y la calidad de los componentes utilizados, y para la complejidad de la configuración y del procesamiento de datos. Estos aspectos afectan a los costes de fabricación de un aparato de TCO, y también al intervalo y a la conveniencia de posibles aplicaciones de un aparato de TCO.

Por lo tanto, es deseable una técnica para una configuración más simple de un aparato de TCO, que permita mediciones de TCO eficientes y convenientes.

La presente invención tiene como objetivo satisfacer una o más de las necesidades ya mencionadas.

De acuerdo con la invención, se ha proporcionado un método para fabricar un aparato de tomografía de coherencia óptica, comprendiendo el método las operaciones de proporcionar un primer brazo que incluye un primer conjunto óptico dispersivo que induce una primera cantidad de dispersión a la luz que procede de una fuente de luz y que atraviesa el primer brazo, configurando el primer brazo uno de un brazo de muestra y de un brazo de referencia de un interferómetro; proporcionar un segundo brazo que incluye un segundo conjunto óptico dispersivo que induce una segunda cantidad de dispersión a la luz que procede de la fuente de luz y que atraviesa el segundo brazo, configurando el segundo brazo el otro del brazo de muestra y del brazo de referencia, siendo la segunda cantidad de dispersión sustancialmente igual que la primera cantidad de dispersión; proporcionar un componente óptico sustituto; modificar uno del primer y del segundo brazos sustituyendo al menos un componente óptico en uno del primer y del segundo brazos con el componente óptico sustituto para cambiar de este modo la cantidad de dispersión de uno del primer y del segundo brazos; y proporcionar una unidad de procesamiento configurada para procesar una señal de interferometría para realizar tomografía de coherencia óptica de Intervalo Completo Codificada por Dispersión, siendo la señal de interferometría representativa de una superposición de la luz a partir de la modificada y del otro del primer y del segundo brazos.

Basado en el hallazgo ya mencionado de que la información de fase puede ser filtrada de manera eficiente a partir de un espectrograma de transformada de Fourier también sin el conocimiento exacto de un desequilibrio de la dispersión entre los brazos del interferómetro, el método descrito permite una modificación simple y económica de un aparato de TCO convencional, es decir, controlada por dispersión, para utilizar con TCO-ICCD, de intervalo completo codificada por dispersión.

De acuerdo con las realizaciones, la operación de modificación puede incluir sustituir al menos un espejo, un divisor de haz, una lente objetiva, un colimador, una fibra óptica y una rejilla Bragg de fibra con el componente óptico sustituto. El

componente óptico sustituto, a su vez, también puede ser al menos uno de un espejo, un divisor de haz, una lente objetivo, un colimador, una fibra óptica y una rejilla Bragg de fibra, respectivamente, que tienen una dispersión diferente que la de al menos un componente óptico sustituido.

5 En la operación de modificación, sustituir al menos un componente óptico puede no causar un aumento de la diferencia de longitud de la trayectoria óptica media entre el brazo de referencia y el brazo de muestra más grande que una profundidad de escaneo del aparato de TCO.

En realizaciones, el método comprende una operación para adaptar al menos uno del primer y segundo brazos a una longitud de la trayectoria óptica cambiada de acuerdo con la sustitución de al menos un componente óptico.

Breve descripción de los dibujos

10 Detalles, características y ventajas adicionales de la invención pueden resultar más claros a partir de la siguiente descripción de realizaciones ejemplares y de los dibujos adjuntos. En los dibujos:

La fig. 1 muestra una ilustración esquemática de una realización ejemplar de un aparato para tomografía de coherencia óptica que presenta una dispersión equilibrada;

15 La fig. 2 muestra una ilustración esquemática de una realización ejemplar de un aparato para tomografía de coherencia óptica que presenta una dispersión desequilibrada;

Las figs. 3a a 3c muestran espectrogramas de transformada de Fourier con una influencia cambiante de dispersión;

La fig. 4 es un diagrama de flujo de una realización ejemplar de un método para fabricar un aparato de tomografía de coherencia óptica; y

20 La fig. 5 es una ilustración esquemática de una realización ejemplar de un método para fabricar un aparato de tomografía de coherencia óptica.

Descripción detallada

25 En la siguiente descripción, que se ha proporcionado solo con propósitos explicativos y no pretende ser limitativa, se han expuesto detalles específicos, tales como configuraciones específicas de dispositivos y métodos, operaciones y funcionalidades específicos, con el fin de proporcionar una comprensión exhaustiva de la técnica presentada en este documento. Se apreciará que esta técnica puede ser puesta en práctica en otras realizaciones que se apartan de estos detalles específicos.

30 La fig. 1 muestra una configuración ejemplar de un interferómetro 100, como puede ser utilizado para tomografía de coherencia óptica. El interferómetro 100 comprende, como sus componentes básicos, una fuente 110 de luz, un divisor 120 de haz, un espejo 130 de referencia y un detector 150. El interferómetro 100 comprende además un miembro 132 de compensación, por ejemplo, un vidrio de compensación, una guía 134 de haz de referencia, una guía 144 de haz de muestra, un colimador 146 y una lente objetivo 148 para enfocar la luz sobre una muestra 140.

