

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 763 040**

51 Int. Cl.:

G01J 9/02 (2006.01)

G01J 11/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **30.11.2016 PCT/EP2016/079199**

87 Fecha y número de publicación internacional: **08.06.2017 WO17093277**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.11.2016 E 16808946 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **02.10.2019 EP 3384259**

54 Título: **Procedimiento de medición de retardos relativos entre canales de propagación ópticos en régimen de pulso**

30 Prioridad:

02.12.2015 FR 1502513

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

26.05.2020

73 Titular/es:

**THALES (100.0%)
Tour Carpe Diem, Place des Corolles, Esplanade
Nord
92400 Courbevoie, FR**

72 Inventor/es:

**BOURDERIONNET, JÉROME;
BRIGNON, ARNAUD y
ANTIER-MURGEY, MARIE**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 763 040 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

Procedimiento de medición de retardos relativos entre canales de propagación ópticos en régimen de pulso

La obtención de fuentes láser de altas potencias (o energías) y de grandes luminancias está hoy limitada por la resistencia al flujo de los materiales de ganancia. Una solución a este problema es distribuir la amplificación sobre varios medios de ganancia en paralelo y luego recombinarlos.

El campo de la invención es el de la recombinación coherente de un gran número de fuentes láser elementales de alta potencia, y/o de alta energía en el caso de fuentes de pulso ultracortos, por ejemplo, de ancho de pulso inferior a 100 picosegundos.

Tal recombinación de fuentes láser en régimen de pulso impone, con respecto al régimen continuo, la exigencia adicional de que los pulsos no solo deben estar en fase, sino también sincronizados. En otras palabras, para interactuar, los pulsos deben superponerse espacial y temporalmente. Por lo tanto, esto requiere conocer los tiempos de propagación de los pulsos en cada uno de los canales de propagación del sistema.

Los sistemas de fibra de las redes de amplificadores recombinadas de manera coherente (sistemas CAN, acrónimo de la expresión anglosajona "Coherent Amplifier Network") constan típicamente de una multitud de secciones de fibras, de las cuales es difícil controlar la longitud al menos de 1 cm de precisión. Las longitudes ópticas de los diferentes canales del sistema, por lo tanto, varían típicamente en algunos centímetros, ya sea un retardo equivalente de algunas decenas a algunas centenas de picosegundos. Estos retardos varían más dinámicamente, principalmente con el calentamiento del sistema, pero también con las fluctuaciones mecánicas circundantes. Ahora bien, para agregar 2 pulsos láseres de manera coherente, estos pulsos primero deben tener un solapamiento temporal máximo: deben estar sincronizados. Entonces, para tener un máximo de intensidad, los pulsos deben estar en fase o en cofase.

Las técnicas de medición de fase y cofase son múltiples y se describen, por ejemplo, en la publicación: "kHz closed loop interferometric technique for coherent fiber beam combining" de M. Antier y col., JSTQE 20(5). Con respecto al problema de la sincronización de los pulsos, el procedimiento usado hasta la fecha consiste en ajustar manualmente el retardo óptico de cada canal de propagación maximizando la señal de interacción no lineal entre los pulsos tomados 2 a 2 en un dispositivo de tipo FROG tal como se presenta en la publicación: "using phase retrieval to measure the intensity and phase of ultrashort pulses: frequency-resolved optical gating" de R. Trebino y col., J. Opt. Soc. Am A 10. Según este dispositivo, uno de los pulsos pasa por una línea de retardo variable, y los caminos de propagación de los 2 pulsos se encuentran en un cristal no lineal. La línea de retardo se ajusta para maximizar la señal generada por la interacción no lineal entre los pulsos. El valor de la línea de retardo da entonces el retardo entre los pulsos. Este procedimiento permite eficazmente recalibrar los retardos relativos de cada pulso con respecto a los demás, de una manera muy fiable y precisa (cerca del femtosegundo), pero no se puede implementar colectivamente para un gran número de pulsos, incluso superior a algunas decenas solo.

Otros ejemplos del estado de la técnica se proporcionan por la tesis doctoral de Marie Antier "Mesure interférométrique de phase et application à la combinaison coherente d'un grand nombre de fibres amplificatrices", así como en los documentos "Interferometric phase measurement techniques for coherent beam combining" de Antier y col., SPIE; "XCAN - A coherent amplification network of femtosecond fiber chirped-pulse amplifiers" de Daniault y col., The European Physical Journal; y "Collective synchronization and phase locking of fs fiber amplifiers: requirements and potential solutions" de Lombard y col., The European Physical Journal.

Por lo tanto, el problema técnico que estamos tratando de resolver es medir estos retardos para un gran número de canales, con una implementación robusta, fiable y de bajo coste, pudiendo esta medición implementarse en un bucle de retroalimentación dinámica. Esta medición de los retardos debe ser además compatible con las arquitecturas de mediciones y de control de fase óptica necesarias para el bloqueo en fase de los canales ópticos de la fuente.

La invención propuesta consiste en explotar de manera original las arquitecturas colectivas de medición de fase óptica por interferencia con una referencia externa. La cartografía de los retardos entre los canales de propagación del sistema se obtiene entonces colocando una línea de retardo variable sobre el canal de referencia, luego barriendo este retardo mientras analiza la figura de interferencia producida sobre el detector. La presencia de franjas de alto contraste indica la sincronización de un pulso con la referencia. En el caso de franjas de interferencia espaciales, la posición espacial sobre el detector permite identificar el canal en cuestión y, en el caso de franjas de interferencia temporales, la frecuencia de las franjas permite identificar el canal. El barrido completo del retardo sobre la referencia al final da la cartografía completa del sistema y permite sincronizar el conjunto de los pulsos corrigiendo el retardo sobre cada canal, del valor medido.

Más precisamente, la invención tiene por objeto un procedimiento de medición del retardo entre N pulsos de duración inferior a 100 picosegundos que se propagan en N canales, que consta de las siguientes etapas:

- emisión colimada de estos N pulsos de la misma frecuencia de repetición,
- emisión de un pulso de referencia de la misma frecuencia de repetición adecuado para producir franjas de interferencias con cada uno de los N pulsos,
- para cada uno de los N pulsos, detección por un detector de la suma coherente de este pulso con el pulso de

referencia, produciendo esta suma dichas franjas de interferencias, siendo las franjas de interferencia que provienen de cada uno de los pulsos N distinguibles entre sí, ya sea espacialmente, o bien, temporalmente.

Está principalmente caracterizado porque el pulso de referencia se emite con un retardo con respecto a los tiempos de llegada estimados de los N pulsos al detector, siendo este retardo ajustable dentro de un rango de retardos determinado, y porque el procedimiento consta, además, de las siguientes etapas:

- para un retardo en el rango de retardos, medición simultánea para los N pulsos de N contrastes de las franjas de interferencias, repitiéndose esta medición para otros P retardos en dicho rango, para obtener así otros P.N contrastes de franjas de interferencias,
- para cada uno de los N pulsos, un valor de retardo entre este pulso y el pulso de referencia viene dado por el retardo correspondiente al contraste máximo de entre los P contrastes.

El procedimiento según la invención usa de este modo la visibilidad (o el contraste) de franjas de interferencias como criterio de sincronización entre los pulsos, lo que tiene por ventaja, por un lado, permitir una implementación colectiva y, por otro lado, usar los mismos medios de diagnóstico que los usados a continuación para la cofase de los pulsos (bloqueo de la posición de las franjas de interferencia).

Según un primer modo de explotación, los N pulsos y el pulso de referencia tienen la misma longitud de onda (o pulsación) central, la dirección de propagación de los N pulsos es diferente de la dirección de propagación del pulso de referencia y las franjas de interferencias son franjas de interferencias espaciales ubicadas en N zonas distintas del detector que es un detector matricial.

