

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 404 673**

21 Número de solicitud: 201101161

51 Int. Cl.:

**G01N 21/45** (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN PREVIO

B2

22 Fecha de presentación:

20.10.2011

43 Fecha de publicación de la solicitud:

28.05.2013

Fecha de la concesión:

15.04.2014

45 Fecha de publicación de la concesión:

24.04.2014

56 Se remite a la solicitud internacional:

PCT/ES2012/000268

Fecha de publicación de la mención al informe de  
búsqueda internacional:

25.06.2013

73 Titular/es:

UNIVERSIDAD DE SEVILLA (100.0%)  
OTRI-PABELLÓN DE BRASIL, PASEO DE LAS  
DELICIAS SN  
41012 SEVILLA (Sevilla) ES

72 Inventor/es:

CARBALLAR RINCON, Alejandro y  
JANER JIMENEZ, Carlos

54 Título: **MÉTODO Y APARATO DE MEDIDA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE DISPOSITIVOS ÓPTICOS Y FOTÓNICOS**

57 Resumen:

Método y aparato de medida (100, 400, 500) para la caracterización de dispositivos ópticos y fotónicos, basado en interferometría espectral y algoritmos de reconstrucción de fase mínima, que comprende una fuente de luz (101, 401, 501), un montaje interferométrico (100, 400, 500) y un sistema de detección óptica (106, 406, 506), y donde partiendo de la densidad espectral de potencia de una función interferométrica de fase mínima, compuesta por una señal óptica de referencia y una señal óptica que contiene la característica del dispositivo objeto de estudio DUT (103, 503), acaba obteniendo la función de transferencia del DUT (103, 503),  $H(\omega)$  y su correspondiente respuesta impulsiva  $h(t)$ .

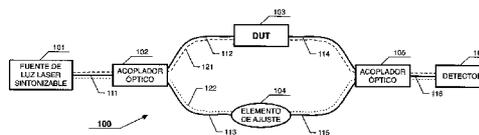


FIG. 1

ES 2 404 673 B2

## **DESCRIPCIÓN**

### **MÉTODO Y APARATO DE MEDIDA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE DISPOSITIVOS ÓPTICOS Y FOTÓNICOS**

5 La presente invención describe un método y un aparato de medida para la  
caracterización completa de dispositivos ópticos que se encuadran en el sector de  
las tecnologías de la información y las comunicaciones, y en particular en las áreas  
de tecnología electrónica y teoría de la señal. El aparato y método de medida  
propuesto para la caracterización completa de sistemas y dispositivos ópticos y/o  
10 fotónicos está orientado a la instrumentación de test y medida específica de todos  
los componentes pasivos que integran los actuales sistemas de comunicaciones  
ópticas por fibra y las "redes de comunicaciones de siguiente generación".

En particular, el aparato y método de medida se aplica en la caracterización  
15 espectral (esto es, determinar la función de transferencia) y temporal (es decir, hallar  
la respuesta impulsiva) de todo tipo de dispositivos ópticos lineales, como las propias  
fibras ópticas, los filtros ópticos de diferentes tecnologías, acopladores ópticos,  
multiplexores y demultiplexores ópticos, y conmutadores ópticos, entre otros.

20

#### **ESTADO DE LA TÉCNICA ANTERIOR**

Los sistemas de comunicaciones ópticas están sufriendo una continua evolución en  
dos direcciones:

25

*i.* El aumento progresivo de la velocidad de transmisión de la información, que  
implica tiempos de bits más pequeños; y

*ii.* La incorporación de nuevos componentes y dispositivos ópticos que  
30 proporcionan funcionalidades adicionales como el filtrado y la selección  
de componentes espectrales, la distribución y concentración de la señal  
óptica, la multiplexación y demultiplexación de canales, la conmutación y  
encaminamiento de la señal óptica, así como cualquier otra operación de  
procesado óptico de señal en general de aplicación en este ámbito.

35

El comportamiento de estos componentes y dispositivos ópticos y/o fotónicos es crítico para las prestaciones del sistema de comunicaciones completo, sobre todo si se considera la tendencia a incluir en cada fibra óptica una mayor densidad de canales multiplexados en longitud de onda y trabajando a un mayor régimen binario.

5

En este sentido, se hace primordial e imprescindible la caracterización completa de todos los componentes y dispositivos que integran las redes de comunicaciones ópticas y fotónicas. De forma general, un sistema, dispositivo y/o componente óptico pasivo, trabajando en régimen lineal, está totalmente caracterizado en el dominio espectral por su función de transferencia compleja (que comprende la respuesta de amplitud y respuesta de fase) y en el dominio temporal por su respuesta impulsiva. La función de transferencia y respuesta impulsiva de cualquier dispositivo lineal están relacionadas biunívocamente por la Transformada de Fourier.

10

15

En la actualidad, una de las técnicas más utilizadas en la caracterización de estos dispositivos ópticos es el OFDR (*Optical Frequency – Domain Reflectometry* o bien, *Coherent Frequency – Domain Reflectometry*), es decir, la técnica de reflectometría óptica coherente en el dominio de la frecuencia.

20

Esta técnica o método de medida, propuesto por Glombitza *et al.* [U. Glombitza y E. Brinkmeyer "Coherent Frequency-Domain Reflectometry for Characterization of Single-Mode integrated optical waveguides", IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 11 N°8, pp. 1377 – 1284, August 1993] combina la interferometría espectral y el análisis de Fourier para conseguir las mejores prestaciones de resolución y rango dinámico existentes.

25

Su principio de funcionamiento está basado en inyectar la salida de una fuente de luz láser sintonizable (TLS – *Tunable Laser Source*) en un sistema interferométrico para conseguir la mezcla o interferencia entre dos señales ópticas: una, denominada señal óptica de referencia; y dos, la señal óptica afectada o modulada por la característica del dispositivo a medir (DUT – *Device under Test*). Realizando un barrido de la frecuencia de emisión del TLS en un intervalo espectral, la señal de interferencia en potencia se mide a la salida del montaje interferométrico mediante un fotodetector. Aplicando el análisis de Fourier es posible obtener una señal en el dominio temporal que contiene la respuesta impulsiva del DUT, y a partir de ella,

30

35

obtener la función de transferencia del DUT compuesta de sus respuestas de amplitud y fase.

5 La gran ventaja de esta técnica es que consigue la caracterización completa del DUT únicamente a partir de medidas de potencia, ya que las medidas de fase óptica son complejas, lentas y costosas. La técnica OFDR propuesta por Glombitza fue mejorada por Froggat [US 6,376,830 y US 7,042,573] para desarrollar el producto conocido como analizador vectorial óptico (OVA – *Optical Vector Analyzer*) y que se ha convertido en un producto exitoso de la compañía Luna Technologies  
10 (<http://www.lunatechnologies.com>). De la misma forma, las grandes empresas del sector de la instrumentación, test y medida han patentado sus propios desarrollos basados en la misma técnica OFDR, como la empresa Agilent Technologies (<http://www.agilent.com>) a través de las patentes de Stolte [US 6,788,396] y Ziegler [US 7,268,342].

15 Otro método que se ha explorado para la caracterización completa de dispositivos ópticos, y más particularmente aplicado a redes de difracción de Bragg en fibra, pero que se puede generalizar a cualquier sistema, dispositivo y/o componente óptico, ha consistido en calcular la respuesta de fase de la función de transferencia del DUT a partir de la medida de su respuesta en amplitud. Se mantiene así la premisa de  
20 basar la caracterización completa del DUT únicamente a partir de medidas de potencia, por la dificultad intrínseca de las medidas de fases ópticas ya comentada. Este método basa su principio de funcionamiento en que el DUT es un dispositivo real, causal y estable y que, por tanto, su función de transferencia verifica la Transformada de Hilbert y/o relaciones de Kramers – Krönig, en su forma integral.

