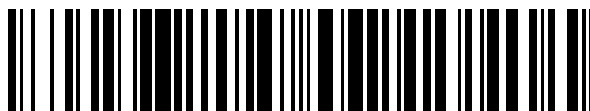


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 688 803**

51 Int. Cl.:

G01J 9/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **18.09.2015 PCT/EP2015/071519**

87 Fecha y número de publicación internacional: **24.03.2016 WO16042161**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.09.2015 E 15763638 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **29.08.2018 EP 3194916**

54 Título: **Analizador de superficie de onda y procedimiento para determinar las diferencias de pistón y de tilt entre varios haces luminosos**

30 Prioridad:

19.09.2014 FR 1458876

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

07.11.2018

73 Titular/es:

**ONERA (OFFICE NATIONAL D'ETUDES ET DE RECHERCHES AÉROSPATIALES) (100.0%)
Chemin de la Hunière
91120 Palaiseau, FR**

72 Inventor/es:

**BELLANGER, CINDY;
DEPREZ, MAXIME;
LOMBARD, LAURENT y
PRIMOT, JÉRÔME**

74 Agente/Representante:

VEIGA SERRANO, Mikel

ES 2 688 803 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

Analizador de superficie de onda y procedimiento para determinar las diferencias de pistón y de tilt entre varios haces luminosos

5

Sector de la técnica

La presente invención se refiere a un analizador de superficie de onda por interferencia. También se refiere a un procedimiento para determinar diferencias de pistón y de tilt que existen entre varios haces luminosos susceptibles de producir interferencias.

10

Estado de la técnica

En la presente descripción, se supone que las expresiones superficie de onda y frente de onda son sinónimas. Asimismo, los vocablos, figura de interferencia e interferograma, también se utilizan como sinónimos. El vocablo tilt se usa para designar la inclinación de una superficie de onda y se designa diferencia de pistón a la diferencia de avance medio que existe entre dos superficies de onda, midiéndose cada avance de frente de onda según su dirección de propagación.

15

La diferencia de pistón que está así definida se aplica sea cual sea la composición espectral de la radiación luminosa. Por esta razón, también puede denominarse diferencia de pistón absoluta. Pero para una radiación luminosa monocromática, a causa de la periodicidad espacial del campo electromagnético, solo una parte residual de la diferencia de pistón es accesible durante una caracterización estática, es decir, una caracterización que se realiza en un único instante. Esta parte residual se denomina diferencia de pistón residual y es igual a $[\text{Part_Dec}(\Delta p/\lambda)] \cdot \lambda$, donde λ designa la longitud de onda de la radiación monocromática, Δp es la diferencia de pistón absoluta y Part_Dec designa la parte decimal del número que está contenido entre los paréntesis. En particular, cuando unos haces luminosos monocromáticos que tienen la misma longitud de onda se combinan entre sí, solo las diferencias de pistón residuales que existen entre los haces, tomados de dos en dos, tienen importancia. Pero a la inversa, para pulsos de radiación luminosa o para una radiación luminosa policromática, solo la diferencia de pistón absoluta reviste interés.

20

25

30

Determinadas aplicaciones necesitan determinar con precisión las diferencias de pistón y de tilt que existen entre unas superficies de onda respectivas de varios haces luminosos.

35

Tal necesidad aparece concretamente durante el ajuste de un espejo de un telescopio de tipo Keck. Tal espejo está constituido por una yuxtaposición de segmentos de espejo distintos, que, con frecuencia, tienen cada uno un límite periférico hexagonal. De este modo, es posible formar un espejo completo de una decena de metros de diámetro, con unos segmentos que miden individualmente del orden de un metro de diámetro. Pero los segmentos de espejo deben ajustarse en altura e inclinación los unos con respecto a los otros, para que la superficie de onda de un haz luminoso que es reflejado por el espejo completo no presente escalones ni variaciones bruscas de pendiente que estarían provocadas por unas diferencias de altura e inclinación presentes entre los segmentos de espejo vecinos.

40

Esta necesidad surge también cuando los haces luminosos de varias fuentes láser se combinan de manera coherente para obtener un haz resultante de intensidad elevada. El número de fuentes láser individuales puede ser considerable cuando la intensidad luminosa que se desea en el haz de combinación es muy elevada. En el caso de fuentes láser monocromáticas, las superficies de onda individuales de los haces que provienen respectivamente de las fuentes láser y que corresponden a un mismo valor de fase, deben combinarse sin desfases. La tesis de B. Toulon, defendida el 20 de noviembre 2009 en la Université Paris XI Orsay y titulada "La mesure d'amplitudes complexes par interférométrie à décalage multi-latéral", propone, concretamente, un método que está basado en la interferometría de desfase cuadrilateral, para medir las diferencias de pistón y de tilt entre 64 fuentes láser. En el caso de fuentes láser pulsantes, la combinación de los pulsos individuales que son producidos respectivamente por las fuentes láser no es en sí misma más que un pulso cuya duración es similar a la de los pulsos individuales, si no existe ningún retardo significativo para algunos de los pulsos individuales con respecto a otros, ni diferencias entre sus direcciones de propagación. Para estas aplicaciones de combinación coherente de los haces luminosos monocromáticos o de pulsos luminosos, se utiliza un analizador de superficie de onda por interferencia, que comprende:

45

50

55

- una entrada óptica, destinada a recibir una radiación luminosa que tiene una superficie de onda inicial que se extiende a través de esta entrada óptica;

60

- un divisor de radiación, dispuesto para producir, a partir de haces luminosos que provienen respectivamente de zonas reducidas en el interior de la entrada óptica, varios sub-haces para cada haz luminoso, reproduciendo cada sub-haz unas características de la superficie de onda inicial existente en la zona reducida correspondiente;

65

- unos caminos ópticos, dispuestos para superponer unos sub-haces que proceden respectivamente de diferentes zonas reducidas en el interior de la entrada óptica y que pasan, cada uno, por un camino óptico diferente;

- al menos un detector de imagen, dispuesto para adquirir unas figuras de interferencia que son producidas por los sub-haces superpuestos; y
- 5 - un módulo de tratamiento, adaptado para determinar, a partir de las figuras de interferencia, las diferencias de pistón y de tilt que existen para la superficie de onda inicial entre las zonas reducidas de las que provienen los sub-haces superpuestos.

10 El analizador de superficie de onda se utiliza entonces para caracterizar la superficie de onda global que resulta de las superficies de onda individuales, producidas por separado por las fuentes láser.

15 En el dispositivo de B. Toulon, el divisor de radiación es una red de difracción que produce cuatro réplicas de la superficie de onda inicial, correspondientes a las combinaciones de dos órdenes de difracción, cada una igual a +1 o a -1. El divisor de radiación produce, por tanto, cuatro sub-haces a partir de cada haz luminoso. Las zonas reducidas en el interior de la entrada óptica corresponden a las secciones de los haces luminosos individuales que provienen de unas fuentes láser yuxtapuestas. Estas están equipadas con microlentes de salida, para que los haces individuales tengan, cada uno, una estructura de haz paralela o colimatada. El detector de imagen adquiere entonces una combinación de interferogramas de cuatro haces, a partir de la cual pueden determinarse las diferencias de pistón y de tilt que existen entre dos fuentes láser que son vecinas en la entrada óptica. En función de la orientación de la red de difracción con respecto al patrón cuadrado de distribución de las fuentes láser en la entrada óptica, se obtienen dos modos de interferencia diferentes. Pero en estos dos modos, todos los interferogramas presentan una estructura compleja, con unas zonas de solapamiento de diferentes categorías. Por esta razón, la determinación de las diferencias de pistón y de tilt a partir de cualquiera de los interferogramas es una tarea difícil.

25 El artículo de C. Bellanger et al., que se titula "Collective phase measurement of an array of fiber lasers by quadriwave lateral shearing interferometry for coherent beam combining", Optics Letters, 1 de diciembre de 2010, vol. 35, N.º 23, pp. 3931-3933, se refiere a un interferómetro de desfase cuadrilateral del mismo tipo.

30 **Objeto de la invención**

A partir de esta situación, un objetivo de la presente invención es poder determinar de manera más simple las diferencias de pistón y de tilt que existen entre unas superficies de onda individuales de haces luminosos que son susceptibles de producir interferencias.

35 Para ello, la invención propone un analizador de superficie de onda tal como el definido en la reivindicación 1. Este analizador de superficie de onda comprende una máscara adaptada para seleccionar, por medio de las aberturas de esta máscara, unas zonas de interés disjuntas en el interior de la entrada óptica como zonas reducidas, ocultando al menos en parte la superficie de onda inicial fuera de estas zonas de interés u ocultando al menos en parte unos haces luminosos que no provienen de las zonas de interés. Las zonas de interés pueden así determinarse mediante las aberturas de la máscara, bien directamente, si la máscara está situada cerca de la entrada óptica del analizador de superficie de onda, bien por conjugación óptica a través de los componentes del analizador. Gracias a una máscara de este tipo, unas porciones separadas del detector de imagen están dedicadas respectivamente a unos pares de zonas de interés que son vecinas en el interior de la entrada óptica, sea cual sea la prolongación de la superficie de onda inicial y de la intensidad luminosa entre dos zonas de interés vecinas. Cada interferograma solo comprende, entonces, unos patrones de interferencia de dos haces, en el interior de una porción del detector de imagen que puede estar separada de las de otros interferogramas. La determinación de las diferencias de pistón y de tilt a partir de estos patrones de interferencia de dos haces es simple y puede realizarse fácil y rápidamente. En particular, no es necesario calcular las transformadas de Fourier de los interferogramas. La máscara y el divisor de radiación de un analizador de superficie de onda según la invención se forman juntos mediante un modulador espacial de intensidad o SLM por sus siglas en inglés de "Spatial Light Modulator". Esta configuración es ventajosa por su simplicidad y su capacidad de adaptarse a demanda. Concretamente, está particularmente adaptada cuando el divisor de radiación comprende una red de difracción.