35 Un haz 115 de luz procedente de la fuente 110 de luz es dividido en el divisor 120 de haz en un haz 135 de referencia y un haz 145 de muestra. El haz 135 de referencia es dirigido hacia el espejo 130 de referencia, desde donde es reflejado de nuevo al divisor 120 de haz. El haz 145 de muestra, por el contrario, es emitido desde el interferómetro 100 y, por ejemplo, es dirigido hacia una muestra externa 140. El haz 145 de muestra es reflejado al menos parcialmente en la muestra 140 y vuelve al divisor 120 de haz. Para el haz 135 de referencia reflejado y el haz 145 de muestra, el divisor 120 de haz actúa como un combinador de haces que superpone partes del haz 135 de referencia y del haz 145 de muestra en un haz 155 de señal. El haz 155 de señal es dirigido hacia el detector 150, que detecta una intensidad del haz 155 de señal como resultado de la superposición del haz 135 de referencia y del haz 145 de muestra. En caso de 40 que una diferencia entre la longitud de la trayectoria óptica en el brazo 135 de referencia y el brazo 145 de muestra sea menor que una longitud de coherencia de la luz detectada, los dos haces que constituyen el haz 155 de señal interfieren. En consecuencia, se puede detectar una modulación de la intensidad del haz 155 de señal en función de una distancia variable de la muestra 140 desde el divisor 120 de haz y, así, se puede determinar la distancia variable de la muestra.

45 El interferómetro 100 comprende además un miembro 134 de guiado del haz de referencia y un miembro 144 de guiado del haz de muestra, ilustrados en la fig. 1 como fibras. En realizaciones alternativas, los miembros de guiado pueden ser incluidos en cualquiera de las cuatro ramas del interferómetro 100. Además, los miembros 134, 144 de guiado del haz no necesitan ser realizados como fibras, sino que también pueden incluir espejos, disposiciones de rejilla, etc.

50 El interferómetro 100 incluye además un colimador 146 que está dispuesto entre el miembro 144 de guiado del haz de muestra y la muestra 140. El colimador 146 sirve para mejorar la señal de interferencia detectable contrarrestando una difusión o divergencia de la luz debido bien a una fuente 110 de luz difusa o bien como inducida por otros componentes ópticos en la configuración. El colimador 146 mostrado representa, de manera ejemplar, cualquier tipo de medios de colimación que, en realizaciones alternativas, pueden estar nuevamente dispuestos en diferentes lugares en el

interferómetro 100 o también puede prescindirse de ellos. Además, el interferómetro 100 incluye el miembro 148 de enfoque de haz, que puede ser realizado mediante una lente objetivo y que sirve para enfocar el haz de muestra sobre un área más pequeña en la superficie de la muestra 140.

5 Opcionalmente, un interferómetro 100 del tipo descrito puede comprender además elementos para la desviación lateral del haz de muestra enfocado, con el fin de facilitar el escaneo del haz sobre un área extendida de la muestra 140. Además, en realizaciones alternativas, se han proporcionado elementos para un ajuste longitudinal del haz de referencia, con el fin de adaptar la longitud del haz de referencia a una distancia dada de la muestra 140 desde el divisor 120 de haz.

10 En la fig. 1, diferentes funcionalidades, tales como la división del haz, el guiado del haz o la conformación del haz, son realizados mediante componentes particulares. En realizaciones alternativas, estas funciones pueden ser realizadas por otros componentes, mientras que también pueden ser añadidas funcionalidades adicionales, tales como filtros o fuentes de luz sintonizables. Además, varias de las funcionalidades ilustradas pueden ser realizadas mediante un solo componente, tal como un divisor de haz de fibra, etc. Además, es solo por simplicidad, que el interferómetro 100 de la fig. 1 se ha mostrado como un interferómetro de Michelson. Se podrían utilizar diferentes tipos de interferómetros para la tomografía de coherencia óptica sin apartarse de los principios descritos anteriormente.

15 Independientemente de las variaciones ya mencionadas, la fig. 1 ilustra generalmente que una trayectoria óptica del haz 145 de muestra puede verse afectada por diferentes componentes ópticos que una trayectoria óptica del haz 135 de referencia. Esto se ha mostrado en la fig. 1 mediante el colimador 146, la lente objetivo 148 y la disposición asimétrica del divisor 120 de haz, cada uno de los cuales induce dispersión en el haz 145 de muestra, pero no en el haz 135 de referencia. Como se ha mencionado antes, el ancho de banda finito de la luz detectada y la dependencia sensible de una interferencia resultante en una dispersión presente requieren típicamente disposiciones que han de ser realizadas para compensar o igualar la dispersión en el brazo de referencia y en el brazo de muestra de un aparato de TCO. Para ese propósito, la fig. 1 muestra en el brazo de referencia un miembro 132 de compensación, por ejemplo, un vidrio de compensación, que está destinado a compensar un desequilibrio de la dispersión inducido en el brazo de muestra por un sustrato del divisor 120 de haz, el colimador 146 y la lente objetiva 148. Como se ha ilustrado mediante la disposición del miembro 132 de compensación, se puede conseguir un ajuste más fino de la dispersión inclinando el miembro 132 y variar, de este modo, una longitud de la trayectoria geométrica del haz de referencia a través del miembro 132 de compensación. En realizaciones alternativas, la compensación de un desequilibrio de la dispersión también puede ser ajustada mediante una pluralidad de miembros 132 de compensación, por ejemplo, añadiendo o eliminando miembros 132 de compensación dispersivos individuales hasta que se consigue un equilibrio entre los dos haces 135, 145.