En [Carballar et al. "Phase reconstruction from Reflectivity in Fiber Bragg Gratings" *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol.15, N°8, pp. 1314 – 1322, August 1997] se demostró la viabilidad del método para el caso particular en el que la función de  
30 transferencia del DUT cumpliera ser una función de fase mínima (MPF – *Minimum Phase Function*). Posteriormente, Poladian [Poladian, "Group-Delay reconstruction for fiber Bragg gratings in reflection and transmission", *Optics Letters*, Vol.22 N°20, pp. 1571 – 1573, October 1997] extendió la idea y la generalizó de forma teórica, pero manteniendo la limitación intrínseca ya considerada a funciones MPF.

35

Otros autores han utilizado esta idea junto con la interferometría espectral para conseguir la caracterización completa de dispositivos ópticos. Un primer intento [Skaar, "Measuring the group delay of fiber Bragg gratings by use of end-reflection interference", *Optics Letters*, Vol. 24 N°15, pp. 1020 – 1022, August 1999] utiliza la interferencia Fabry – Perot entre el dispositivo a caracterizar DUT y la reflexión final del extremo de la fibra óptica pero no logra resultados satisfactorios, reconduciendo esta solución hacia la técnica de medida ya conocida como OFDR.

En una segunda aproximación [Ozcan et al., "Characterization of Fiber Bragg Gratings Using Spectral Interferometry Based on Minimum-Phase Functions", *Journal of Lightwave Technology* Vol. 24 N°4, pp. 1739-1757, 2006], se han desarrollado montajes interferométricos que, operando en el dominio del tiempo, construyen secuencias de pulsos temporales que, por definición se aproximan o son cercanas a MPF y que, por tanto, son susceptibles de ser tratadas mediante algoritmos de reconstrucción de fase basados en la transformada de Hilbert. La verificación de MPF por parte de la secuencia temporal interferométrica es aproximada y, en consecuencia, la obtención de la característica completa del DUT requiere algoritmos iterativos para converger hacia la solución correcta, haciendo mucho más lento y tedioso el proceso de medida [US 7,385,683 y US 7,746,480].

## EXPLICACIÓN DE LA INVENCION

En aras de solucionar los problemas mencionados en el actual estado de la técnica, el objetivo de la presente invención es desarrollar un aparato y método de medida para la caracterización completa de sistemas, dispositivos y/o componentes ópticos y fotónicos pasivos. Esta caracterización completa será, bien su función de transferencia compleja, compuesta por sus respuestas de amplitud y fase, o bien su respuesta impulsiva, ya que ambas están relacionadas de forma biunívoca por la transformada de Fourier. Es un objetivo de la presente invención que el aparato y método de medida proporcionen la característica completa del DUT únicamente a partir de medidas de potencia. Igualmente son también características necesarias la sencillez y rapidez en la medida, así como la mejora en las prestaciones relativas a resolución y rango dinámico.

El aparato de medida propuesto consiste, esencialmente, en un montaje de interferometría espectral estimulado a su entrada por una fuente de luz, que permite obtener una señal en potencia en función de la frecuencia óptica, que depende de la señal de entrada y de la característica del dispositivo a caracterizar o DUT. Se  
5 demuestra que la señal óptica a la salida del interferómetro es una función de fase mínima, independientemente de que la función de transferencia del DUT lo sea o no.

Por otro lado, el método de medida, que está implementado en el aparato, toma como señal de entrada la señal en potencia óptica a la salida del montaje  
10 interferométrico y calcula su respuesta de fase mediante la transformada de Hilbert y/o relaciones de Kramers – Krönig, o cualquier otro algoritmo de reconstrucción de fase. El método de medida construye la señal óptica o función de transferencia compleja a la salida del montaje interferométrico, que es la señal óptica medida en potencia junto con su respuesta de fase óptica calculada. Conocida la relación  
15 compleja entre la función de transferencia compleja del DUT con la señal óptica a la salida del montaje interferométrico, el método de medida reconstruye la característica completa espectral del DUT, es decir, la función de transferencia completa del DUT. Aplicando la transformada de Fourier inversa a la función de transferencia del DUT se obtiene la característica del DUT en el dominio del tiempo,  
20 o respuesta impulsiva.

Gracias a ello, la presente invención consigue obtener la característica completa del DUT a partir, únicamente, de la medida en potencia de una señal óptica a la salida del montaje interferométrico, consiguiendo además mejorar las prestaciones de  
25 resolución y rangos de medida de los productos comerciales existentes.

A lo largo de la descripción y las reivindicaciones la palabra "comprende" y sus variantes no pretenden excluir otras características técnicas, aditivos, componentes o pasos. Para los expertos en la materia, otros objetos, ventajas y características de  
30 la invención se desprenderán en parte de la descripción y en parte de la práctica de la invención. Los siguientes ejemplos y dibujos se proporcionan a modo de ilustración, y no se pretende que sean limitativos de la presente invención. Además, la presente invención cubre todas las posibles combinaciones de realizaciones particulares y preferidas aquí indicadas.

35

**BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS**

Fig. 1. Esquema de bloques del aparato de medida objeto de la presente invención para la caracterización completa de un dispositivo óptico.

5

Fig. 2. Representación en el plano complejo de la función de transferencia de un dispositivo óptico genérico y de la función interferométrica normalizada del montaje del aparato de medida de la presente invención. Gráficamente se demuestra que la función interferométrica normalizada es una función de fase mínima independientemente de que la función de transferencia del DUT lo sea o no.

10

Fig. 3. Diagrama de flujo del método de medida objeto de la presente invención para la caracterización completa de un dispositivo óptico, en el que se indican los datos conocidos del aparato de medida, los datos de entrada, los procesos realizados, y los datos de salida.

15

Fig. 4. Esquema de bloques alternativo del aparato de medida objeto de la presente invención para la caracterización completa de un dispositivo óptico.

20

Fig. 5. Ejemplo de realización del aparato de medida objeto de la presente invención para la caracterización completa de un dispositivo óptico.

Fig. 6. Ejemplo de ejecución del método de medida objeto de la presente invención para la caracterización completa de un dispositivo óptico, representado mediante un diagrama de flujo. En él se indican los datos conocidos del aparato de medida, los datos de entrada, los procesos realizados, los datos de salida, así como la representación gráfica de las señales obtenidas en cada uno de los Bloques o etapas.

25  
30**EXPOSICIÓN DETALLADA DE MODOS DE REALIZACIÓN**

En primer lugar, se detalla qué se entiende en la presente memoria sobre determinados conceptos empleados en la descripción detallada de la invención. Así pues, por fuente de luz láser sintonizable TLS se entiende una fuente de luz

35

coherente que genera potencia óptica conocida a una frecuencia óptica seleccionada y que puede ser sintonizada en el rango espectral de medida.

5 Por fuente de luz blanca WLS se entiende una fuente de luz no coherente que genera energía óptica en el rango espectral de medida. Posibles implementaciones incluyen fuentes de luz LED (Diodos electroluminiscentes) superluminescentes o el espectro emisión espontánea amplificada (ASE – Amplified Spontaneous Emission) de salida de un amplificador óptico de fibra dopada con Erblio (EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier), entre otros.

10

Por acoplador óptico direccional se entiende un dispositivo que realiza las funciones de distribución y concentración de señal óptica, caracterizados por una constante de acoplo  $K$ .

15

Por elemento de ajuste se entiende un dispositivo que permite introducir un retardo de fase variable en la señal óptica incidente. Una posible implementación de este elemento es mediante una línea de retardo óptico variable.

20

Por detector se entiende un dispositivo óptico que mide la potencia de la señal óptica que le llega a su entrada. El detector está sincronizado con el elemento de sintonía del TLS para obtener la medida de la densidad espectral de potencia de la función interferométrica que implementa el aparato de medida. Una posible implementación de este elemento es mediante un fotodetector o un analizador de espectros óptico (OSA – Optical Spectrum Analyzer).