55 En unos modos de realización preferentes de la invención, el divisor de radiación puede comprender una red de difracción. En efecto, cuando una red de difracción produce dos sub-haces para unos órdenes de difracción diferentes, los fotones de cada sub-haz en régimen de iluminación por pulsos, están contenidos en un tramo espacial de progresión por propagación, que es paralelo a la red de difracción. Para un mismo pulso de iluminación, los tramos espaciales de todos los sub-haces están entonces alineados los unos con los otros, en paralelo a la red de difracción. Una zona de solapamiento en la que se produce la interferencia entre dos de los sub-haces, puede ser entonces más grande. De ello resulta una precisión, que puede ser superior, para los valores de las diferencias de pistón y de tilt que se deducen de las figuras de interferencia.

65 De manera más particular, el analizador del frente de onda puede disponerse de manera que los sub-haces que son producidos por la red de difracción para cada haz, correspondan a los valores +1 y -1 para uno o varios números de orden de difracción. La máscara oculta entonces los sub-haces que provienen de las zonas de interés con unos

valores que son nulos para todos los números de orden de difracción.

Ventajosamente, la máscara y el detector de imagen pueden conjugarse ópticamente. En este caso, las porciones separadas del detector de imagen, en las que se producen las interferencias, corresponden a unos pares de aberturas de la máscara. Las imágenes de dos aberturas de un mismo par están superpuestas la una a la otra sobre el detector de imagen por el divisor de radiación.

Según un perfeccionamiento de la invención, el analizador de superficie de onda puede comprender, asimismo, un sistema óptico afocal que se dispone sobre una trayectoria de radiación entre la entrada óptica y el detector de imagen, de manera a transformar, con respecto a unas figuras de interferencia que son adquiridas por el detector de imagen, la superficie de onda inicial por homotecia de espacio efectivo en el interior de la entrada óptica. La elección del engrosamiento del sistema afocal permite entonces ajustar por separado la sensibilidad a la diferencia de tilt entre unas zonas de interés vecinas, con respecto a la sensibilidad a la diferencia de pistón.

Por ejemplo, la máscara puede estar adaptada para seleccionar las zonas de interés según una red hexagonal de distribución de estas zonas de interés en el interior de la entrada óptica. Entonces, la red de difracción que forma el divisor de radiación es bidimensional de patrón hexagonal y está orientada de manera que unos ejes de simetría de la red de difracción estén a 90° de los ejes de simetría de la máscara, en torno a un eje óptico del analizador de superficie de onda. Tal configuración hexagonal está adaptada a la forma de los segmentos de espejo de un telescopio de tipo Keck, así como a una disposición compacta de las fuentes láser de fibra.

Preferentemente, la máscara puede ser de un tipo tal que dos zonas de interés cualesquiera que sean vecinas tengan una misma forma y un mismo tamaño y estén separadas por una zona de ocultamiento de la máscara que está situada entre estas dos zonas de interés vecinas y esta zona de ocultamiento sea lo bastante grande como para contener una forma que sea idéntica a la de cada una de las dos zonas de interés vecinas y que tenga el tamaño de las mismas. Entonces, la porción de superficie del detector en la que está formada la figura de interferencia que corresponde a las dos zonas de interés, está rodeada por un anillo de iluminación nula. Dicho de otro modo, las porciones de la superficie del detector que están ocupadas por los interferogramas están separadas las unas de las otras, sin solapamientos, lo que facilita una detección y un análisis automáticos de cada interferograma en la imagen entera que es adquirida por el detector.

Gracias a la invención, la determinación de los valores de diferencias de pistón y de tilt es simple y puede efectuarse de manera rápida y económica. Por ejemplo, el módulo de tratamiento puede comprender una librería de figuras de referencia grabadas, que están constituidas, cada una, por franjas de interferencia rectilíneas y paralelas, estando cada figura de referencia asociada a un valor de diferencia de pistón y a un valor de diferencia de tilt. Los valores de diferencia de pistón y de tilt que existen entre dos zonas de interés vecinas se deducen entonces buscando una coincidencia máxima entre la figura de interferencia correspondiente a estas dos zonas de interés y una de las figuras de referencia grabadas. Tal búsqueda de coincidencia máxima puede comprender la aplicación de una corrección de escala de iluminación o de intensidad luminosa, en la figura de interferencia y/o en cada figura de referencia. A continuación, se evalúa una puntuación de coincidencia y se compara con los valores de puntuación obtenidos para la misma figura de interferencia, pero comparándola con otras figuras de referencia de la librería.

De manera general, el módulo de tratamiento puede adaptarse para deducir un valor para la diferencia de pistón que existe entre dos zonas de interés vecinas, a partir de un desfase transversal de franjas que existe en la figura de interferencia correspondiente a estas dos zonas de interés. Además, el valor de la diferencia de tilt que existe entre las dos zonas de interés puede deducirse a partir de un paso entre franjas que existe en la figura de interferencia.

Por otra parte, un analizador de superficie de onda conforme a la invención puede comprender, además, un sistema de separación espectral que está adaptado para separar entre sí al menos dos componentes espectrales de la radiación luminosa recibida por la entrada óptica. El analizador de superficie de onda está entonces adaptado para adquirir por separado para cada componente espectral, las figuras de interferencia que son producidas por los sub-haces superpuestos y para determinar las diferencias de pistón y de tilt para cada componente espectral, a partir de las figuras de interferencia que se hayan adquirido para esta componente espectral. Por ejemplo, el sistema de separación espectral puede ser de tipo separación espacial, para dirigir las componentes espectrales hacia las respectivas vías ópticas del analizador de superficie de onda que están separadas. Como alternativa, el sistema de separación espectral puede ser de desfase temporal variable en función de la longitud de onda y las figuras de interferencia que están formadas por unas componentes espectrales diferentes se adquieren en momentos diferentes.