Según otro modo de explotación, las longitudes de onda de los N pulsos son diferentes entre sí y diferentes de la longitud de onda del pulso de referencia, y las franjas de interferencias son franjas de interferencias temporales ubicadas en el mismo lugar del detector.

La invención también tiene por objeto un sistema de medición del retardo entre N pulsos de duración inferior a 100 picosegundos que se propagan en N canales, que consta de:

- N fuentes de pulso configuradas para que los N pulsos se propaguen según direcciones de propagación paralelas,
- un emisor de un pulso de referencia configurado para que el pulso de referencia se propague según una dirección de propagación inclinada con respecto a la dirección de propagación de los N pulsos, y asociado con una línea de retardo ajustable, teniendo los N pulsos y el pulso de referencia la misma longitud de onda y la misma frecuencia de repetición,
- un detector matricial,
- un dispositivo de generación de imágenes configurado para formar en el detector, para cada uno de los N pulsos, una suma coherente de este pulso con el pulso de referencia, produciendo esta suma franjas de interferencias espaciales.

El sistema de medición consta, además, de:

- un dispositivo de redireccionamiento de la dirección del plano de onda del pulso de referencia con respecto a la dirección de propagación de los N pulsos que comprende sobre el trayecto del pulso de referencia:
 - un elemento óptico difractivo de compensación de red periódica,
 - un montaje óptico con doble transformada de Fourier y un aumento predeterminado, provisto de dos lentes y configurado para que el plano del detector contenga el punto focal imagen del montaje óptico, y para que el plano del elemento difractivo contenga el punto focal objeto,

- medios para implementar el procedimiento de medición descrito.

La invención también se refiere a un sistema de medición del retardo entre N pulsos de duración inferior a 100 picosegundos que se propagan en N canales, que consta de:

- N fuentes de pulso configuradas para que los N pulsos se propaguen según direcciones de propagación paralelas,
- un emisor de un pulso de referencia asociado con una línea de retardo ajustable, teniendo los N pulsos y el pulso de referencia la misma frecuencia de repetición, pero diferentes longitudes de onda,
- un detector en forma de fotodiodo,
- un dispositivo de generación de imágenes configurado para formar en el fotodiodo, para cada uno de los N pulsos, una suma coherente de este pulso con el pulso de referencia, produciendo esta suma franjas de interferencias temporales,

caracterizado porque consta de medios para implementar el procedimiento de medición descrito correspondiente.

La invención también tiene por objeto un sistema de bloqueo de fase y de sincronización de N fuentes de pulso de duración inferior a 100 picosegundos que consta de:

- N fuentes de pulso de la misma frecuencia de repetición, respectivamente, provistas de moduladores de fase,
- un emisor de un pulso de referencia de la misma frecuencia de repetición, equipado con una línea de retardo ajustable,
- un detector,
- un dispositivo de generación de imágenes configurado para formar en el detector, para cada uno de los N pulsos, una suma coherente de este pulso con el pulso de referencia, produciendo esta suma franjas de interferencias,
- un bucle de bloqueo de fase que consta de:

- medios de cálculo de los desfases entre cada fuente y el emisor del pulso de referencia,
- medios de control de los moduladores de fase en función de los desfases,

caracterizado porque además consta de:

- una línea de retardo variable asociada con cada fuente,
 - un bucle de bloqueo de retardo que consta de:
- un sistema de medición del retardo entre los N pulsos tal como se describe,
 - medios de control de las líneas de retardo de las N fuentes en función de los retardos medidos.

De este modo, este sistema permite compensar de manera dinámica, los retardos introducidos sobre un gran número N de haces láser mediante la propagación a través de un conjunto de medios de ganancia (amplificadores de fibra, por ejemplo) puestos en paralelo. Una vez sincronizados y bloqueados en fase, los N haces láser emergentes interfieren constructivamente y, de este modo, constituyen una fuente de luminancia N veces superior a la de un amplificador elemental, manteniendo su calidad de haz (limitada por difracción en el caso de fibras monomodos, por ejemplo).

Otras características y ventajas de la invención se harán evidentes tras la lectura de la descripción detallada que sigue, hecha a título de ejemplo no limitativo y con referencia a los dibujos adjuntos en los que:

- la figura 1 ilustra esquemáticamente una etapa del procedimiento de medición según la invención, implementado en una configuración donde el haz de referencia está inclinado con respecto a los haces que se han de caracterizar,
- la figura 2 ilustra esquemáticamente varias iteraciones de la etapa de la figura 1 según la invención, con la misma configuración,
- la figura 3 muestra diferentes etapas de un ejemplo de cálculo de la visibilidad de las franjas,
- la figura 4 representa esquemáticamente un ejemplo de sistema de bloqueo de fase y de sincronización según la invención,
- la figura 5a ilustra un error de medición, y la figura 5b la corrección de este error de medición,
- la figura 6 representa esquemáticamente un ejemplo de un montaje óptico de redireccionamiento del pulso de referencia.

De una figura a otra, los mismos elementos se identifican por las mismas referencias.

En la siguiente descripción, las expresiones "alto", "bajo", se usan con referencia a la orientación de las figuras descritas. En la medición en que los sistemas se puedan posicionar según otras orientaciones, la terminología direccional se indica a título de ilustración y no es limitante.

La solución aportada se basa en la arquitectura de medición de fase colectiva mediante técnica interferométrica tal como se describe en la publicación: "Collective coherent phase combining of 64 fibers" J. Bourderionnet y col., Opt Express. 19. En esta arquitectura, los desfases ópticos entre los canales de propagación se obtienen por análisis las redes de franjas de interferencia entre cada uno de los haces ópticos con una referencia común. Las franjas se graban colectivamente sobre una cámara, de modo que todos los desfases se graben en una sola imagen. En régimen de pulso, los pulsos que no están sincronizados, es decir, que no están presentes simultáneamente en el plano del sensor de la cámara, no producirán interferencias. La medición entonces es imposible.

Una implementación ejemplar de este procedimiento de medición colectiva se describe con referencia a la figura 1. Se supone que los pulsos 1 que se han de caracterizar están colimados y tienen la misma dirección de propagación; tres pulsos que se han de caracterizar se representan en la figura. Un pulso de referencia 2 se extiende en una onda plana y se propaga en una dirección no paralela a la de los pulsos que se han de caracterizar. Se supone que los dos pulsos 1 y 2 son coherentes (para poder obtener franjas de interferencias) y de la misma frecuencia de repetición (típicamente se derivan del mismo oscilador 9 maestro que se muestra en la figura 4). El haz de referencia 21 solapa espacialmente el conjunto de los haces que se han de caracterizar al nivel del detector 3, tal como una cámara de medición. Por lo tanto, la cámara graba la suma de cada pulso 1 con el pulso de referencia 2. Esta grabación se resuelve espacialmente, es decir, que cada pulso que se ha de caracterizar se atribuye a una zona 31 bien determinada de la cámara: los pulsos que se han de caracterizar no se solapan espacialmente.

5 Preferentemente, la intensidad óptica de la referencia 2 se ajusta para que sea igual al nivel de intensidad de los pulsos 1 que se han de caracterizar, para optimizar los fenómenos de interferencia. Cuando uno de los pulsos 1 que se han de caracterizar es perfectamente sincrónico con el pulso de referencia 2 ($\tau = \tau_{REF}$), la cámara graba una figura de interferencia I_M perfectamente desarrollada, de período espacial dado por el ángulo entre las direcciones de propagación del haz de referencia y los haces que se han de caracterizar. Si los pulsos no se solapan temporalmente ($|\tau - \tau_{REF}| > \Delta\tau$, con $\Delta\tau$ siendo el ancho temporal de los pulsos), entonces tenemos una suma incoherente I_m y no se observan franjas de interferencia. Para las situaciones intermedias para las cuales $|\tau - \tau_{REF}| \leq \Delta\tau$, se observan interferencias I_i , pero con un contraste disminuido.