25

Por dispositivo a medir o DUT se entiende cualquier sistema, dispositivo o componente óptico (y/o fotónico) pasivo operando en régimen lineal. La caracterización del DUT se obtiene entre un puerto de entrada y un puerto de salida, por lo que se permite tanto la caracterización de dispositivos que trabajan en reflexión (incorporándolos con un circulador óptico), como dispositivos que trabajan en transmisión, como dispositivos con  $N$  puertos (seleccionando para la caracterización un puerto de entrada y otro de salida).

30

Por característica completa del DUT se entiende la caracterización del dispositivo considerado como un sistema lineal invariante, formada por la función de

transferencia compleja (respuestas de amplitud y fase) en el dominio de la frecuencia y/o la respuesta impulsiva en el dominio del tiempo. A partir de la respuesta de fase de la función de transferencia se obtienen las características de retardo de grupo y de dispersión del DUT.

5

Por reconstrucción de la respuesta de fase a partir de la respuesta en amplitud de la función interferométrica se entiende cualquier transformada, algoritmo y/o método que permite obtener la respuesta de fase a partir de la respuesta en amplitud de una función de fase mínima. Posibles implementaciones para la reconstrucción de la respuesta de fase son la transformada de Hilbert, las relaciones de Kramers-Krönig (transformada de Hilbert en su forma integral), o el algoritmo de Wiener-Lee, entre otros.

10

Por función interferométrica se entiende cualquier función de transferencia (en el dominio de la frecuencia) de un montaje interferométrico que verifica ser MPF, y que está relacionada binuómicamente con la función de transferencia del DUT.

15

Por sistema electrónico digital específico para procesado de señal se entiende cualquier circuito electrónico que realice la funcionalidad del método de medida descrito y que puede estar formado, por ejemplo, por convertidores analógico/digitales, microprocesadores y procesadores de señal digital DSP.

20

Una vez definidos los significados de los conceptos que se emplearán en esta descripción, en la figura 1 se muestra el diagrama de bloques del aparato de medida 100, objeto de la presente invención, para la caracterización óptica de un dispositivo óptico a medir o DUT 103. El DUT 103 trabajando en régimen lineal está completamente caracterizado en el dominio espectral por su función de transferencia compleja  $H(\omega)$ , compuesta de respuesta de amplitud y fase, mientras que en el dominio temporal está caracterizado por su respuesta impulsiva  $h(t)$ .

25

30

El aparato de medida 100 está compuesto por una fuente de luz láser sintonizable o TLS 101, que proporciona a su salida una señal óptica de pulsación óptica  $\omega$ , que se lleva a un primer acoplador óptico direccional 102 a través de una guía-onda óptica 111. La salida del TLS 101 está caracterizada por su amplitud compleja de campo óptico de emisión  $A(\omega)$ , mientras que el acoplador óptico direccional 102 está

35

caracterizado por su constante de acoplo  $K$ , distribuyendo la señal óptica de su entrada entre sus dos salidas: una primera salida proporcional a  $K$  y una segunda salida proporcional a  $1 - K$ , tal y como es conocido en el actual estado de la técnica.

5 La señal óptica de una de las salidas del acoplador óptico 102 se lleva al dispositivo DUT 103 a través de una guía-onda óptica 112, dicha señal se propaga a través del DUT 103, tanto si opera en reflexión como si opera en transmisión, y se dirige hacia una de las entradas de un segundo acoplador óptico direccional 105 a través de una segunda guía-onda óptica 114. El primer y segundo acoplador óptico (102,105) son  
10 de características similares, estando ambos caracterizados por la constante de acoplo  $K$ .

Por otro lado, la señal óptica en la segunda salida del primer acoplador óptico 102 se lleva a un elemento de ajuste 104 a través de la guía-onda óptica 113. La señal  
15 óptica se propaga a través del elemento de ajuste 104 y se encamina hacia la segunda entrada del segundo acoplador óptico 105 a través de una guía-onda óptica 115. El elemento de ajuste 104 consiste en una línea de retardo variable, totalmente conocida en el estado de la técnica.

20 El segundo acoplador óptico 105 combina las dos señales ópticas de sus puertos de entrada en su puerto de salida, llevando esta señal de salida hacia un detector óptico 106 a través de una guía-onda óptica 116.

De esta forma, el aparato de medida 100 implementa un sistema interferométrico  
25 para que en el detector óptico 106 exista una mezcla de dos señales ópticas:

(a) una primera señal óptica que viaja una distancia o camino  $L_{DUT}$  por el brazo del interferómetro que comprende el dispositivo DUT 103, es decir, que desde la salida del TLS 101 hasta la entrada al detector óptico 106, atraviesa  
30 por este orden los componentes indicados con referencias 111,102, 112, 103, 114, 105 y 116, y que en la figura 1 ha sido representado mediante una línea de trazos con referencia 121; y

(b) una segunda señal óptica que viaja un camino o distancia  $L_{REF}$  por el brazo  
35 del interferómetro que contiene el elemento de ajuste 104, es decir, que

desde la salida del TLS 101 hasta la entrada del detector óptico 106 atraviesa por este orden los componentes indicados con referencias 111, 102, 113, 104, 115, 105, 116 y que en la figura 1 ha sido representado mediante una línea de puntos con referencia 122.

5

Gracias a la configuración descrita, se entiende que el elemento de ajuste 104 es el encargado de balancear o desbalancear la diferencia entre las longitudes de camino de los dos brazos del interferómetro. En estas condiciones, la amplitud compleja de la señal óptica a la entrada del detector 106 está dada por la expresión:

10

$$F_{\text{int}}(\omega) = (1 - K)A(\omega)e^{-j\beta L_{\text{REF}}} \left[ -1 + \frac{K}{1 - K} \cdot H(\omega)e^{-j\beta(L_{\text{DUT}} - L_{\text{REF}})} \right]$$

$$\beta = \frac{\omega}{c} n$$

15 Donde  $\beta$  es la constante de propagación de la señal óptica en el medio de transmisión como la guía-onda óptica y los componentes ópticos,  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $n$  es el índice de refracción efectivo que ve la señal óptica a lo largo de la longitud de camino recorrida.

20 La señal óptica a la entrada del detector óptico 106 se puede normalizar en función de la constante de acoplo de los acopladores ópticos (102,105),  $K$ , y de la amplitud compleja del campo óptico de emisión de la fuente de luz TLS 101,  $A(\omega)$ , obteniendo una expresión simplificada:

25

$$F_{\text{int, norm}}(\omega) = \frac{F_{\text{int}}(\omega)}{(1 - K)A(\omega)e^{-j\beta L_{\text{REF}}}} = \left[ -1 + \frac{K}{1 - K} \cdot H(\omega)e^{-j\beta(L_{\text{DUT}} - L_{\text{REF}})} \right]$$

30

La longitud máxima efectiva del dispositivo a caracterizar DUT 103,  $L_{D_{\text{max}}}$ , y su índice de refracción efectivo aproximado  $n_D$  se consideran conocidos. En funcionamiento, el TLS 101 inyecta en la guía-onda óptica 111 una señal óptica de pulsación  $\omega$  que se hace variar desde la pulsación inferior a la pulsación superior en el intervalo espectral en el cual se va a caracterizar al DUT 103. El barrido en la pulsación óptica a lo largo del intervalo espectral de medida estará determinado por las prestaciones

de resolución espectral del TLS 101, definido por  $\Delta f$ , junto con su rango y precisión en sintonía.