20 La fig. 2 muestra una realización ejemplar de un aparato 200 de TCO de acuerdo con la presente invención. Similar al aparato 100 de la fig. 1, el aparato 200 de TCO de la fig. 2 comprende una fuente 210 de luz, un divisor 220 de haz, un espejo 230 de referencia, un miembro 234 de guiado del haz de referencia, un miembro 244 de guiado del haz de muestra, un colimador 246, una lente objetivo 248 para enfocar la luz sobre una muestra 240, y un detector 250. Además, el aparato 200 de TCO de la fig. 2 comprende una unidad 260 de evaluación que incluye una unidad central de procesamiento, CPU, 262 y una unidad 264 de almacenamiento.

25 A diferencia del aparato 100 de TCO de la fig. 1, el aparato 200 de TCO de la fig. 2 no incluye ningún miembro 132 de compensación para compensar un desequilibrio de la dispersión, y está configurado para obtener información de interferencia resuelta espectralmente, por ejemplo, en forma de espectrograma. Con respecto a otras variaciones del aparato 200 de TCO, se aplica el mismo razonamiento que con relación al aparato 100 de la fig. 1. En particular, la siguiente descripción de aspectos inventivos puede ser aplicada correspondientemente a otros principios interferométricos que un interferómetro de Michelson.

30 Como se indicado en la fig. 2, se puede obtener información de interferencia resuelta espectralmente utilizando una fuente 210 de luz con un ancho de banda relativamente amplio y un elemento para resolución espectral incluido en el detector 250 o en cualquier otro lugar de la configuración. Alternativamente, la fuente 210 de luz puede estar configurada como una fuente de luz de ancho de banda estrecho con una longitud de onda central sintonizable, mientras que se obtiene un espectrograma durante un cierto intervalo de tiempo durante el cual la fuente 210 de luz está siendo sintonizada a través del espectro relevante.

35 Al recuperar la información de interferencia resuelta espectralmente por el detector 250, dicha información es transmitida desde el detector 250 a la unidad 260 de evaluación. La unidad 260 de evaluación está configurada para realizar una tomografía de coherencia óptica de intervalo completo codificada por dispersión, TCO-ICCD, en los datos transmitidos. La unidad 260 de evaluación comprende la unidad central 262 de procesamiento, que está programada para aplicar un algoritmo de TCO-ICCD en la información de interferencia resuelta espectralmente. Para ese propósito, la unidad central 262 de procesamiento es programada por un software adecuado que es almacenado por la unidad 264 de almacenamiento.

40 Basado típicamente en parámetros de dispersión bien sintonizados de la configuración, la TCO-ICCD permite, a partir de un solo espectrograma con información de fase ambivalente, obtener conocimiento distintivo acerca de la profundidad de las reflexiones de muestras individuales. Esto se aplica también a componentes de señal que proceden de reflexiones a

diferentes distancias más cortas y más largas que la longitud de referencia del brazo de muestra. Con este fin, la TCO-ICCD explota la circunstancia de que el conocimiento acerca de una dispersión finita en una configuración de interferómetro le permite a uno resolver en gran medida la ambivalencia de fase de un espectrograma grabado. Los parámetros de dispersión de una configuración actual pueden ser medidos, o determinados de otro modo, de antemano y luego ser introducidos en el procesamiento de datos, típicamente en una operación de compensación de dispersión numérica, CDN.

En las realizaciones convencionales de TCO-ICCD, un desequilibrio de la dispersión resultante en la configuración es ajustado cuidadosamente. En contraste con esto, la presente invención utiliza el descubrimiento de que los parámetros de dispersión pueden variar en un intervalo inesperadamente amplio para permitir aun que un algoritmo de TCO-ICCD proporcione resultados suficientemente precisos. Si bien esto permite una construcción mucho más simple de un aparato de TCO-ICCD, se ha encontrado una gran tolerancia a la dispersión especialmente para una combinación preferida de algoritmos de CDN e ICCD particulares, como se describirá en la secuela.