10 Este principio de medición se aplica a un conjunto de N haces láseres de pulso colimados, dispuestos según una disposición de 1 o 2 dimensiones. La cámara 3 de control graba una imagen I de esta disposición, de modo que cada uno de los N haces corresponde a una zona 31 espacial distinta del detector. Según la invención, se coloca una línea de retardo variable 5 sobre la vía de referencia, también incidente sobre la cámara 3 de control, y formando un ángulo θ con los haces a sincronizar.

15 La cartografía de los retardos relativos entre los haces láseres N se obtiene barriendo la carrera de la línea de retardo 5 de la vía de referencia y midiendo simultáneamente la presencia de franjas de interferencia sobre la imagen de intensidad I sobre la cámara 3, como se ilustra en la figura 2. La carrera de la línea de retardo variable debe ser como mínimo igual al retardo máximo a sondear; varía en un rango de retardos predeterminado, típicamente igual a 10 cm para pulsos de duración inferior a 100 picosegundos.

20 Para cada retardo, se realiza una grabación simultánea I de la superposición espacial de los pulsos sobre la cámara 3. La presencia de interferencias sobre la imagen de la cámara indica que un pulso 1 es sincrónico con la referencia 2, y la posición espacial 31 del juego de franjas permite la localización e identificación del canal de propagación sincronizado. Procediendo de este modo hasta haber visualizado las franjas de interferencia para cada uno de los canales, se obtiene la medición de todos los retardos relativos del sistema, que luego se pueden compensar.

25 Al final de esta etapa, se obtiene una imagen I τ por valor de retardo ($\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ en el ejemplo de la figura) de la vía de referencia, cada imagen ($I_{\tau 1}, I_{\tau 2}, I_{\tau 3}, I_{\tau 4}$ en el ejemplo de la figura) que contiene la adición coherente (pulsos simultáneos: $I_{M\tau 1}, I_{M\tau 3}, I_{M\tau 4}$ en el ejemplo de la figura), o incoherentes (pulsos desplazados temporalmente: $I_{m\tau 1}, I_{m\tau 2}, I_{m\tau 3}, I_{m\tau 4}$ en el ejemplo de la figura) de cada pulso incidente $1_1, 1_2, 1_3$ con el pulso de referencia 2. Para las situaciones intermedias, se observan franjas de interferencia con un contraste disminuido ($I_{i\tau 3}, I_{i\tau 4}$ en el ejemplo de la figura).

30 El retardo del pulso 1 con respecto a la referencia 2 viene dado entonces por el máximo de visibilidad de las franjas de interferencia sobre el conjunto de las imágenes I_{τ} obtenidas durante el barrido de la línea de retardo 5 de la referencia ($I_{\tau 1}, I_{\tau 2}, I_{\tau 3}, I_{\tau 4}$ en el ejemplo de la figura), es decir, por:

- el retardo τ_1 para el pulso 1_1 ,
- el retardo τ_3 para el pulso 1_2 ,
- el retardo τ_4 para el pulso 1_3 .

35 El criterio de sincronización de los pulsos, que corresponde a un máximo de visibilidad de las franjas, entonces se puede obtener por diferentes procedimientos, más o menos simples y más o menos robustos. Primero se considera cada imagen I_{τ} como subdividida en N imágenes $I_{\tau,k}$ respectivamente centradas sobre los N pulsos 1_k que se han de caracterizar (k varía de 1 a N).

40 - Entonces, por ejemplo, se puede calcular el mínimo de intensidad I_m para cada subimagen $I_{\tau,k}$. El valor mínimo más bajo indica el máximo de interferencia entre el pulso 1_k y la referencia 2, por lo tanto, una sincronización óptima. También se puede buscar el máximo de intensidad I_M además del mínimo, lo que da acceso al contraste de las franjas.

45 - Otro procedimiento, que demanda más cálculo, pero con una mejor relación de señal/ruido, se ilustra en la figura 3. Para cada imagen $I_{\tau,k}$, la visibilidad de las franjas se puede estimar por la densidad espectral de potencia de la imagen a la frecuencia ν_0 de las franjas de interferencia. Se procesa una imagen I_{τ} en su conjunto procediendo de la siguiente manera:

- Se calcula $H_{\tau} = F(I_{\tau})$, F siendo la transformada de Fourier,
- Se aíslan las contribuciones alrededor de la frecuencia de las franjas de interferencias, y se les centra de nuevo alrededor de la frecuencia cero:

50
$$\tilde{H}_{\tau}(-\delta\nu; +\delta\nu) = H_{\tau}(\nu_0 - \delta\nu; \nu_0 + \delta\nu)$$

$$\nu \notin [-\delta\nu; +\delta\nu]: \tilde{H}_{\tau}(\nu) = 0$$

- Se recupera una imagen de visibilidad de las franjas calculando la transformada de Fourier inversa F^{-1} de:

$$Y_{\tau} = F^{-1}(\tilde{H}_{\tau})$$

Finalmente, estos diversos procedimientos cuantifican la visibilidad Y de las franjas en función del retardo τ de la referencia 2, y para cada pulso 1_k que se ha de caracterizar. El retardo τ_k del pulso 1 indexado k con respecto a la referencia, se da entonces por el máximo de visibilidad de las franjas de interferencia durante el barrido de la línea de retardo de la referencia:

$$\tau_k = \underset{\tau}{\text{máx}} [Y(\tau, k)]$$

Esta cartografía de retardos permite al final ajustar las líneas de retardo 7_k (mostradas en la figura 4) presente sobre cada una de las vías k para igualar todos los τ_k .

El esquema de la figura 4 ilustra un ejemplo de uso de la invención en una cadena completa de fuentes láser de pulso según la tecnología de redes de amplificadores coherente (CAN). Según este esquema, el oscilador 9 maestro está dividido en N vías ($N=3$ en el ejemplo de la figura). Cada una de estas vías consta de un medio de ajuste del retardo óptico (tal como una línea de retardo ajustable $7_1, 7_2, 7_3$ pilotado por medios 11 de control de las líneas de retardo) para la sincronización de los pulsos $1_1, 1_2, 1_3$, y un medio de control de la fase óptica (tal como un modulador de fase $6_1, 6_2, 6_3$ pilotado por medios 13 de control de los moduladores de fase) para la cofase de los pulsos $1_1, 1_2, 1_3$. Cada canal se amplifica luego por un módulo amplificador $8_1, 8_2, 8_3$, antes de salir al espacio libre hacia una óptica de colimación, típicamente una matriz de microlentes $10_1, 10_2, 10_3$. Según el esquema de la figura 4, la parte de diagnóstico del sistema consta de un detector 3 tal como una cámara, sobre la que son incidentes los pulsos láser $1_1, 1_2, 1_3$ y una vía de referencia, (con una lente de colimación 10_{20}), que también consta de una línea de retardo variable 5, de carrera suficientemente grande. El primer bucle de servocontrol se define mediante el siguiente ciclo:

- Se hace variar el retardo de la vía de referencia 2, por ejemplo, por paso predeterminado del orden del ancho de los pulsos por medios 15 de control de esta línea de retardo 5, y se mide la cartografía de los retardos del sistema por medios 12 de cálculo de los retardos, explotando la visibilidad de las franjas de interferencia como se describió anteriormente.
- Las líneas de retardo de cada vía $7_1, 7_2, 7_3$ se ajustan (por los medios 11 de control controlados por los medios de cálculo 12), para igualar los retardos sobre cada vía y de este modo sincronizar todos los pulsos $1_1, 1_2, 1_3$.