En estas condiciones, el detector 106 mide en potencia una combinación de mezcla de las señales ópticas que recorren los caminos 121 y 122. La medida en potencia que realiza el detector óptico 106 de la señal óptica que llega a su entrada vendrá dada por:

$$|F_{\text{int}}(\omega)|^2 = (1-K)^2 |A(\omega)|^2 \left[ -1 + \frac{K}{1-K} \cdot H(\omega) \cdot e^{-j\beta(L_{\text{DUT}} - L_{\text{REF}})} \right]^2$$

10

O bien de forma normalizada:

$$|F_{\text{int, norm}}(\omega)|^2 = \left[ -1 + \frac{K}{1-K} \cdot H(\omega) \cdot e^{-j\beta(L_{\text{DUT}} - L_{\text{REF}})} \right]^2$$

En estas condiciones, las restricciones y limitaciones del aparato de medida 100 están descritas por las siguientes expresiones:

$$L_{\text{Dmax}} + |L_{\text{DUT}} - L_{\text{REF}}| < \frac{c}{2 \cdot n_D \cdot \Delta f}$$

$$0 < K < \frac{1}{2}$$

20

Las expresiones anteriores reflejan una de las principales ventajas de la invención, ya que la longitud del camino  $L_{\text{REF}}$  indicada en la figura por la línea punteada 122 se puede variar mediante el elemento de ajuste 104 con el objetivo de hacer tender a cero el término  $|L_{\text{DUT}} - L_{\text{REF}}|$  con el propósito bien de relajar las especificaciones de resolución espectral del TLS 101, o bien para conseguir un mayor rango de longitud máxima de medida  $L_{\text{Dmax}}$  del DUT 103. Estas expresiones indican, como se demuestra a continuación, que para un correcto funcionamiento del método de medida, la constante de acoplo de los acopladores ópticos (102,105) puede variar entre los valores 0 y 1/2 siendo los valores extremos no permitidos.

30

En la figura 2 se muestra gráficamente que la función o señal óptica compleja

$F_{int, norm}(\omega)$  es una función de fase mínima (MPF) tal y como se define en el estado del arte de la teoría de señales y sistemas. En la figura 2 se representa en el plano complejo la función de transferencia del dispositivo a caracterizar DUT 103,  $H(\omega)$ , considerada ésta como un fador que rota alrededor del origen a una velocidad que es función de la variación de la pulsación óptica en función del tiempo en el barrido que realiza el TLS 101 a lo largo del intervalo espectral de medida:

$$H(\omega) = \text{Re}[H(\omega)] + j \cdot \text{Im}[H(\omega)] = |H(\omega)| \cdot e^{j \cdot \arg[H(\omega)]}$$

10 Como la función de transferencia del DUT 103 corresponde a un dispositivo pasivo, el módulo de ésta podrá variar entre cero y uno, mientras que el argumento de ésta, también denominada respuesta de fase, puede variar entre menos infinito e infinito, es decir,

$$15 \quad 0 \leq |H(\omega)| \leq 1$$

$$-\infty < \arg[H(\omega)] < \infty$$

En consecuencia y con carácter general, la función de transferencia del DUT 103,  $H(\omega)$  no es una MPF. Por otro lado, en la figura 2 también se representa en el plano complejo la función interferométrica o señal óptica compleja que llega al fotodetector 106,  $F_{int, norm}(\omega)$ :

$$F_{int, norm}(\omega) = \text{Re}[F_{int, norm}(\omega)] + j \cdot \text{Im}[F_{int, norm}(\omega)] = |F_{int, norm}(\omega)| \cdot e^{j \cdot \arg[F_{int, norm}(\omega)]}$$

25 En este caso, y conocida la relación existente entre  $H(\omega)$  y  $F_{int, norm}(\omega)$  descrita anteriormente, se obtienen las condiciones necesarias para que la función interferométrica normalizada sea una MPF:

$$1 + \frac{K}{1-K} \leq |F_{int, norm}(\omega)| \leq 1 - \frac{K}{1-K}$$

$$30 \quad -\frac{\pi}{2} < \arg[F_{int, norm}(\omega)] < \frac{\pi}{2}$$

El hecho que el argumento o respuesta de fase de la función interferométrica normalizada o señal óptica compleja  $F_{int, norm}(\omega)$  se mantenga entre los valores

indicados es lo que permite asegurar que dicha función es una MPF. En este caso, la respuesta de fase,  $\arg[F_{int, norm}(\omega)]$  está unívocamente determinada a partir de la respuesta en amplitud  $|F_{int, norm}(\omega)|$  mediante las conocidas transformadas de Hilbert, relaciones de Kramers – Kröning o cualquier otro algoritmo de reconstrucción de fase:

$$\arg[F_{int, norm}(\omega)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\ln(|F_{int, norm}(\Omega)|)}{\Omega - \omega} d\Omega$$

Una vez demostrado que la función interferométrica o señal óptica compleja a la entrada del detector 106,  $F_{int, norm}(\omega)$  es una MPF, se describe en la figura 3 el método de medida que permite obtener la caracterización completa del DUT 103 a partir de la medida en potencia de la señal óptica que realiza el detector 106.

La figura 3 representa el método de medida mediante un diagrama de flujo que toma como dato de entrada la medida en potencia que realiza el detector 106 a partir de la señal óptica de estímulo que inyecta el TLS 101; y que proporciona como resultado de salida la caracterización completa del dispositivo óptico a medir, tanto en el dominio espectral mediante una función de transferencia compleja  $H(\omega)$  como en el dominio del tiempo mediante su respuesta impulsiva  $h(t)$ .

El método comprende esencialmente una serie de pasos que se describen a continuación:

- (i) *Datos de partida:* El método de medida toma como dato de entrada la medida en potencia que realiza el detector óptico 106 de la señal óptica o función interferométrica que le llega a su entrada, es decir,  $|F_{int}(\omega)|^2$ .
- (ii) *Obtención de la respuesta en amplitud de la función interferométrica normalizada  $|F_{int, norm}(\omega)|$ .* Conocida la densidad espectral de potencia de emisión del TLS 101, que no es más que el módulo al cuadrado de la amplitud compleja de campo óptico de emisión del TLS 101,  $|A(\omega)|^2$ , y conocido el coeficiente de acoplo  $K$  de los acopladores ópticos (102,105) que implementan el sistema interferométrico, es inmediato obtener

$$|F_{int, norm}(\omega)| = \sqrt{\frac{|F_{int}(\omega)|^2}{(1-K)^2 |A(\omega)|^2}}$$

(iii) *Cálculo de la respuesta de fase de la función interferométrica normalizada,  $\arg[F_{int, norm}(\omega)]$ .* Mediante transformada de Hilbert, relaciones de Kramers – Kröning o cualquier otro algoritmo de reconstrucción de fase, se calcula la respuesta de fase de la función interferométrica normalizada a partir de su respuesta en amplitud por verificar ser una MPF.

(iv) *Construcción de la función interferométrica normalizada compleja,  $F_{int, norm}(\omega)$ .* A partir de los resultados de los pasos anteriores, se construye la función interferométrica normalizada compleja a partir de su respuesta en amplitud, obtenida en la etapa (ii) y respuesta de fase, obtenida en la etapa (iii)

$$F_{int, norm}(\omega) = |F_{int, norm}(\omega)| e^{j \arg[F_{int, norm}(\omega)]}$$

(v) *Obtención de la función de transferencia del DUT 103,  $H(\omega)$ .* Una vez obtenida la función interferométrica normalizada  $F_{int, norm}(\omega)$  y conocida la relación existente entre ésta y la función de transferencia compleja del DUT 103, se calcula la característica espectral completa, compuesta de respuestas de amplitud y fase, del dispositivo óptico a medir DUT 103:

$$H(\omega) = \frac{1-K}{K} (1 + F_{int, norm}(\omega))$$

(vi) *Obtención de la respuesta impulsiva del DUT 103,  $h(t)$ .* A partir de la característica espectral completa del DUT 103 obtenida en el paso (v) se calcula la característica del dispositivo óptico a medir en el dominio temporal o respuesta impulsiva  $h(t)$  mediante transformada de Fourier inversa.

Este método de medida podrá ser llevado a cabo de una manera indirecta mediante un algoritmo implementado por ejemplo en un computador externo o bien, de una manera más eficiente, integrado en el aparato de medida, y trabajando en tiempo real, mediante un sistema electrónico específico de procesamiento de señal digital formado por convertidores ADC, microprocesadores y/o procesadores digitales de señal DSP.