En presencia de dispersión, la cantidad de interferencia entre los haces de muestra y de referencia de un interferómetro, como se ha representado en un espectrograma grabado, puede describirse como:

$$I(\omega) = E_S^* E_R e^{i(\frac{\omega z}{c} + \varphi_d(\omega))} + E_S E_R^* e^{-i(\frac{\omega z}{c} + \varphi_d(\omega))}$$

en donde  $E_S$  y  $E_R$  describen los campos eléctricos de interferencia del haz de muestra y del haz de referencia, respectivamente,  $z$  es la diferencia en la longitud de la trayectoria entre los dos haces y  $\varphi_d(\omega)$  es un cambio de fase que es causado por la diferencia en la dispersión entre el brazo de muestra y el brazo de referencia.

Como se ha mostrado en la fig. 3a, en ausencia de un desequilibrio de la dispersión, es decir, con  $\varphi_d(\omega) = 0$ , un espectrograma así definido puede proporcionar información de profundidad correspondiente, +/-  $z_0$ , aunque ambivalente, por ejemplo, si el espectrograma, después del eventual procesamiento previo, es sometido a una transformación de Fourier. En ese caso, se generarán dos bandas de señal idénticas en el intervalo  $z$  positivo y en el negativo, equidistantes de la longitud de referencia central, en donde una de las bandas representa la señal "verdadera" y la otra su artefacto conjugado.

En presencia de la dispersión, como se ha mostrado en la fig. 3b, una profundidad, o: señal  $z$ -, que es obtenida de esa manera aparecerá difuminada debido al término de dispersión en la ecuación anterior, mientras que el resultado permanece indistinto con respecto a una profundidad positiva o negativa. Además, en el caso típico de que las reflexiones, es decir, las bandas de señal "verdaderas", ocurran a ambos lados de la longitud de referencia, las bandas verdaderas y conjugadas en el espectrograma transformado a menudo se superponen. Procesar un espectrograma de la manera descrita puede entonces no permitir una distinción entre componentes de señales verdaderas y artefactos.

En vista de estos inconvenientes, se ha mostrado que las técnicas de compensación de la dispersión numérica, CDN, eran adecuadas tanto para, compensar el difuminado con el fin de proporcionar información de profundidad más precisa como al mismo tiempo para proporcionar criterios para distinguir una señal verdadera de su artefacto. De acuerdo con una técnica preferida, si se conoce  $\varphi_d(\omega)$ , es decir, el efecto de un desequilibrio de la dispersión en la ecuación anterior, la ecuación puede ser multiplicada por un término de corrección correspondiente,  $e^{-i\varphi_d(\omega)}$ . De esta manera, se produce un componente de señal verdadera compensada por dispersión, mientras que, al mismo tiempo, debido a esta medida, el componente de artefacto experimentará un doble cambio de fase relacionado con la dispersión:

$$\hat{I}(\omega) = \underbrace{E_S^* E_R e^{i(\frac{\omega z}{c})}}_{\text{Señal verdadera}} + \underbrace{E_S E_R^* e^{-i(\frac{\omega z}{c} + 2\varphi_d(\omega))}}_{\text{Artefacto}}$$

Si un espectrograma modificado de esta manera es sometido al procesamiento descrito anteriormente, la banda de señal verdadera ya no aparecerá difuminada, mientras que su artefacto será difuminado incluso más fuertemente debido al mayor término de dispersión. Como se ha ilustrado en la fig. 3c, la señal verdadera resulta así distinguible de su artefacto. Un procesamiento adicional adecuado, por ejemplo, por medio de técnicas de TCO-ICCD, puede permitir así separar, o filtrar, las bandas conjugadas entre sí.

Como requisito previo del procesamiento anterior, se han descrito diferentes métodos para determinar  $\varphi_d(\omega)$  para una configuración dada y para su utilización en conexión con CDN, por ejemplo, por Wojtkowski et al.: "Ultra-light-resolution, high speed, Fourier domain optical coherence tomography and methods for dispersion compensation" (Tomografía de coherencia óptica del dominio de Fourier, de alta velocidad, de ultra alta resolución y métodos para compensación de dispersión"), en Optics Express, vol. 12, nº 11, 2004, págs.. 2404-2422, y por Marks et al.: "Autofocus algorithm for dispersion correction in optical coherence tomography" ("Algoritmo de enfoque automático para corrección de la dispersión en tomografía de coherencia óptica"), en Applied Optics, vol. 42, nº 16, 2003, págs. 3038-3046. Para la presente invención, el método iterativo de Wojtkowski et al., como se ha descrito en la sección 2 de la citada publicación, demostró ser el más ventajoso. Además, se podría demostrar que para la mayoría de las aplicaciones prácticas es suficiente determinar  $\varphi_d(\omega)$  solamente una vez, al comienzo de cada aplicación de TCO, después de que el aparato y la

muestra se hayan alineado.