Los medios 15 de control de la línea de retardo 5 del emisor del pulso de referencia pueden ser pilotados ellos mismos en función de los retardos medidos.

Este primer bucle puede implementarse con una frecuencia potencialmente muy lenta, según la rapidez de deriva de los retardos del sistema: cada minuto, por ejemplo.

Como se describe en la publicación "Collective coherent phase combining of 64 fibers" J. Bourderionnet y col., Opt Express. 19, un segundo bucle de servocontrol se implementa entonces para bloquear las fases ópticas de los pulsos. Cuando el primer bucle está cerrado, es decir, cuando los pulsos están sincronizados, este segundo bucle usa la última imagen de cámara obtenida al final del primer bucle de servocontrol con nuevas imágenes para la medición de la cartografía de las fases relativas. Se mide la cartografía de los desfases del sistema por medios 14 de cálculo de los desfases, esta vez explotando las posiciones relativas de las franjas de interferencia, luego se ajustan los moduladores de fase $6_1, 6_2, 6_3$ por los medios 13 de control controlados por los medios 14 de cálculo.

Se ha indicado que el pulso de referencia 2 se propaga según una dirección θ formando un ángulo distinto de cero con las direcciones de propagación de los pulsos 1 a sincronizar, y para poder visualizar franjas de interferencia sobre la cámara de control. La figura 5a muestra un error sistemático producido por el sistema tal como se describió anteriormente: para pulsos incidentes $1_1, 1_2, 1_3$ perfectamente sincronizados, se ve que el máximo de contraste sobre las franjas de interferencia I_M no se obtiene para un mismo valor de retardo sobre la vía de referencia (como debería ser el caso para pulsos sincronizados):

- en (a) se tiene la imagen obtenida cuando la parte inferior del pulso de referencia 2 está en fase y sincronizado con el pulso 1_1 (pero no con los pulsos 1_2 y 1_3) en el plano focal de la cámara 3,
- en (b) se tiene la imagen obtenida cuando la parte media del pulso de referencia 2 está en fase y sincronizado con el pulso 1_2 (pero no con los pulsos 1_1 y 1_3) en el plano focal de la cámara 3,
- en (c) se tiene la imagen obtenida cuando la parte superior del pulso de referencia 2 está en fase y sincronizado con el pulso 1_3 (pero no con los pulsos 1_1 y 1_2) en el plano focal de la cámara 3.

Para superar este problema, el ángulo θ entre las direcciones de propagación de los pulsos 1 a sincronizar y el del pulso de referencia 2 debe obtenerse manteniendo los frentes de propagación de la energía paralelos, como se ilustra en la figura 5b. Esta condición se puede realizar usando un montaje 100 de redireccionamiento del pulso de referencia 2 como el detallado en la figura 6. Se usa un elemento óptico difractivo de compensación de red 101 periódica para ajustar independientemente la dirección de propagación del pulso de referencia 2 y el frente de propagación de energía (es decir, la distribución espacial de la energía el pulso en un instante dado). Un montaje óptico de generación de imágenes con doble transformada de Fourier y un aumento predeterminado, provisto de dos lentes $L1$ y $L2$ configurado para que el plano focal del detector 3 contenga el punto focal imagen del montaje, y para que el plano del elemento 101 difractivo contenga el punto focal objeto, permite entonces compensar la dispersión cromática de la red 101 de difracción, de modo que la posición de las franjas de interferencia sobre la cámara 3 es independiente de la longitud

de onda. Más precisamente, el conjunto 101 difractivo de redireccionamiento se fotografía sobre la cámara 3 por un dispositivo de generación de imágenes. Este dispositivo de generación de imágenes comprende:

- una lente L1 de focal f_1 y
- una lente L2 de focal f_2 .

5 Estas 2 lentes forman un montaje de doble TF de aumento predeterminado γ , adecuado para generar imágenes del conjunto 101 óptico difractivo de redireccionamiento sobre la cámara 3: el conjunto 101 óptico difractivo de redireccionamiento está ubicado en el plano objeto de la lente L1, estando ubicada la cámara 3 en el plano de imagen de la lente L2, coincidiendo el plano de imagen de la lente L1 con el plano objeto de la lente L2.

10 Los haces ópticos provenientes de las fuentes láser de pulso S_k están colimados aguas arriba del sistema (están ubicados, por ejemplo, en un plano y colimados por una lente) y cada haz forma con el haz de referencia proveniente de L2 un ángulo específico θ sobre la cámara 3. Se selecciona el ángulo θ para obtener un paso de franja de interferencia Λ adaptado a la resolución de la cámara (típicamente 1 franja \rightarrow ~ 10 píxeles). El conjunto 101 difractivo de redireccionamiento consta de una red de fase y/o de amplitud periódica de paso Λ_{101} . El paso Λ_{101} se calcula en función del ángulo de incidencia ψ del haz de referencia incidente sobre el DOE redireccionamiento 101 y del ángulo de inclinación φ del DOE de compensación sobre el eje z (eje óptico de las lentes L2 y L1).

15 Para que las distribuciones espaciales de energía de los pulsos incidentes sobre la cámara 3 sean paralelas a la distribución espacial de energía del haz de referencia, el ángulo de inclinación (en el plano xOz) de la distribución de energía de la referencia antes de la lente L2 debe ser igual a θ_2 . El dispositivo de generación de imágenes constituido por lentes L1 y L2, de aumento $\gamma = -f_2/f_1$, impone entonces la siguiente condición sobre el ángulo de inclinación de la distribución espacial de energía φ_1 en la salida del DOE de redireccionamiento 101:

$$\tan(\varphi_1) = \gamma \tan(\theta_2)$$

20 Por otra parte, se considera que el DOE de redireccionamiento 101 consta de una red de paso uniforme Λ_{101} , y que su normal está inclinada en un ángulo φ con respecto al eje óptico del dispositivo de generación de imágenes constituido por lentes L1 y L2. Se designa con Ψ el ángulo entre la dirección de incidencia de la fuente de referencia y el eje óptico del dispositivo de generación de imágenes constituido por lentes L1 y L2. Finalmente, φ_1 designa el ángulo en la salida del DOE de redireccionamiento 101, entre la distribución espacial de energía del pulso y el eje de propagación del pulso. Los ángulos φ , ψ y φ_1 están conectados por:

$$\tan(\varphi_1) = \frac{\sin(\psi - \varphi)}{\cos(\varphi)} + \tan(\varphi)$$

La optimización del solapamiento espacial de los pulsos al nivel del DOE de redireccionamiento implica:

$$30 \quad \frac{\sin(\psi - \varphi)}{\cos(\varphi)} + \tan(\varphi) = \gamma \tan(\theta_2)$$

Lo que da una primera relación entre los parámetros que dimensionan el sistema:

- el paso de las franjas elegidas al nivel de la cámara,
- la longitud de onda central de los pulsos λ_0 ,
- el aumento γ del dispositivo de generación de imágenes,

35 Por otra parte, el paso Λ_{101} de la red de redireccionamiento 101 se establece en función de la dirección de incidencia ψ , de la dirección de inclinación de la red y la longitud de onda λ_0 por:

$$\Lambda_{101} = \frac{\lambda_0}{\sin(\psi - \varphi) + \sin(\varphi)}$$

Finalmente, la optimización del solapamiento espacial de los pulsos al nivel de la cámara 3 se asegura por medio del sistema descrito en la figura 6 si se verifican las siguientes relaciones entre los parámetros del sistema:

$$40 \quad \begin{cases} \frac{\sin(\psi - \varphi)}{\cos(\varphi)} + \tan(\varphi) = \gamma \tan(\theta_2) \\ \Lambda_{101} = \frac{\lambda_0}{\sin(\psi - \varphi) + \sin(\varphi)} \end{cases}$$

Siendo:

$$\begin{cases} \frac{\sin(\psi - \varphi)}{\cos(\varphi)} + \tan(\varphi) = \gamma \tan(\theta_2) \\ \Lambda_{101} = \frac{\lambda_0}{\gamma \tan(\theta_2) \cos(\varphi)} \end{cases}$$

Ahora se considera la compensación de la dispersión cromática del DOE de redireccionamiento 101.