La presente invención conjuga, por tanto, un aparato de medida con un método de medida para la obtención de la característica completa de un dispositivo óptico a medir o DUT, utilizando únicamente la medida en potencia de una función interferométrica.

La presente invención no se limita a la configuración definida en el aparato de medida 100 y mostrado en la figura 1. Otra posible alternativa para el aparato de medida 400 se muestra en la figura 4. Los elementos comunes con la primera realización, lógicamente mantienen la misma referencia. No obstante, en el aparato de medida 400 una fuente de luz blanca (WLS – White Light Source) 401 se utiliza como señal óptica de entrada al sistema interferométrico reemplazando el TLS 101 de la primera realización del aparato de medida 100. Este cambio implica que el detector óptico 106 del aparato de medida 100 sea sustituido por un analizador de espectros ópticos OSA 406, o dispositivo similar, el cual realiza la medida en potencia en función de la pulsación óptica de la función interferométrica o señal óptica que llega a su entrada. El segundo aparato de medida 400 se complementa igualmente con el método de medida ya descrito. Siguiendo el mismo proceso se obtiene la caracterización completa del dispositivo óptico a medir o DUT 103, dada por su función de transferencia en el dominio espectral y su respuesta impulsiva en el dominio temporal.

#### Ejemplo de realización de la invención

Un ejemplo de realización de la presente invención se presenta en las figuras 5 y 6. En la figura 5 se presenta una implementación del aparato de medida objeto de la presente invención, mientras que en la figura 6 se presenta la realización del método de medida complementario al aparato de medida implementado en la figura 5.

La realización del aparato de medida 500 se representa en la figura 5 en donde los elementos comunes entre este aparato 500 y el aparato 100 de la figura 1 utilizan la misma referencia numérica y no serán descritos de nuevo. En el aparato 500, una fuente de luz laser sintonizable TLS 501 se utiliza como señal óptica de estímulo y entrada al montaje interferométrico. Sin pérdida de generalidad, en la presente realización se considera que el TLS 501 tiene una amplitud compleja de campo óptico de emisión constante  $A(\omega)=1$  y, por tanto, una densidad espectral de potencia de emisión constante, que se toma como dato

$$|A(\omega)|^2 = 1$$

El montaje interferométrico se forma con los dos acopladores ópticos direccionales 502 y 505, que en esta realización se han diseñado con constantes de acoplo

$$K = \frac{1}{3}$$

En uno de los brazos del montaje interferométrico se coloca el dispositivo a medir DUT 503 que está formado por una red de difracción de Bragg en fibra óptica (FBG – Fiber Bragg Grating) y un circulador óptico con el objeto de caracterizar el comportamiento en reflexión de la FBG.

Con el propósito de balancear los caminos de los dos brazos del interferómetro, que anteriormente se han denotado por  $L_{DUT}$  y  $L_{REF}$  se introduce como elemento de ajuste 504 una línea de retardo óptico variable. Con este elemento de ajuste 504 se consigue hacer que  $L_{DUT}$  y  $L_{REF}$  sean aproximadamente iguales, hecho que mejora las prestaciones del aparato de medida ya que permite relajar las especificaciones de resolución espectral del TLS 501.

La salida del acoplador óptico 505 se lleva al detector 506, que en esta realización es un fotodetector óptico. En la operación de medida, el TLS 501 inyecta en el montaje interferométrico una señal óptica de entrada realizando un barrido en su frecuencia óptica de emisión desde una frecuencia óptica inferior de 192THz a una frecuencia óptica superior de 195.5THz. Este rango de frecuencias ópticas es el intervalo espectral en el que se va a caracterizar al DUT 503 en el dominio espectral. Sincronizado con la señal óptica de entrada que inyecta el TLS 501, el fotodetector 506 mide la potencia de señal óptica que le llega, siendo ésta la densidad espectral de potencia óptica de la función interferométrica del aparato de medida 500, a la que se ha denotado como

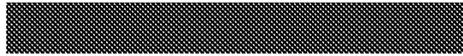
$$|F_{int}(\omega)|^2$$

Esta medida en potencia es el resultado que entrega el aparato de medida al método de medida para la obtención de la caracterización completa del DUT 503.

El método de medida complementario al aparato de medida del aparato 500 se representa gráficamente en la figura 6, siguiendo la misma estructura que la ya mostrada en la figura 3. El método de medida podrá ser implementado de varias formas: una posibilidad, en un ordenador o computadora externa mediante un algoritmo software; y otra posibilidad, mediante un sistema electrónico específico de procesado de señal formado por conversores analógico/digitales (ADC), microprocesadores y/o procesadores digitales de señal (DSP), trabajando en tiempo

real. El método de medida toma como dato de entrada la medida de la densidad espectral de potencia de la función interferométrica, tal y como se indica en el bloque del diagrama de flujo etiquetado como "MEDIDA". Se representa en el interior de este bloque un detalle de la medida realizada para indicar la resolución espectral necesaria. En el paso 1 del método de medida se obtiene el módulo o respuesta en amplitud de la función interferométrica normalizada, utilizando como datos la densidad espectral de potencia de emisión del TLS 501 y la constante de acoplo de los acopladores ópticos 502 y 503 (cuyos valores ya han sido especificados anteriormente). En el bloque etiquetado como "1" (Bloque 1) se representa dicha función junto con un detalle de la misma. En el paso 2 del método de medida se obtiene numéricamente la respuesta de fase de la función interferométrica normalizada. Tal y como se representa en la gráfica del Bloque 2, la respuesta de fase de la función interferométrica normalizada es de fase mínima ya que es una función continua y su excursión pico a pico es menor que  $\pi$ . En el Bloque 3 del método de medida se construye la función interferométrica compleja a partir de los resultados proporcionados por los Bloques 1 y 2. En el Bloque 4 del método de medida ya se obtiene la función de transferencia compleja del dispositivo DUT. En las gráficas del Bloque 4 se han representado: en primer lugar, el módulo al cuadrado (relación de potencias) de la función de transferencia del DUT; y en segundo lugar la respuesta de fase de la función de transferencia del DUT a través de su derivada, que proporciona el retardo de grupo del dispositivo. En ambas gráficas, se muestra el detalle en un intervalo espectral más pequeño para representar las prestaciones de resolución de la presente invención. La función de transferencia compleja del DUT así obtenida caracteriza completamente al dispositivo en el intervalo espectral considerado (el rango espectral que barre el TLS 501). En el Bloque 5 del método de medida ya se obtiene la respuesta impulsiva del dispositivo DUT mediante la transformada de Fourier inversa de la función de transferencia compleja del DUT obtenida en el Bloque 4. En la gráfica del Bloque 5 se ha representado la respuesta impulsiva temporal en potencia del dispositivo DUT 503. La respuesta impulsiva del DUT así obtenida caracteriza completamente al dispositivo en el intervalo temporal que se obtiene a partir del rango espectral que barre el TLS 501 y de la resolución espectral utilizada.

La realización de la presente invención, que conjuga el Aparato de Medida de la figura 5 con el Método de Medida de la figura 6, proporciona la característica



completa del dispositivo a medir DUT 503, que operando en régimen lineal, está compuesta por su función de transferencia compleja en el dominio de la frecuencia y/o su respuesta impulsiva en el dominio del tiempo.