Se ha descubierto además que la TCO-ICCD puede proporcionar aun resultados precisos incluso en presencia de un desequilibrio de la dispersión comparativamente grande y/o no homogéneo en la configuración. Esto se aplica en particular si se ha utilizado un filtrado iterativo de componentes de señal verdaderos de sus artefactos. Se ha descrito un método preferido de este tipo, por ejemplo, por Hifer et al.: "Fast dispersion encoded full range optical coherence tomography for retinal imaging at 800 nm and 1060 nm" ("Tomografía de coherencia óptica de intervalo completo codificada por dispersión rápida para la formación de imágenes de retina a 800 nm y 1060 nm"), en Optics Express, vol. 18, nº 5, 2010, págs. 4898-4919. Se han descrito otras técnicas de ICCD, por ejemplo, por Koettig et al.: "An advance algorithm for dispersion encoded full range frequency domain optical coherence tomography" ("Un algoritmo avanzado para la tomografía de coherencia óptica de dominio de frecuencia de intervalo completo codificada por dispersión", en Optics Express, vol. 20, nº 22, 2012, págs. 24925-24948.

Para la presente invención, la combinación descrita de algoritmos particulares de CDN e ICCD demostró ser la más ventajosa. Sin embargo, se apreciará que las variaciones de las técnicas ya mencionadas o de su combinación preferida también pueden ser adecuadas para proporcionar resultados aceptables.

Se ha encontrado además que la técnica de TCO-ICCD descrita funciona bien con un desequilibrio de la dispersión, ya que típicamente puede resultar de un conjunto de los componentes ópticos de una configuración de interferómetro sin correspondencia de dispersión específica. Por lo tanto, no es necesario prever elementos, o tomar otras precauciones, para igualar la dispersión en los dos brazos en cualquier etapa de la fabricación/montaje del aparato 200 de TCO. Por lo tanto, cada uno del brazo de referencia y del brazo de muestra contiene un conjunto óptico que induce una cantidad individual de dispersión en la luz que atraviesa. Como en ninguna etapa del proceso de fabricación del aparato 200 de TCO es necesario un equilibrio de la dispersión, ninguna combinación, o subconjunto, de componentes ópticos dispersivos en cada uno de los dos brazos inducirá la misma cantidad de dispersión en ese brazo que cualquier subconjunto de componentes ópticos dispersivos en el otro brazo, respectivamente.

Al mismo tiempo, el algoritmo de TCO-ICCD sugerido requiere, para obtener resultados satisfactorios, una cierta diferencia mínima en la dispersión entre los dos brazos. Se ha descubierto a partir de experimentos que una cantidad favorable de desequilibrio en la dispersión corresponde a una dispersión que es inducida por 1 cm o más de material transparente, tal como vidrio, fibra óptica o plástico transparente. De este modo, se obtiene de manera natural una cantidad favorable de dispersión mediante el uso convencional de componentes ópticos en el haz de muestra, tales como la lente objetivo o un colimador. Como la diferencia de dispersión deseada es, por lo tanto, un subproducto natural de la fabricación del aparato 200 de TCO, la presente técnica facilita aún más la construcción de un aparato 200 de TCO.

Alternativamente, la diferencia deseada en la dispersión se puede conseguir variando otros componentes ópticos, por ejemplo, la longitud de las fibras ópticas que son utilizadas en el brazo de referencia y/o en el brazo de muestra.

La presente invención no solo facilita la producción de un nuevo aparato de TCO; también permite una reconfiguración conveniente de un aparato de TCO convencional, es decir, de uno equilibrado, para ser utilizado para TCO-ICCD.

La fig. 4 muestra un diagrama de flujo de una realización ejemplar de un método 400 para fabricar un aparato de tomografía de coherencia óptica de acuerdo con la presente invención.

El método 400 comprende, como una primera operación 410, proporcionar un primer brazo que incluye un primer conjunto óptico dispersivo que induce una primera cantidad de dispersión en la luz que procede de la fuente de luz y que atraviesa el primer brazo, configurando el primer brazo uno de un brazo de muestra y un brazo de referencia de un interferómetro. De manera similar, como una segunda operación 420, el método 400 comprende la operación de proporcionar un segundo brazo que incluye un segundo conjunto óptico dispersivo que induce una segunda cantidad de dispersión en la luz que procede de la fuente de luz y que atraviesa el segundo brazo, configurando el segundo brazo el otro del brazo de muestra y del brazo de referencia, siendo la segunda cantidad de dispersión sustancialmente igual a la primera cantidad de dispersión. El método 400 incluye además proporcionar un componente óptico sustituto, operación 430, y modificar uno del primer y segundo brazos sustituyendo al menos un componente óptico en uno del primer y segundo brazos con el componente óptico sustituto para cambiar de este modo la cantidad de dispersión de uno del primer y segundo brazos. Finalmente, el método 400 incluye proporcionar una unidad de procesamiento configurada para procesar una señal de interferometría para realizar una tomografía de coherencia óptica de intervalo completo codificada por dispersión, siendo la señal de interferometría representativa de una superposición de la luz del brazo modificado y el otro del primer y segundo brazos, operación 450.