El paso Λ de las franjas de interferencia al nivel de la cámara 3 depende de la longitud de onda λ_0 y el ángulo θ_2 entre la referencia y los pulsos 1 al nivel de la cámara 3 según:

$$\Lambda = \frac{\lambda_0}{\text{sen}(\theta_2)}$$

- 5 Con θ_2 el ángulo del haz de referencia en la longitud de onda central λ_0 con los pulsos 1. Se considera un haz de referencia en una longitud de onda $\lambda_0 + \delta\lambda_0$. Este haz forma un ángulo $\theta_2 + \delta\theta_2$ con los pulsos 1. La condición de compensación de dispersión cromática impone que el paso de las franjas Λ sea independiente de la longitud de onda, siendo:

$$\delta\theta_2 = \frac{\delta\lambda_0}{\lambda_0} \tan(\theta_2)$$

- 10 Y, por lo tanto:

$$\frac{\partial\theta_2}{\partial\lambda} = \frac{\tan(\theta_2)}{\lambda_0}$$

Igualmente, para el DOE de redireccionamiento 101 hemos visto que el paso de la red de compensación Λ_{101} se establece en función de la dirección de incidencia ψ , de la dirección de inclinación de la red y la longitud de onda λ_0 por:

15
$$\Lambda_{101} = \frac{\lambda_0}{\text{sen}(\psi - \varphi) + \text{sen}(\varphi)}$$

El cálculo de la desviación angular $\delta\psi$ entre los vectores de onda difractados por el DOE de redireccionamiento 101 en las longitudes de onda λ_0 y en $\lambda_0 + \delta\lambda_0$ da:

$$\delta\psi = \frac{\delta\lambda}{\lambda_0} \left(\frac{\text{sen}(\psi)}{\cos(\varphi)} + \tan(\varphi) \right)$$

La dispersión angular del DOE de redireccionamiento 101 vale, por lo tanto:

20
$$\frac{\delta\psi}{\delta\lambda} = \frac{1}{\lambda_0} \left(\frac{\text{sen}(\psi)}{\cos(\varphi)} + \tan(\varphi) \right)$$

La condición de compensación cromática se deduce del cálculo del aumento angular del dispositivo de generación de imágenes descentrado de aumento transversal y tal como el del sistema descrito en la figura 6. Se obtiene, por lo tanto, la siguiente condición:

$$\frac{\delta\theta_2}{\delta\lambda} = \frac{1}{\gamma(1 + \tan^2(\theta_2))} \frac{\delta\psi}{\delta\lambda}$$

- 25 Finalmente, la compensación de la dispersión cromática del DOE de redireccionamiento 101 se asegura por medio del dispositivo descrito en la figura 6 si se verifican las siguientes relaciones:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Lambda_{101} = \frac{\lambda_0}{\gamma \tan(\theta_2) \cos(\varphi)} \\ \gamma \tan(\theta_2) (1 + \tan^2(\theta_2)) = \tan(\varphi) + \frac{\text{sen}(\psi)}{\cos(\varphi)} \end{array} \right.$$

Según las condiciones establecidas en las secciones anteriores, el redireccionamiento del pulso de referencia y la compensación de la dispersión cromática del DOE de redireccionamiento 101 se asegura por medio del dispositivo descrito en la figura 6 si se verifican las siguientes relaciones:

30
$$\Lambda_{101} = \frac{\lambda_0}{\text{sen}(\psi - \varphi) + \text{sen}(\varphi)}$$

$$\gamma \tan(\theta_2) (1 + \tan^2(\theta_2)) = \tan(\varphi) + \frac{\text{sen}(\psi)}{\cos(\varphi)}$$

$$\frac{\text{sen}(\psi - \varphi)}{\cos(\varphi)} + \tan(\varphi) = \gamma \tan(\theta_2)$$

- 35 Hasta ahora se ha considerado que los N pulsos que se han de caracterizar y el pulso de referencia tenían la misma longitud de onda central y que la dirección de propagación del pulso de referencia era diferente de la de los N pulsos. Se obtienen entonces franjas de interferencias que son espacialmente distinguibles entre sí: son franjas de

interferencias espaciales no ubicadas en el mismo lugar del detector, que es típicamente un detector de matricial.

El procedimiento de medición y los sistemas de medición y de bloqueo de fase y de sincronización también se aplican al caso de N pulsos 1_k de longitudes de onda diferentes entre sí y diferentes de la del pulso de referencia 2. Son o bien longitudes de onda centrales idénticas y moduladas en fase a frecuencias f_k distintas y no múltiples, o bien ligeramente desfasadas entre sí, una desviación de longitud de onda $\frac{\lambda_0^2}{c}F_k$ con λ_0 la longitud de onda central del pulso de referencia y c igual a $3,10^8$ m/s. El pulso de referencia también o bien se modula en fase en la frecuencia f_R , o bien se desfasa en longitud de onda de $\frac{\lambda_0^2}{c}F_R$. Los N pulsos y el pulso de referencia tienen, por ejemplo, la misma dirección de propagación, y están enfocados por un sistema de generación de imágenes en el mismo punto del detector donde se obtienen entonces franjas de interferencias temporales, o de pulsos, en frecuencias de combinaciones lineales de f_k y f_R . Estas franjas de interferencias temporales, o productos de pulsos, se graban por un detector 3 suficientemente rápido con respecto a la desviación de longitud de onda entre los pulsos (lo suficientemente rápido como para detectar los pulsos de cada uno de los pulsos con el pulso de referencia). Este detector es típicamente un fotodiodo. El montaje de redireccionamiento del pulso de referencia finalmente se vuelve superfluo, porque en este caso, los pulsos a sincronizar y el pulso de referencia pueden tener la misma dirección de propagación (no es necesario que el ángulo revele franjas espaciales) y, por lo tanto, frentes de propagación de energía paralelos. En el caso del uso de un fotodiodo, la identificación de los pulsos se realiza mediante un marcaje de frecuencia de los pulsos. La mezcla del pulso de referencia 2 con el pulso 1_k modulado o desfasado, produce franjas de interferencias temporales en frecuencias de combinaciones lineales de todas las $f_0...f_N$ y f_R , entre los cuales un componente en la frecuencia f_k-f_R propia al pulso 1_k . Para cada uno de los pulsos 1_k , k de 1 a N, una medición del contraste de las franjas temporales se obtiene, entonces, por demodulación de la señal del fotodiodo en la frecuencia f_k-f_R .

Los medios de cálculo de los desfases y de los retardos y los medios de control de los moduladores de fase y de las líneas de retardo pueden implementarse en particular a partir de un producto de programa informático, comprendiendo este programa informático instrucciones de código que permiten efectuar las etapas de cálculo y de control. Se graba en un soporte legible por ordenador conectado al detector 3. El soporte puede ser electrónico, magnético, óptico, electromagnético o ser un soporte de difusión de tipo infrarrojo. Tales soportes son, por ejemplo, memorias de semiconductor (Memoria de Acceso Aleatorio RAM, Memoria de Solo Lectura ROM), bandas, disquetes o discos magnéticos u ópticos (Disco compacto - Memoria de Solo Lectura (CD-ROM), Disco compacto - Lectura/Escritura (CD-R/W) y DVD).