**REIVINDICACIONES**

1.- Método de medida para la caracterización de dispositivos ópticos y  
 5 fotónicos, que partiendo de la densidad espectral de potencia de una función  
 interferométrica, compuesta por la mezcla de una señal óptica de referencia y una  
 señal óptica que contiene la característica del dispositivo objeto de estudio DUT  
 (103, 503), verifica ser una MPF. Este método se **caracteriza porque** partiendo  
 como dato de entrada de la medida en potencia que realiza el detector óptico  
 10 (106,406,506) de la señal óptica o función interferométrica que le llega a su entrada,  
 es decir,  $|F_{int}(\omega)|^2$ , comprende las etapas de:

(i) Obtención de la respuesta en amplitud de la función interferométrica  
 normalizada  $|F_{int, norm}(\omega)|$ , en donde conocida la densidad espectral de  
 energía de emisión de una fuente de luz (101, 401, 501) que no es más  
 15 que el módulo al cuadrado de la amplitud compleja de campo óptico de  
 emisión de dicha fuente de luz (101, 401, 501)  $|A(\omega)|^2$ , y conocido el  
 coeficiente de acoplo  $K$  de los acopladores ópticos (102,105, 502, 505)  
 que implementan el sistema interferométrico, es inmediato obtener

$$|F_{int, norm}(\omega)| = \sqrt{\frac{|F_{int}(\omega)|^2}{(1-K)^2 |A(\omega)|^2}}$$

20 (ii) Cálculo de la respuesta de fase de la función interferométrica normalizada,  
 $arg[F_{int, norm}(\omega)]$ , a partir de la función obtenida en la etapa (i), utilizando  
 transformada de Hilbert, relaciones de Kramers – Krönig o cualquier otro  
 algoritmo de reconstrucción de fase. Así, se calcula la respuesta de fase  
 de la función interferométrica normalizada a partir de su respuesta en  
 25 amplitud por verificar ser una MPF;

(iii) Construcción de la función interferométrica normalizada compleja,  $F_{int, norm}(\omega)$ ,  
 en donde a partir de los resultados de los pasos anteriores, se construye  
 la función interferométrica normalizada compleja a partir de su respuesta  
 en amplitud, obtenida en la etapa (i) y respuesta de fase, obtenida en la  
 30 etapa (ii)

$$F_{int, norm}(\omega) = |F_{int, norm}(\omega)| e^{j \cdot arg[F_{int, norm}(\omega)]}$$

(iv) Obtención de la función de transferencia del DUT (103,503),  $H(\omega)$ . Una vez  
 obtenida la función interferométrica normalizada  $F_{int, norm}(\omega)$  y conocida la  
 relación existente entre ésta y la función de transferencia compleja del

DUT (103,503) se calcula la característica espectral completa, compuesta de respuesta de amplitud y fase, del dispositivo óptico a medir DUT (103,503)  $H(\omega)$ :

$$H(\omega) = \frac{1-K}{K} (1 + F_{\text{int, norm}}(\omega))$$

- 5 (v) Obtención de la respuesta impulsiva del DUT (103,503),  $h(t)$ , en donde a partir de la característica espectral completa del DUT 103 obtenida en el paso (iv) se calcula la característica del dispositivo óptico a medir en el dominio temporal o respuesta impulsiva  $h(t)$  mediante transformada de Fourier inversa.

10

2.- Aparato de medida (100,400,500) para la caracterización de dispositivos ópticos y fotónicos, basado en interferometría espectral, y que comprende una fuente de luz (101, 401, 501) que proporciona a su salida una señal óptica, que se lleva a un primer acoplador óptico direccional (102,502) a través de una guía-onda óptica (111) y donde la salida de la fuente de luz (101, 401, 501) está caracterizada por su amplitud compleja de campo óptico de emisión  $A(\omega)$ , mientras que el acoplador óptico direccional (102,502) está caracterizado por su constante de acople  $K$ , distribuyendo la señal óptica de su entrada entre sus dos salidas: una primera salida proporcional a  $K$  y una segunda salida proporcional a  $1 - K$ ; y que comprende, además, medios para ejecutar el método de la reivindicación 1; estando además **caracterizado porque**

20

la señal óptica de una de las salidas del acoplador óptico (102,502) está conectada con el dispositivo DUT (103,503) a través de una guía-onda óptica (112), estando a su vez conectado con un segundo acoplador óptico direccional (105,505) a través de una segunda guía-onda óptica (114); y en donde el primer y segundo acoplador óptico (102,105,502,505) son de características similares, estando ambos caracterizados por la constante de acople  $K$ ;

25

y donde la señal óptica en la segunda salida del primer acoplador óptico (102,502) está conectada con un elemento de ajuste (104,504) a través de una guía-onda óptica (113), estando dicho elemento de ajuste (104,504) a su vez conectado con la segunda entrada del segundo acoplador óptico (105,505) a través de una guía-onda óptica (115);

30

y en donde el segundo acoplador óptico (105,505) combina las dos señales ópticas de sus puertos de entrada en su puerto de salida, llevando esta señal de salida hacia un detector óptico (106,406,506) a través de una guía-onda óptica (116).

35

3.- Aparato de medida (100,400,500) de acuerdo con la reivindicación 2 en donde el elemento de ajuste (104,504) consiste en una línea de retardo variable, bien conocida en el estado de la técnica.

5

4.- Aparato de medida (100,400,500) de acuerdo con las reivindicaciones 2 y 3 en donde la fuente de luz es una fuente de luz láser sintonizable o TLS (101,501).

5.- Aparato de medida (100,400,500) de acuerdo con las reivindicaciones 2 y 3 en donde la fuente de luz es una fuente de luz blanca (401).

10

6.- Aparato de medida (100,400,500) de acuerdo con las reivindicaciones 2, 3 y 4 en donde el detector óptico (106,506) es un fotodetector.

15

7.- Aparato de medida (100,400,500) de acuerdo con las reivindicaciones 2, 3 y 5 en donde el detector óptico es un analizador de espectros ópticos OSA (406).