Un segundo aspecto de la invención propone utilizar un analizador de superficie de onda que es conforme al primer aspecto, para determinar las diferencias de pistón y de tilt que existen entre unas superficies de onda individuales de haces luminosos susceptibles de producir interferencias. Un procedimiento de la invención comprende para este fin:

- suministrar el analizador de superficie de onda por interferencia;
- dirigir cada haz luminoso sobre una zona de interés diferente, utilizando unas zonas de interés que son vecinas en la entrada óptica del analizador de superficie de onda; y

- activar el detector de imagen y el módulo de tratamiento para determinar las diferencias de pistón y de tilt que existen entre unas superficies de onda individuales cuyos haces luminosos se han dirigido sobre unas zonas de interés vecinas.

5 Gracias a la invención, las diferencias de pistón y tilt que existen entre los haces luminosos pueden determinarse sin utilizar ninguna onda de referencia adicional. El procedimiento es, por lo tanto, simple de implementar por este motivo, sin necesidad de componentes ópticos que estén dedicados a la generación e introducción de tal onda de referencia.

10 Se puede utilizar un procedimiento de este tipo para ajustar los segmentos de un espejo de telescopio de tipo Keck. En este caso, los haces luminosos los produce una fuente de radiación que se dispone para que la radiación sea reflejada simultáneamente por los segmentos yuxtapuestos del espejo. Para cada segmento del espejo, una parte de la radiación que es reflejada por este segmento forma entonces el haz luminoso que se dirige sobre una de las zonas de interés de la entrada óptica. Para esta otra aplicación, el procedimiento comprende, asimismo, el cálculo de las diferencias de altura y de las diferencias de inclinación que existen entre dos segmentos vecinos del espejo. Estas diferencias de altura y de inclinación se calculan a partir de los valores de las diferencias de pistón y de tilt que se han determinado para los haces luminosos correspondientes.

20 También se puede utilizar un procedimiento conforme al segundo aspecto de la invención para ajustar en fase unos haces luminosos que son producidos respectivamente por unas fuentes láser separadas, concretamente, unas fuentes láser de fibra. Cuando las fuentes láser son de tipo láser de pulsos, ventajosamente, el divisor de radiación comprende una red de difracción. Para esta otra aplicación, el procedimiento comprende, además, el cálculo de las diferencias temporales y de las diferencias de dirección de propagación que existen entre unos pulsos de radiación producidos por dos fuentes láser diferentes, cuyos haces se han dirigido sobre dos zonas de interés vecinas. Estas diferencias temporales y de dirección de propagación se calculan a partir de los valores de las diferencias de pistón y de tilt que se han determinado para los haces.

Descripción de las figuras

30 Otras particularidades y ventajas de la presente invención se pondrán de manifiesto en la siguiente descripción de ejemplos de realización no limitativos, con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

- la figura 1 es un diagrama esquemático en una sola dimensión espacial, que muestra la función de una máscara introducida por la presente invención;
- 35 - las figuras 2a y 2b representan respectivamente una máscara y una imagen correspondiente, tal como la producida por un analizador de superficie de onda conforme a la invención;
- la figura 3 es un esquema óptico de un analizador de superficie de onda, no cubierto por las reivindicaciones, que se utiliza para ajustar en fase los haces luminosos producidos por varias fuentes láser; y
- las figuras 4a y 4b son unos esquemas ópticos respectivos de otros dos analizadores de superficie de onda que se utilizan para ajustar unos segmentos de espejo de un telescopio de tipo Keck.

45 La figura 4a representa un analizador no cubierto por las reivindicaciones, mientras que la figura 4b representa un analizador conforme a la invención. Por razones de claridad, las dimensiones de los elementos que están representados en estas figuras no corresponden ni a unas dimensiones reales ni a relaciones de dimensiones reales. Además, las referencias idénticas que están indicadas en diferentes figuras designan elementos idénticos o que tienen unas funciones idénticas.

Descripción detallada de la invención

50 En la figura 1, las referencias indicadas tienen los siguientes significados:

Δ	eje óptico del analizador de superficie de onda
10	entrada óptica del analizador de superficie de onda
11	máscara de aberturas separadas
12	red de difracción
13	superficie de un detector de imagen
14	módulo de tratamiento, denotado CPU
F_0	haz luminoso inicial
F_1, \dots, F_4	haces seleccionados en el interior del haz inicial F_0
F'_1, F''_1	sub-haces procedentes del haz F_1
F'_2, F''_2	sub-haces procedentes del haz F_2
F'_3, F''_3	sub-haces procedentes del haz F_3
F'_4, F''_4	sub-haces procedentes del haz F_4
S_0	superficie de onda inicial
$Z1, \dots, Z14$	zonas de interés
P_{12}, P_{23}, P_{34}	porciones de la superficie del detector de imagen

p pistón existente en una zona de la superficie de onda inicial S_0
 i tilt existente en una zona de la superficie de onda inicial S_0