Aunque se haya descrito la invención en relación con unos modos de realización particulares, es más que evidente que no se limita de ninguna manera a ellos y que comprende todos los equivalentes técnicos de los medios descritos, así como sus combinaciones si estas entran en el ámbito de la invención.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de medición del retardo entre N pulsos (1) de duración inferior a 100 picosegundos que se propagan en N canales, que consta de las siguientes etapas:

- 5 - emisión colimada de estos N pulsos (1_k) de la misma frecuencia de repetición,
- emisión de un pulso de referencia (2) de la misma frecuencia de repetición adecuado para producir franjas de interferencias con cada uno de los N pulsos,
- para cada uno de los N pulsos, detección por un detector (3) de la suma coherente de este pulso (1_k) con el pulso de referencia (2), produciendo esta suma dichas franjas de interferencias, siendo las franjas de interferencias que provienen de cada uno de los pulsos N distinguibles entre sí,

10 **caracterizado porque** el pulso de referencia (2) se emite con un retardo con respecto a los tiempos de llegada estimados de los N pulsos al detector (3), siendo este retardo ajustable dentro de un rango de retardos determinado, y porque el procedimiento consta, además, de las siguientes etapas:

- 15 - para un retardo en el rango de retardos, medición simultánea para los N pulsos de N contrastes de las franjas de interferencias, repitiéndose esta medición para otros P retardos en dicho rango, para obtener así otros P x N contrastes de franjas de interferencias,
- para cada uno de los N pulsos, un valor de retardo entre este pulso (1_k) y el pulso de referencia (2) viene dado por el retardo correspondiente al contraste máximo de entre los P contrastes.

20 2. Procedimiento de medición del retardo entre N pulsos según la reivindicación anterior, **caracterizado porque** los N pulsos (1_k) y el pulso de referencia (2) tienen la misma longitud de onda central, la dirección de propagación de los N pulsos (1_k) es diferente de la dirección de propagación del pulso de referencia (2) y **porque** las franjas de interferencias son franjas de interferencias espaciales ubicadas en N zonas (31) distintas del detector.

25 3. Procedimiento de medición del retardo entre N pulsos según la reivindicación 1, **caracterizado porque** las longitudes de onda centrales de los N pulsos (1_k) son diferentes entre sí y diferentes de la longitud de onda central del pulso de referencia (2) y **porque** las franjas de interferencias son franjas de interferencias temporales ubicadas en un mismo lugar del detector (3).

4. Sistema de medición del retardo entre N pulsos (1) de duración inferior a 100 picosegundos que se propagan en N canales, que consta de:

- 30 - N fuentes de pulso configuradas para que los N pulsos (1_k) se propaguen según direcciones de propagación paralelas,
- un emisor de un pulso de referencia (2) configurado para que el pulso de referencia se propague según una dirección de propagación inclinada con respecto a la dirección de propagación de los N pulsos, y asociado con una línea de retardo ajustable (5), teniendo los N pulsos y el pulso de referencia la misma longitud de onda central y la misma frecuencia de repetición,
- 35 - un detector matricial (3),
- un dispositivo de generación de imágenes configurado para formar en el detector (3), para cada uno de los N pulsos, una suma coherente de este pulso con el pulso de referencia, produciendo esta suma franjas de interferencias espaciales,

caracterizado porque consta, además, de:

- 40 - un dispositivo (100) de redireccionamiento de la dirección del plano de onda del pulso de referencia (2) con respecto a la dirección de propagación de los N pulsos (1_k) que comprende, sobre el trayecto del pulso de referencia (2):
 - un elemento (101) óptico difractivo de compensación de red periódica,
 - un montaje óptico con doble transformada de Fourier y un aumento predeterminado, provisto de dos lentes (L1, L2) y configurado para que el plano del detector (3) contenga el punto focal imagen del montaje óptico, y
 - 45 para que el plano del elemento (101) difractivo contenga el punto focal objeto,
- medios para implementar el procedimiento de medición según la reivindicación 1 o 2.

5. Sistema de medición del retardo entre N pulsos (1_k) de duración inferior a 100 picosegundos que se propagan en N canales, que consta de:

- 50 - N fuentes de pulso configuradas para que los N pulsos (1_k) se propaguen según direcciones de propagación paralelas,
- un emisor de un pulso de referencia (2) asociado con una línea de retardo ajustable (5), teniendo los N pulsos y el pulso de referencia la misma frecuencia de repetición, pero longitudes de onda centrales diferentes,
- un detector en forma de fotodiodo (3),

- un dispositivo de generación de imágenes configurado para formar en el fotodiodo (3), para cada uno de los N pulsos, una suma coherente de este pulso con el pulso de referencia, produciendo esta suma franjas de interferencias temporales,

5 **caracterizado porque** consta de medios para implementar el procedimiento de medición según la reivindicación 1 o 3.

6. Sistema de bloqueo de fase y de sincronización de N fuentes de pulso de duración inferior a 100 picosegundos que consta de:

- N fuentes de pulso de la misma frecuencia de repetición, respectivamente, provistas de moduladores de fase (6),
- un emisor de un pulso de referencia (2) de la misma frecuencia de repetición, equipado con una línea de retardo ajustable (5),
- un detector (3),
- un dispositivo de generación de imágenes configurado para formar en el detector, para cada uno de los N pulsos (1_k), una suma coherente de este pulso con el pulso de referencia, produciendo esta suma franjas de interferencias,
- un bucle de bloqueo de fase (bucle 2) que consta de:
 - 15 ◦ medios (14) de cálculo de los desfases entre cada fuente y el emisor del pulso de referencia,
 - medios (13) de control de los moduladores de fase (6) en función de los desfases,

caracterizado porque además consta de:

- una línea de retardo variable (7) asociada con cada fuente,
- un bucle de bloqueo de retardo (bucle 1) que consta de:
 - 20 ◦ un sistema de medición del retardo entre los N pulsos según una de las reivindicaciones 4 o 5,
 - medios (11) de control de las líneas de retardo de las N fuentes en función de los retardos medidos.

7. Un producto de programa informático, comprendiendo dicho programa informático instrucciones de código que permiten efectuar las etapas del procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, cuando dicho programa es ejecutado en un ordenador.