El método 400 como se ha mostrado en la fig. 4 describe así, por ejemplo, cómo un aparato de TCO convencional en el que el brazo de referencia y el brazo de muestra tienen esencialmente la misma dispersión puede hacerse adecuado para la tomografía de coherencia óptica de intervalo completo codificada por dispersión. De acuerdo con el método 400, la reconfiguración es conseguida sustituyendo un componente óptico con un equivalente que tiene una dispersión diferente y, de este modo, revertir intencionadamente un equilibrio previo de la dispersión. Además, se ha proporcionado una unidad de procesamiento que es adecuada para someter un espectrograma adquirido a TCO de intervalo completo codificada por dispersión, bien añadiendo una unidad de procesamiento correspondiente al aparato o bien

reconfigurando una unidad de procesamiento existente para evaluar una señal adquirida de una manera correspondiente.

La fig. 5 muestra una realización ejemplar del método 400 aplicado al aparato 100 de la fig. 1.

5 Como se ha descrito anteriormente en relación con la fig. 1, en el aparato 100 de TCO, el brazo de referencia y el brazo de muestra han sido equilibrados con respecto a su dispersión por el miembro 132 de compensación. En particular, el aparato 100 de TCO de la fig. 1 proporciona un primer brazo que incluye un primer conjunto óptico dispersivo y un segundo brazo que incluye un segundo conjunto óptico dispersivo en el que la cantidad de dispersión que es inducida en el primer brazo es sustancialmente igual a la cantidad de dispersión que es inducida en el otro brazo. La fig. 5 muestra además cómo, de acuerdo con la presente invención, se ha proporcionado el componente óptico sustituto 530, 520 y se ha modificado uno de los dos brazos sustituyendo al menos un componente óptico 130, 120 en el brazo con el componente óptico sustituto 530, 520.

10 En el ejemplo mostrado en la fig. 5, un componente óptico que es sustituido puede ser el espejo 130 de referencia o el divisor 120 de haz. Por consiguiente, el espejo 130 de referencia es sustituido con un espejo dispersivo 530 multicapa y el divisor 120 de haz plano es sustituido con un divisor 520 de haz cúbico, de modo que, como se ha mostrado en la fig. 5, especialmente la dispersión en el brazo de referencia es cambiada por las sustituciones mostradas. Alternativamente, cualquier otro componente en cualquiera de los dos brazos puede ser sustituido con un componente adecuado que cumpliría una función similar al componente original al tiempo que induce una cantidad diferente de dispersión en el brazo correspondiente.

15 Además, el aparato 500 de TCO de la fig. 5 incluye también un detector 550 y una unidad 560 de evaluación, comprendiendo esta última una unidad central 562 de procesamiento y una unidad 564 de almacenamiento y estando configurada para procesar información de interferencia espectral de acuerdo con un algoritmo de TCO de intervalo completo codificada por dispersión.

20 Ventajosamente, el componente óptico que ha de ser sustituido incluye un espejo, un divisor de haz, una lente objetivo, un colimador, una fibra óptica o una rejilla Bragg de fibra. Sin embargo, si corresponde, la presente técnica también podría ser realizada sustituyendo cualquier otro componente óptico de un aparato de TCO si esa sustitución es adecuada para cambiar una diferencia en dispersión entre los brazos del interferómetro.

25 Preferiblemente, la sustitución de un componente óptico en un aparato de TCO dado de acuerdo con la presente técnica no requiere reajuste de ese aparato debido a una longitud de la trayectoria óptica cambiada en cualquiera de los brazos. En particular, sería preferible que un cambio en la longitud de la trayectoria óptica no fuera mayor que la profundidad de escaneo del aparato de TCO. Sin embargo, si es necesario, se puede realizar una adaptación correspondiente de cualquiera de los dos brazos a una longitud de trayectoria óptica modificada de acuerdo con una sustitución del componente óptico. En ese caso, el método 400 de la fig. 4 comprendería además la operación de adaptar la longitud de la trayectoria óptica en al menos uno de los dos brazos.

30 La presente invención ha sido descrita en relación con una técnica de evaluación particular, que se conoce como TCO de Intervalo Completo Codificada por Dispersión. Sin embargo, será evidente que la invención puede ser utilizada con ventajas iguales o similares en relación con cualquier técnica comparable que esté disponible hoy o en el futuro.