La entrada óptica 10, la máscara 11, la red de difracción 12 y el detector de imagen 13 se disponen en perpendicular al eje óptico Δ . La máscara 11 se dispone en la entrada óptica 10, o detrás de esta, a lo largo del eje óptico Δ . Las aberturas de la máscara 11, que están separadas entre sí, determinan una pluralidad de zonas en la entrada óptica 5 10, denominadas zonas de interés y denotadas $Z_{1,\dots}, Z_{14}$. En un primer momento, se puede suponer que el haz inicial F_0 es monocromático y se propaga sustancialmente en paralelo al eje óptico Δ . Su superficie de onda inicial S_0 a través de la entrada óptica 10, puede presentar sustancialmente cualquier forma, con unas variaciones de pistón en paralelo al eje óptico Δ y unas variaciones de tilt con respecto a un plano que es perpendicular al eje óptico Δ . Las aberturas de la máscara 11 solo dejan pasar, por tanto, unos haces separados F_1, \dots, F_4 que proceden del haz inicial F_0 . Los haces F_1, \dots, F_4 reproducen unas porciones de la superficie de onda inicial S_0 , tales como las contenidas respectivamente en las aberturas de la máscara 11.

En el caso simple de una sola dimensión de la figura 1, la red de difracción 12 produce a partir de cada uno de los haces F_1, \dots, F_4 , dos sub-haces que están desviados simétricamente y que corresponden respectivamente a los valores +1 y -1 de un número de orden de difracción. En la figura 1, los sub-haces que están sombreados en un sentido corresponden al orden de difracción + 1 y los sombreados en el otro sentido corresponden al orden de difracción -1. Según la invención, la superficie del detector de imagen 13, denominada simplemente detector de imagen 13 en lo sucesivo, está situada de manera que reciba en unas mismas porciones de esta, a la vez un sub-haz de orden de difracción +1 y otro sub-haz de orden de difracción -1, que proceden de dos haces determinados por unas aberturas vecinas de la máscara 11. De este modo, la porción P_{12} del detector de imagen 13 recibe en superposición los sub-haces F''_1 y F'_2 . Asimismo, la porción de detector P_{23} recibe en superposición los sub-haces F''_2 y F'_3 y la porción P_{34} recibe los sub-haces F''_3 y F'_4 . La máscara 11 impide que las porciones de detector P_{12} , P_{23} y P_{34} reciban las partes del haz inicial F_0 que son intermedias entre las zonas de interés Z_{11} y Z_{12} , Z_{12} y Z_{13} , Z_{13} y Z_{14} . Los órdenes de difracción superiores a +1 o inferiores a -1 pueden despreciarse. En la práctica, las intensidades luminosas de estos órdenes pueden anularse o reducirse en gran medida seleccionando un patrón elemental adaptado para la red de difracción 12. En cada una de las porciones del detector 13, los dos sub-haces que están superpuestos producen una figura de interferencia. Al equiparar cada porción de la superficie de onda inicial S_0 que está contenida en una de las zonas de interés Z_{11}, \dots, Z_{14} a una porción de plano posiblemente desfasada a lo largo de del eje óptico Δ y posiblemente inclinada, entonces la figura de interferencia en cada porción de detector P_{12} , P_{23} , P_{34} está constituida por franjas paralelas. Entonces, para un haz inicial F_0 que es monocromático y cuando la diferencia de tilt es nula para una de estas figuras de interferencia, el desfase de la franja central con respecto a la intersección de los ejes ópticos de los sub-haces es igual a $\Delta p \cdot F / \lambda$, donde λ es la longitud de onda, Δp es la diferencia de pistón absoluta que existe entre las porciones de la superficie de onda inicial S_0 de la que proceden los dos sub-haces que producen la interferencia en la porción de detector implicada y F es el paso entre franjas de la figura de interferencia. Pero en la práctica, solo la diferencia de pistón residual puede medirse debido a la naturaleza monocromática del haz inicial F_0 .

Para los dos sub-haces que producen la figura de interferencia en una de las porciones del detector P_{12} , P_{23} , P_{34} , la diferencia de tilt Δi es el ángulo en el ápice del prisma que está formado por los planos tangentes a las dos porciones de la superficie de onda inicial S_0 que están contenidas en las zonas de interés implicadas. Esta diferencia de tilt Δi se combina entonces con la diferencia de inclinación de los sub-haces que forman la interferencia en la porción de detector. Esta combinación angular no es simple salvo cuando la dirección del ápice del prisma de diferencia de tilt es perpendicular al plano que contiene las direcciones de propagación de los dos sub-haces. La combinación es entonces una adición de ángulos y la variación de la frecuencia espacial de las franjas de interferencia, medida según el rastro en la superficie del detector, del plano que contiene las direcciones de propagación de los sub-haces, es entonces igual a la diferencia de tilt Δi dividida por la longitud de onda. En el caso de una orientación cualquiera de la dirección del ápice del prisma de diferencia de tilt con respecto al plano de las direcciones de propagación de los dos sub-haces, el experto en la materia utilizará las fórmulas matemáticas indicadas en la tesis de B. Toulon que se ha mencionado antes. De este modo, las diferencias de tilt y sus orientaciones pueden deducirse de las figuras de interferencia de dos ondas que son adquiridas por el detector de imagen. El conjunto de las figuras de interferencia provee, además, una redundancia que puede utilizarse para aumentar la precisión con la que se determinan las diferencias de pistón, las diferencias de tilt y las orientaciones de las diferencias de tilt.