25

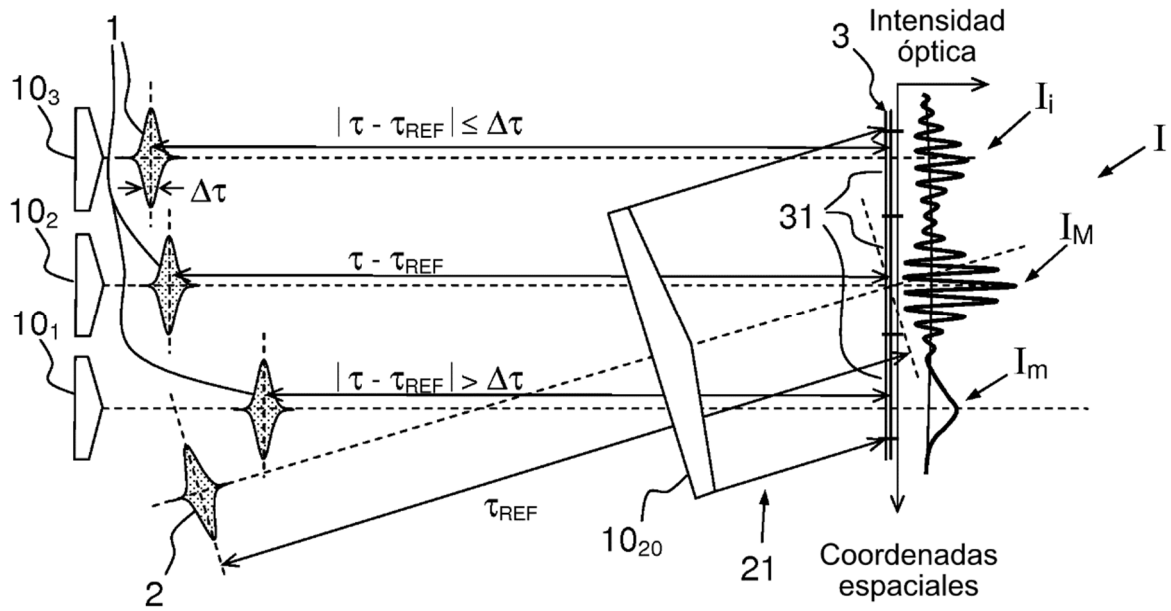


FIG.1

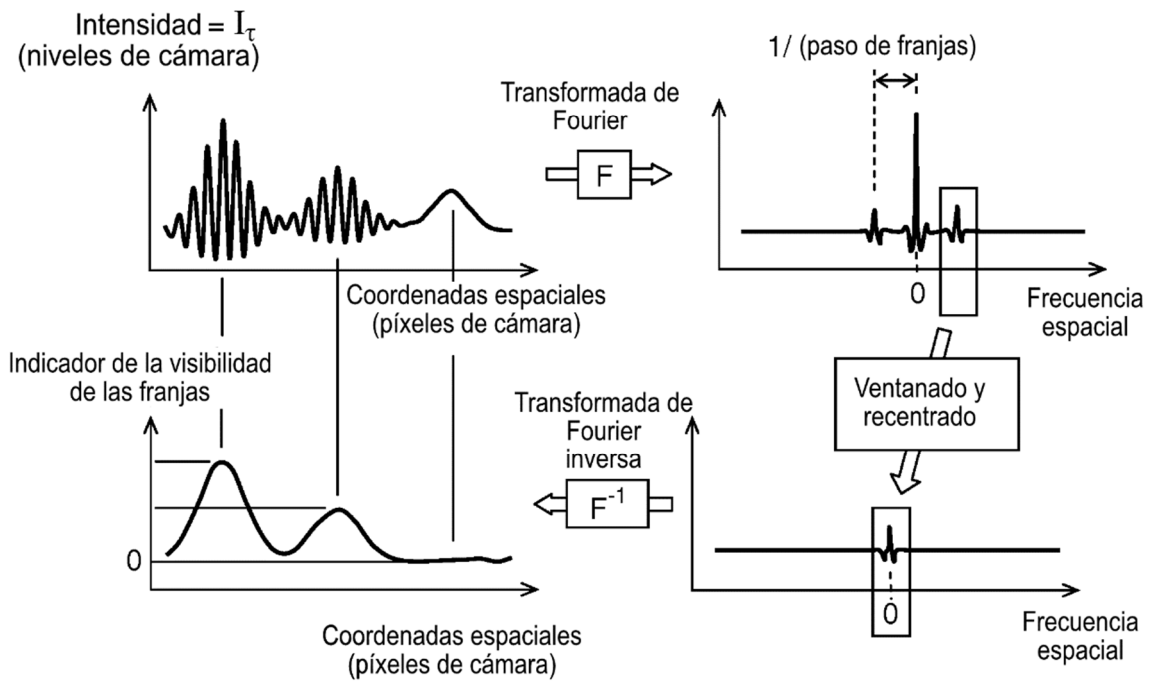


FIG.3

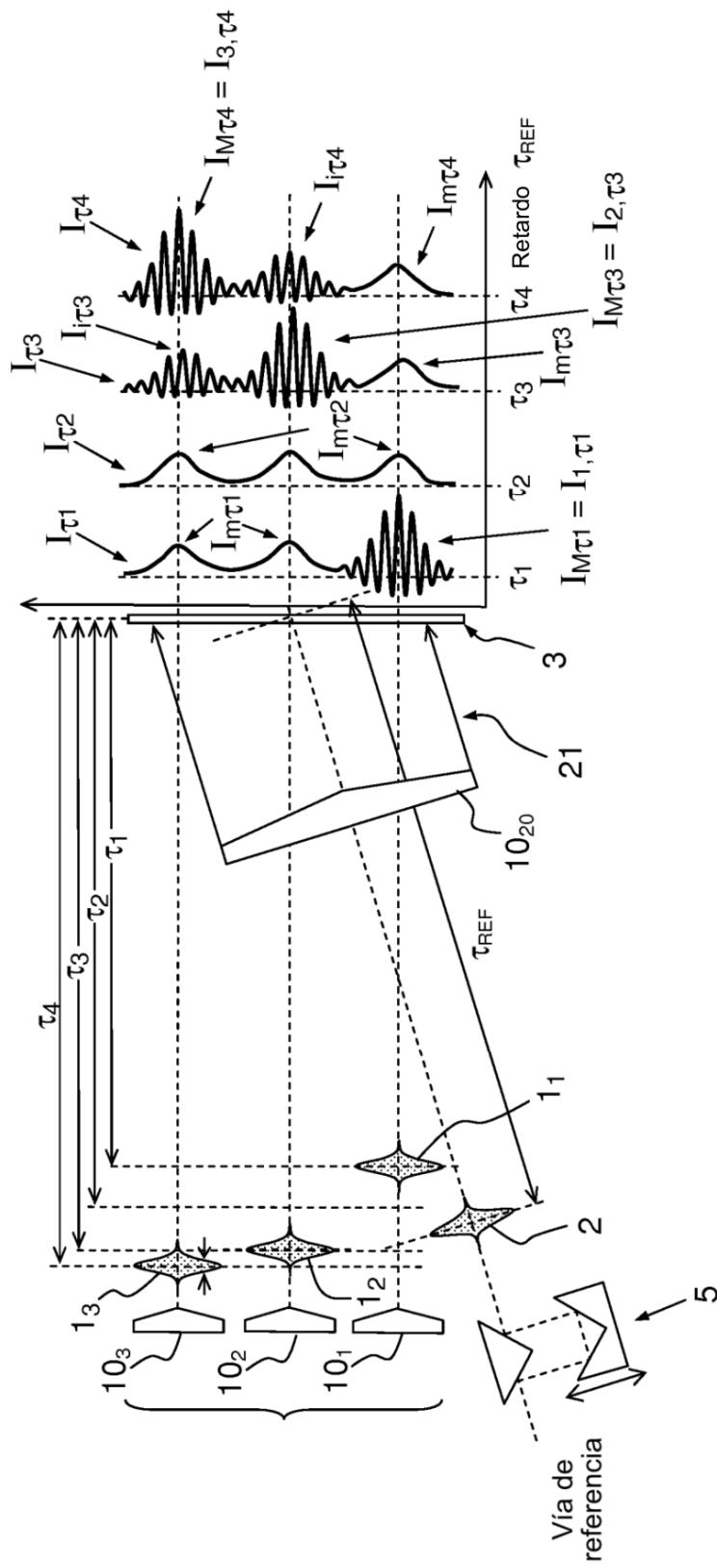
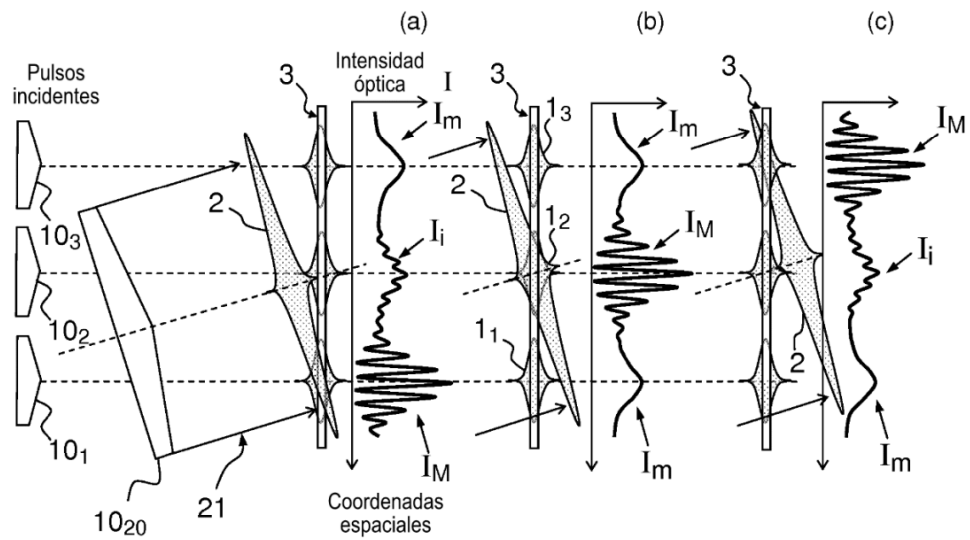
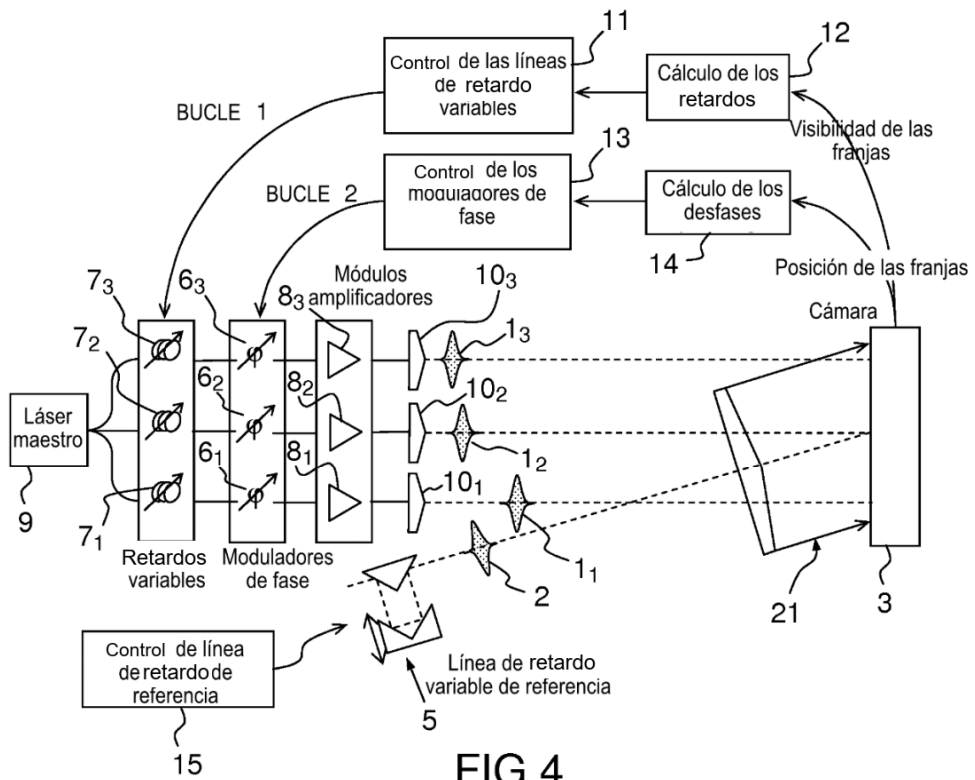