**REIVINDICACIONES**

1. Un método para fabricar un aparato (200; 500) para tomografía de coherencia óptica, comprendiendo el método las operaciones de:
- 5 proporcionar un primer brazo que incluye un primer conjunto óptico dispersivo (120, 130, 134) que induce una primera cantidad de dispersión a la luz que procede de la fuente (110) de luz y que atraviesa el primer brazo, configurando el primer brazo uno de un brazo de muestra y un brazo de referencia de un interferómetro;
- 10 proporcionar un segundo brazo que incluye un segundo conjunto óptico dispersivo (120, 144, 146, 148) que induce una segunda cantidad de dispersión a la luz que procede de la fuente (110) de luz y que atraviesa el segundo brazo, configurando el segundo brazo el otro del brazo de muestra y del brazo de referencia, siendo la segunda cantidad de dispersión sustancialmente igual que la primera cantidad de dispersión;
- proporcionar un componente óptico (520, 530) sustituto;
- modificar uno del primer y segundo brazos sustituyendo al menos un componente óptico (120, 130, 146, 148) en uno del primer y segundo brazos con el componente óptico (520, 530) sustituto para cambiar de este modo la cantidad de dispersión de uno del primer y segundo brazos; y
- 15 proporcionar una unidad (262; 562) de procesamiento configurada para procesar una señal de interferometría para realizar una tomografía de coherencia óptica de Intervalo Completo Codificada por Dispersión, siendo la señal de interferometría representativa de una superposición de la luz procedente del modificado y del otro del primer y segundo brazos.
- 20 2. El método de la reivindicación 1, en el que la operación de modificación incluye sustituir al menos uno de un espejo (130), un divisor (120) de haz, una lente objetivo (148), un colimador (146), una fibra óptica y una rejilla Bragg de fibra con el componente óptico sustituto.
3. El método de la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en el que, en la operación de modificación, sustituir al menos un componente (120, 130, 146, 148) no provoca un incremento de una diferencia de longitud de trayectoria óptica media entre el brazo de referencia y el brazo de muestra mayor que una profundidad de escaneo del aparato de TCO.
- 25 4. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3 que comprende una operación de:
- adaptar al menos uno del primer y segundo brazos a una longitud de trayectoria óptica cambiada de acuerdo con la sustitución de al menos un componente óptico (120, 130, 146, 148).