Las figuras 2a y 2b muestran una implementación en dos dimensiones del funcionamiento de la invención que se acaba de describir. La figura 2a es una vista de frente de la máscara 11, con las zonas de interés distintas a Z_{11}, \dots, Z_{14} que están denotadas de manera genérica Z_I . Las zonas de interés Z_I están, por tanto, determinadas por unas aberturas practicadas en una placa opaca que forma la máscara 11. Cuando la máscara 11 se sitúa en la entrada óptica 10, las zonas de interés coinciden con las aberturas de la máscara. Dos zonas de interés Z_I que son vecinas están separadas la una de la otra por un segmento intermedio de la máscara que es opaco. Este segmento intermedio tiene una anchura que es al menos igual al tamaño de cada una de las dos zonas de interés vecinas. De manera preferente, las zonas de interés Z_I están distribuidas según una red hexagonal regular, en la que A_{11} es uno de los ejes de simetría o ejes de alineación principal de las zonas de interés en la simetría de orden seis de la máscara 11. Las zonas de interés Z_I pueden ser circulares, con un tamaño de zona que es suficiente para que la difracción luminosa que es producida por estas zonas de interés sea despreciable. Por ejemplo, las zonas de interés

ZI pueden tener, cada una, un diámetro de 50 μm (micrómetros) y los centros geométricos de dos zonas de interés vecinas pueden estar a una distancia de 110 μm . En este caso, la red de difracción 12 también es hexagonal regular, pero con uno de sus ejes de simetría A_{12} que es perpendicular al eje A_{11} , cuando los dos ejes A_{11} y A_{12} están proyectados en un mismo plano perpendicular al eje óptico Δ .

5 La figura 2b muestra la imagen completa que es adquirida por el detector 13 para la máscara 11 de la figura 2a, con las porciones de la superficie del detector que están dedicadas por separado a los pares de zonas de interés ZI vecinas. Estas porciones de la superficie del detector 13 están designadas genéricamente con una P, además de las porciones P_{12} , P_{23} y P_{34} que se han presentado individualmente con referencia a la figura 1. Para algunas de las porciones P, las figuras de interferencia formadas por franjas paralelas también se han representado a modo ilustrativo. Evidentemente, unas figuras de interferencia análogas están presentes en todas las porciones P. Se pueden despreciar interferencias parásitas de más de dos ondas, así como variaciones de tilt de la superficie de onda inicial S_0 en el interior de cada zona de interés ZI.

15 El análisis de la imagen que es adquirida por el detector 13 puede iniciarse con una detección automática de las porciones P que contienen los interferogramas. Esta detección automática se ve facilitada por el hecho de que las porciones P sean disjuntas, es decir, sin solapamiento entre porciones vecinas y con segmentos intermedios que no reciben ningún flujo luminoso entre dos porciones P vecinas. La detección automática de las porciones P también se ve facilitada por un conocimiento previo de las posiciones y de las formas de las porciones P en la superficie del detector 13.

25 El tratamiento individual de cada interferograma se puede efectuar de múltiples maneras, para obtener los valores de las diferencias de pistón y de tilt. Un método que es particularmente rápido y que precisa poca potencia de cálculo, consiste en comparar cada interferograma contenido en una porción P con unas figuras de interferencia de dos ondas planas que se han grabado inicialmente y para las que los valores de las diferencias de pistón y de tilt son conocidos. Tal método procede, por tanto, mediante la comparación de los contenidos de imágenes y es muy eficaz para unas imágenes que están formadas por franjas paralelas. Además, tal método es robusto con respecto a la eventual presencia de artefactos en las imágenes, tales como unas interferencias parásitas de más de dos ondas, unas variaciones del tilt en el interior de cada zona de interés y unos efectos de difracción parásitos. De manera conocida, los métodos de comparación de imágenes a menudo comprenden una etapa inicial durante la cual los valores medios y las desviaciones típicas de las iluminaciones de las imágenes se vuelven a llevar a unos valores idénticos para las dos imágenes que están en curso de comparación. Para ello, una transformación de escala afín puede aplicarse a los valores de iluminación de al menos una de las dos imágenes que se están comparando. Luego se calcula una puntuación de coincidencia para las dos imágenes. Por tanto, inicialmente se proporciona una librería de figuras de interferencia de dos ondas, que está indexada por unos valores de diferencia de pistón y de diferencia de tilt y posiblemente también por un valor de orientación angular de la diferencia de tilt. Tales figuras de interferencia pregrabadas se han denominado figuras de referencia en la descripción general de la invención. Para cada interferograma de la imagen completa que es adquirida por el detector 13, los valores de diferencias de pistón y de tilt y eventualmente también de la orientación angular de la diferencia de tilt, son por tanto los de la figura de referencia contenida en la librería, para la que la puntuación de coincidencia sea la más elevada. Como alternativa, la orientación angular de la diferencia de tilt puede deducirse de la comparación de cada interferograma con cada figura de referencia cuando se aplica una rotación variable en el interferograma o en la figura de referencia.