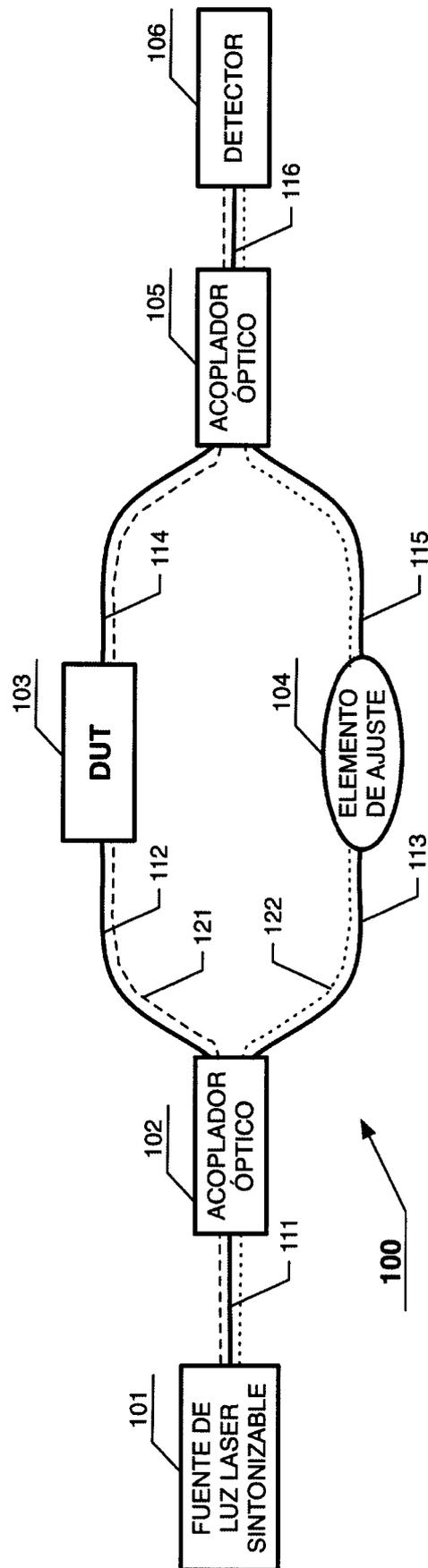
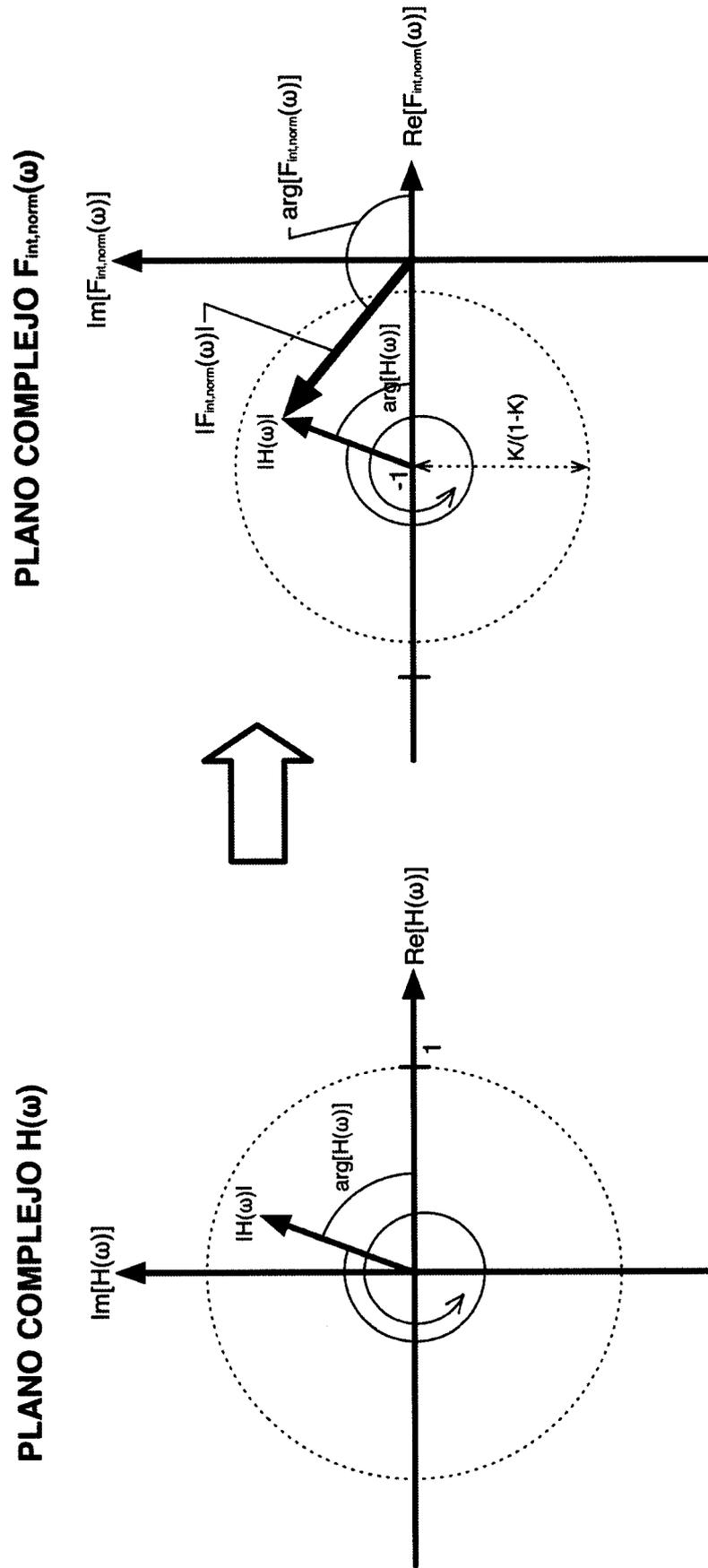


FIG. 1



**FIG. 2**

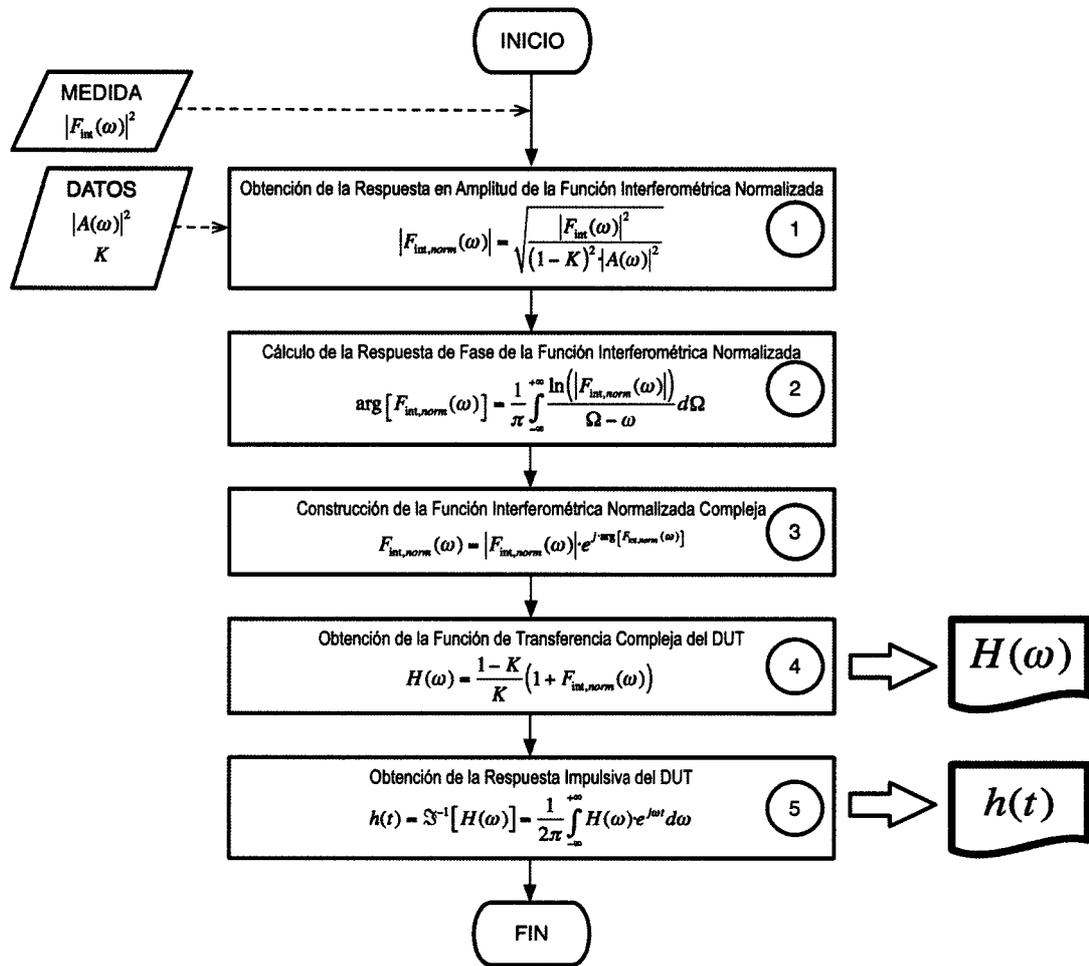
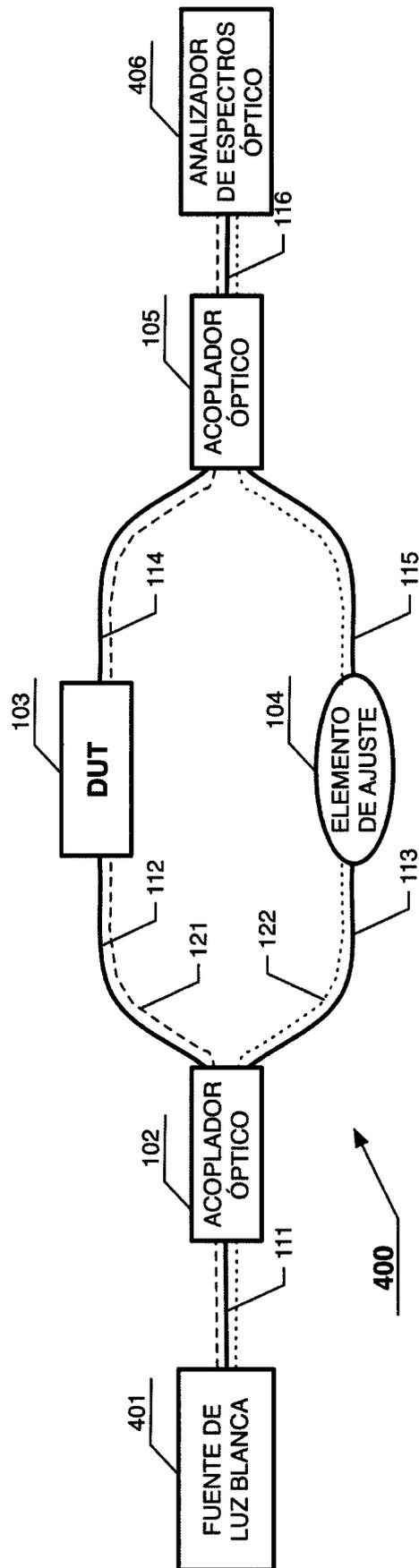