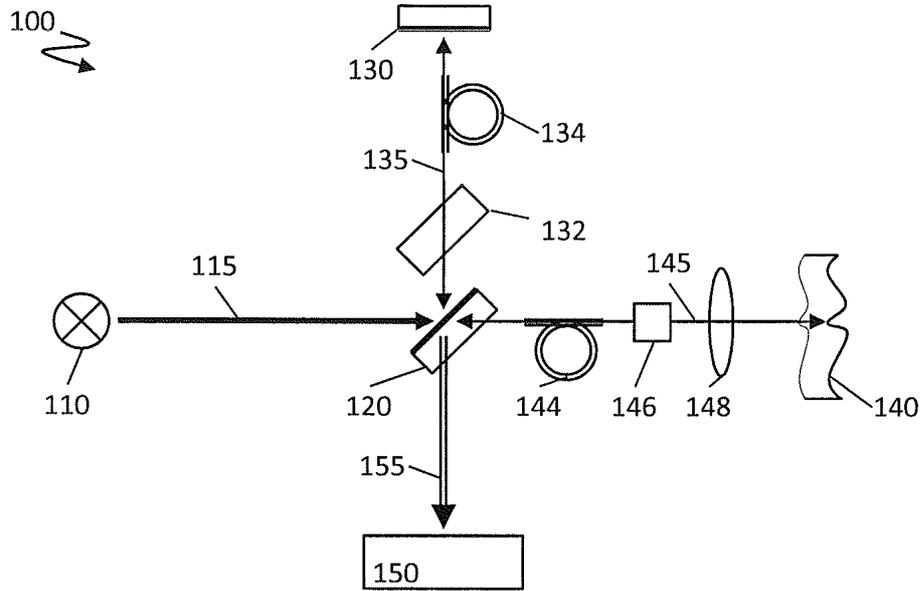


Fig. 1

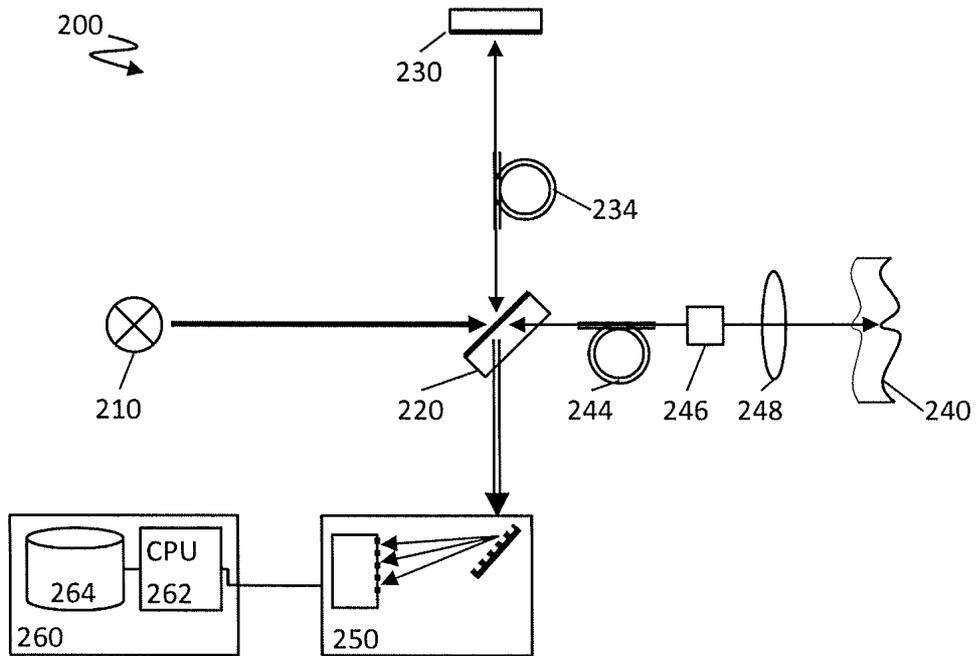


Fig. 2

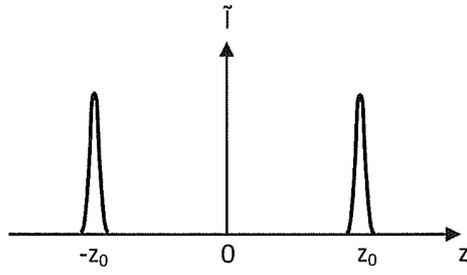


Fig. 3a

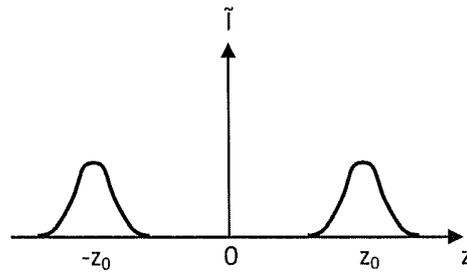


Fig. 3b

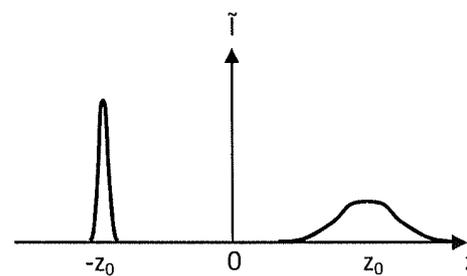


Fig. 3c

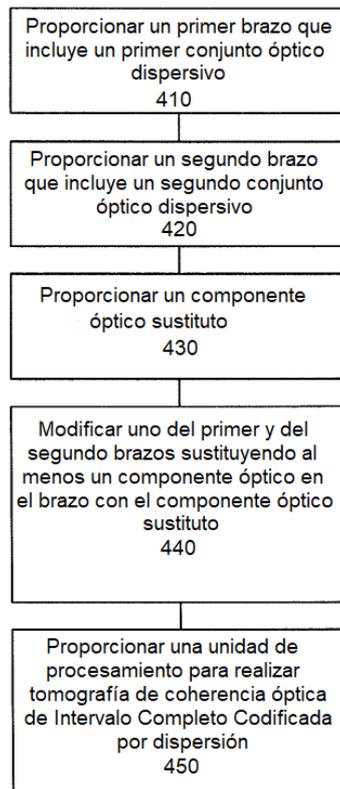


Fig. 4

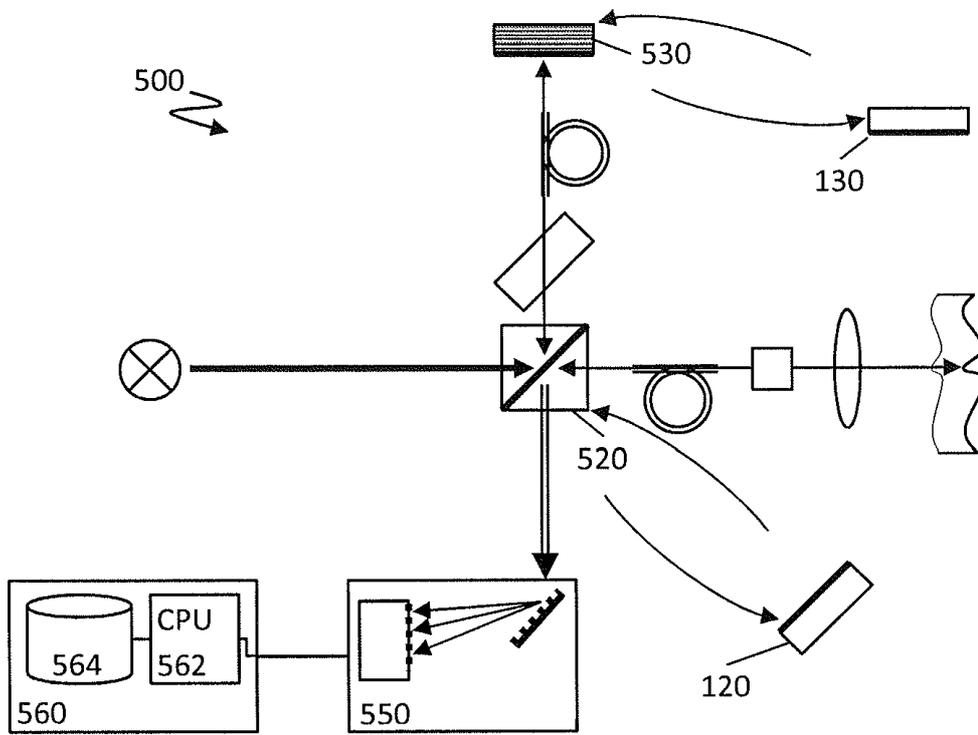


Fig. 5