45 La figura 3 muestra una utilización de un analizador de superficie de onda no cubierto por las reivindicaciones, para realizar una combinación coherente de haces luminosos que son producidos por un conjunto de fuentes láser de fibra 1000. Las fuentes láser 1000 son capaces de interferir entre sí y se disponen en paralelo de manera que las secciones de salida de las fibras ópticas estén todas dispuestas sustancialmente en un mismo plano perpendicular al eje óptico Δ . Cada fibra óptica está provista de una lente de salida, para que el haz luminoso que procede de esta fibra óptica sea colimatado. El número de fibras ópticas que producen así unos haces láser individuales no está limitado y puede, por ejemplo, ser del orden de varias centenas de millares. Todos los haces individuales de las fuentes láser 1000 se llevan a la entrada óptica 10, sustancialmente en paralelo al eje óptico Δ . La máscara 11 tiene al menos tantas aberturas como número de fuentes láser 1000 hay. Una sola fibra óptica se dirige así a una abertura de la máscara 11 que le está dedicada y resulta ventajoso utilizar unas aberturas que sean vecinas y estén tan agrupadas como sea posible. La distribución transversal de las fibras ópticas puede ser según una red hexagonal, de manera que se puedan utilizar una máscara 11 y una red 12, tales como las descritas con referencia a las figuras 2a y 2b. De este modo, los haces láser que proceden de las fibras ópticas corresponden individualmente a los haces luminosos F_1, \dots, F_4, \dots que se han introducido previamente. Las referencias 101 y 102 designan dos lentes convergentes, con sus distancias focales respectivas denotadas f_1 y f_2 . Están dispuestas para formar juntas un sistema óptico afocal que está designado con la referencia 100. Dicho de otro modo, el foco imagen de la lente 101 se superpone al foco objeto de la lente 102. Las dos lentes 101 y 102 tienen unas extensiones transversales suficientes para contener todos los haces procedentes de las fibras ópticas. Además, la superficie del detector de imagen 13 está colocada a lo largo del eje óptico Δ para conjugarse ópticamente con la máscara 11 a través de las dos lentes 101 y 102. Por ejemplo, la máscara 11 puede situarse al nivel del foco objeto de la lente 101 y la superficie del detector de imagen 13 puede situarse al nivel del foco imagen de la lente 102. La red de difracción 12 puede insertarse entre la lente 102 y la superficie del detector de imagen 13. Su posición exacta a lo largo del eje óptico Δ se ajusta para que las porciones P del detector 13 sean cada una la superposición de las imágenes de dos

aberturas vecinas de la máscara 11. En esta configuración del analizador de superficie de onda, las porciones P forman una red hexagonal con lagunas, cuyas lagunas corresponden una por una a los emplazamientos que tendrían las imágenes de las aberturas de la máscara 11 en ausencia de la red 12. Las figuras 2a y 2b muestran esta correspondencia. Un analizador de superficie de onda de este tipo permite, por tanto, determinar las diferencias de pistón y las diferencias de inclinación que están presentes entre fibras ópticas vecinas, cuando todas las fuentes láser de fibra 1000 son monocromáticas con una misma longitud de onda común.

Además, el engrosamiento del sistema óptico afocal 100 permite ajustar la sensibilidad del analizador de superficie de onda con respecto a las diferencias de tilt, sin modificar su sensibilidad a las diferencias de pistón. Esta variación de la sensibilidad a las diferencias de tilt es resultado del teorema de Gouy. La elección de un valor pequeño para el engrosamiento del sistema óptico afocal 100, concretamente, de un valor de engrosamiento inferior a la unidad, permite obtener un analizador de superficie de onda que está mejor adaptado para medir con precisión las diferencias de tilt.

Un caso particular de implementación de la figura 3 es uno en el que las fuentes láser 1000 son de tipo pulsante, cada una, para suministrar un pulso de radiación muy corto, por ejemplo, del orden de un picosegundo o menos. Se supone que las diferencias de tilt que pueden existir entre unos pulsos que proceden de las diferentes fuentes láser, además, se han compensado o corregido. Gracias al hecho de que el paso entre franjas sea independiente de la longitud de onda para una implementación que utiliza una red de difracción, cada figura de interferencia en el interior de una de las porciones P del detector 13 está formada una vez más por franjas que están separadas de conformidad con un paso entre franjas definido. Para cada longitud de onda de análisis, la diferencia de pistón residual puede deducirse del desfase lateral de la franja central de la figura de interferencia correspondiente. Pero el objetivo de esta aplicación en un régimen pulsante es, de hecho, el de buscar las diferencias de pistón absolutas que existen entre los pulsos que proceden de fuentes diferentes, medidas según la dirección de propagación común a unos pulsos. Para dos pulsos que proceden de fuentes vecinas, la diferencia de pistón absoluta que existe entre las mismas es igual a la diferencia de pistón residual determinada para cada longitud de onda que se utiliza para la detección, más un número entero de veces esta longitud de onda de detección. Tal indeterminación puede resolverse midiendo la diferencia de pistón simultáneamente para al menos dos longitudes de onda diferentes. De este modo se pueden determinar diferencias de pistón absolutas entre dos pulsos procedentes de fuentes láser vecinas, que son tanto más grandes en la medida en la que las longitudes de onda, que se utilizan para formar las figuras de interferencia, están cerca las unas de las otras. La utilización de dos intervalos espectrales, que son muy restringidos en torno a dos longitudes de onda diferentes, es suficiente en la mayoría de los casos.