FIG. 3



**FIG. 4**

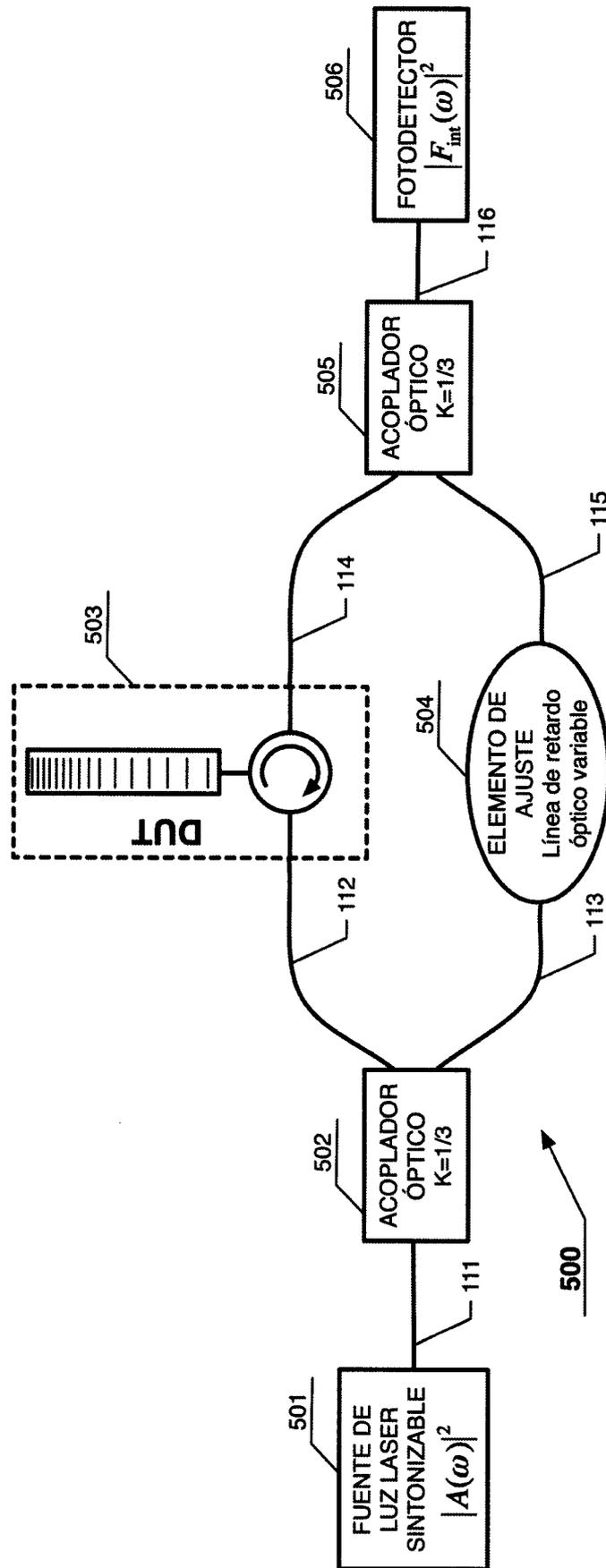


FIG. 5

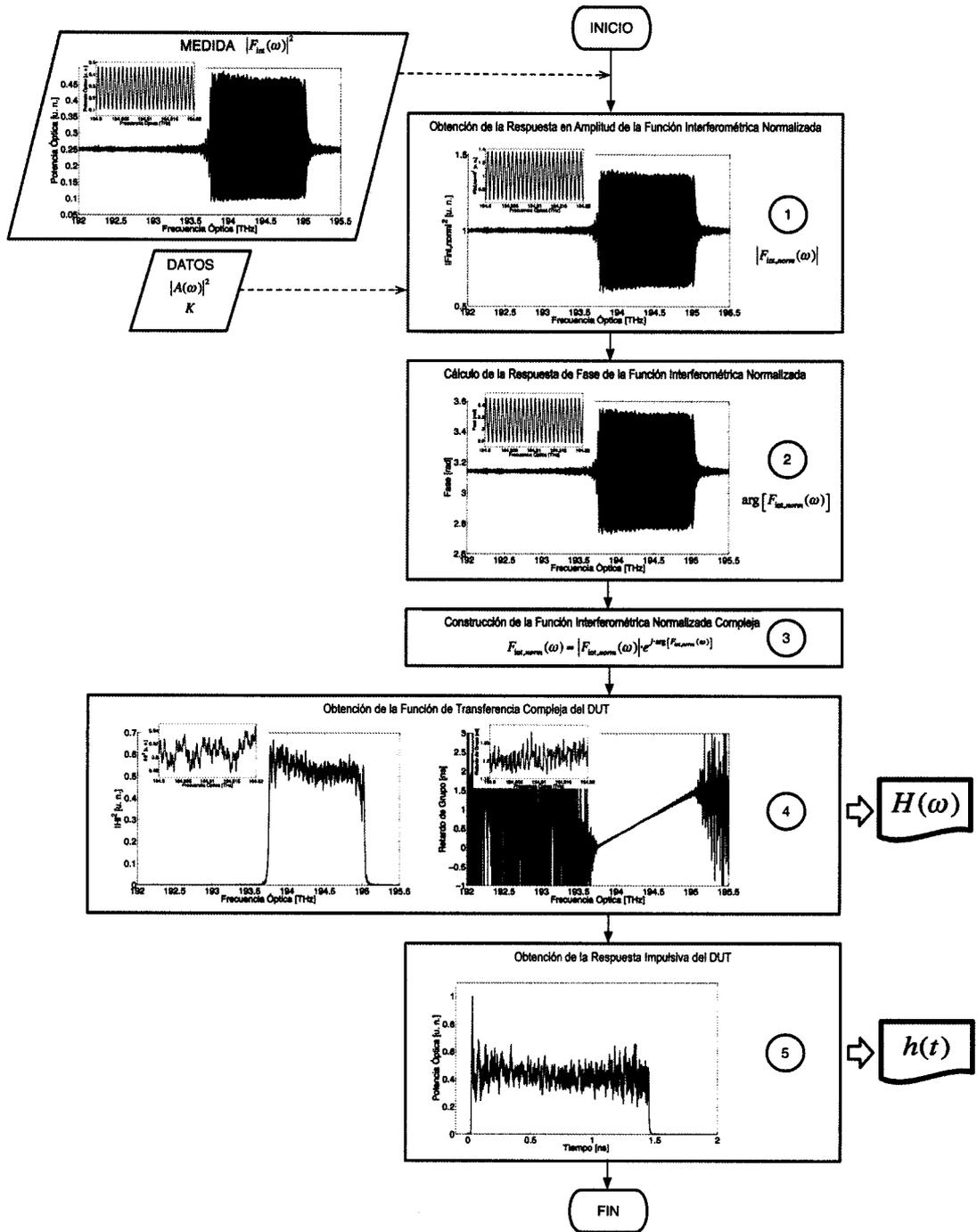


FIG. 6