FIG.2



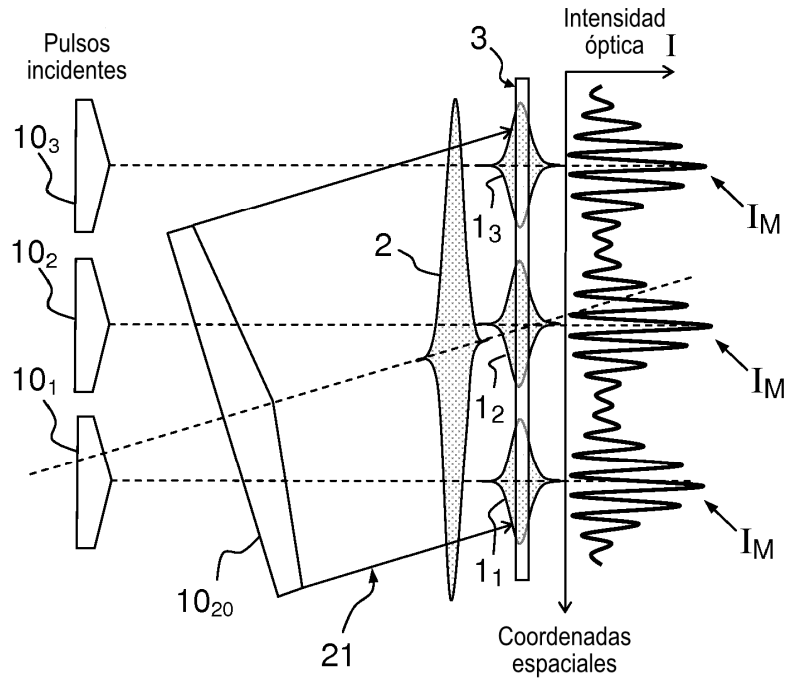


FIG.5b

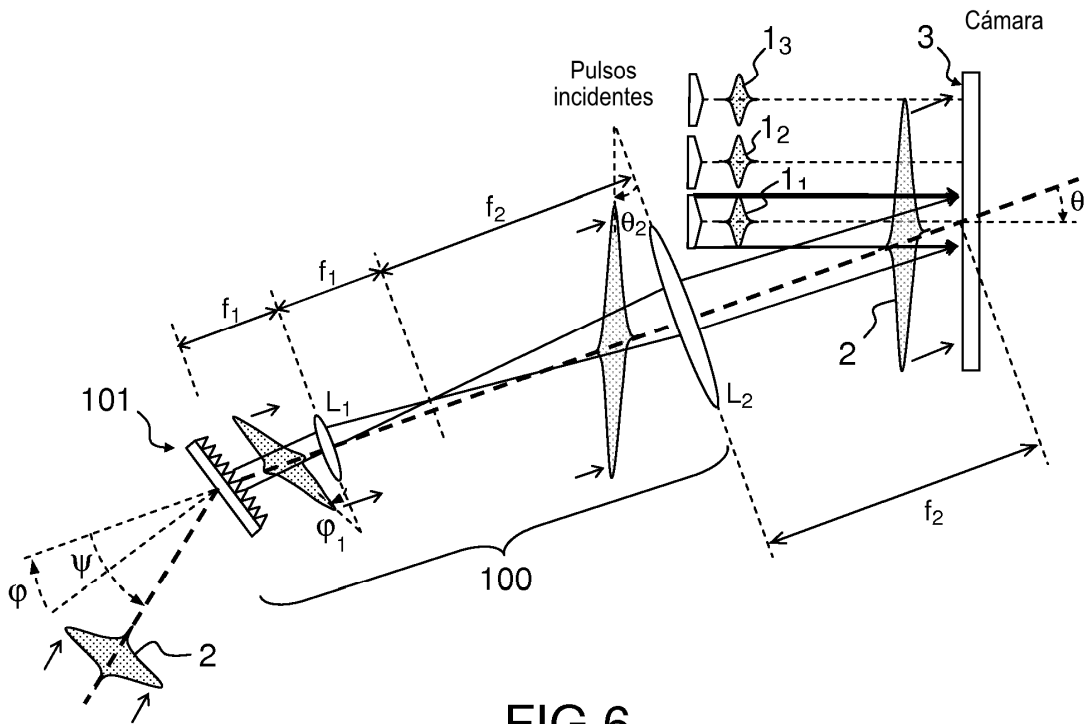


FIG.6