Tales mediciones con diversas longitudes de onda se pueden obtener mediante unos filtrados espectrales adecuados, para seleccionar componentes de la radiación que correspondan a diferentes intervalos espectrales y dirigiendo cada componente de la radiación filtrada hacia una vía separada del analizador de superficie de onda. Un método alternativo puede consistir en expandir cada pulso sobre un período de duración prolongada, creando desfases temporales que varíen en función de la frecuencia de las componentes espectrales que constituyen el pulso. Tales métodos de expansión espectro-temporal resultan conocidos para el experto en la materia. Entonces es posible efectuar unos análisis de superficie de onda conformes a la invención con diferentes longitudes de onda, cuando se realizan en momentos diferentes en el interior de la duración prolongada del pulso expandido. Para ello, también se pueden prever varias vías separadas del analizador del frente de onda en paralelo y activarse en momentos diferentes.

Las figuras 4a y 4b muestran otra utilización de un analizador de superficie de onda para medir unas diferencias de altura y de inclinación que pueden estar presentes entre unos segmentos vecinos de un espejo de un telescopio de tipo Keck. En función de las diferencias que se medirán de este modo, se podrán reajustar las posiciones relativas de los segmentos del espejo, con el fin de que una superficie de onda producida por reflexión sobre el espejo completo esté desprovista de escalones o interrupciones bruscas de pendiente.

En la figura 4a, las referencias 101 y 102 designan además dos lentes convergentes que forman un primer sistema óptico afocal. Simultáneamente, la lente 101 forma un segundo sistema óptico afocal con una lente convergente de iluminación 103, cuya distancia focal se denota f_3 . Una lámina semi-reflectante 104 permite acoplar una vía de iluminación y una vía de salida, a una misma vía de prueba óptica. La vía de iluminación comprende una fuente láser 2100 y la lente 103. El haz de iluminación F_0 que produce la fuente 2100 se dirige a la vía de prueba óptica a través de la lámina semi-reflectante 104. La vía de prueba óptica comprende la lente 101, la máscara 11, una lente divergente 2200 y el espejo a probar que está designado por la referencia 2000. El espejo 2000 está constituido por todos los segmentos de espejo yuxtapuestos 2001, 2002, 2003,... Estos segmentos de espejo están yuxtapuestos según una red hexagonal, para utilizar una máscara y una red de difracción tales como las descritas anteriormente. La lente divergente 2200 se selecciona y coloca con respecto al espejo 2000 de manera que produzca en combinación con este una función óptica equivalente a un espejo plano, cuando los eventuales defectos de las posiciones relativas de los segmentos individuales 2001, 2002, 2003... no se toman en cuenta. El objetivo de la presente configuración consiste en determinar estos defectos de las posiciones relativas. En función del espejo 2000, la lente divergente 2200 puede ser parcialmente cilíndrica. La vía de salida comprende la lente 102, la red de difracción 12 y el detector de imagen 13.

En el analizador de superficie de onda de la figura 4a, la máscara 11 está situada entre la lente 101 y la lente 2200. Se ha diseñado para presentar unas aberturas que seleccionan unos haces luminosos F_1, F_2, \dots provenientes de zonas centrales respectivas de los segmentos de espejo 2001, 2002, 2003, ..., y para ocultar unas partes del haz de iluminación F_0 que iluminarían unos espacios de separación presentes entre segmentos vecinos del espejo 2000. De hecho, para tal analizador de superficie de onda, se puede considerar que la entrada óptica 10 está situada al nivel de la máscara 11, para las partes del haz F_0 que son reflejadas por todos los segmentos de espejo y que se propagan de derecha a izquierda en la figura 4a. La vía de prueba óptica y la vía de salida constituyen entonces juntas una estructura del analizador de superficie de onda que es análoga a la representada en la figura 3.

La medición del paso entre franjas para el interferograma que está contenido en cada porción P del detector 13, proporciona la diferencia de tilt entre los haces luminosos correspondientes F_1, F_2, \dots , y a continuación, proporciona la diferencia de inclinación que existe entre los segmentos de espejo correspondientes 2001, 2002, ..., por pares de segmentos de espejo vecinos. Cuando la fuente 2100 es monocromática, la posición de la franja central de cada interferograma permite determinar la diferencia de pistón residual que existe entre los haces luminosos reflejados por dos segmentos de espejos vecinos. La utilización de al menos dos longitudes de onda diferentes permite también obtener las diferencias de pistón absolutas y a continuación, determinar las diferencias de altura que existen entre todos los segmentos del espejo 2000, por pares de segmentos de espejo vecinos.

El esquema de la figura 4b es una variante del de la figura 4a, para obtener una aplicación de la invención que pueda implementarse sobre el lugar de instalación de un telescopio de tipo Keck. La referencia 2000 designa el espejo primario del telescopio de tipo Keck, con los segmentos de espejo 2001, 2002, 2003... La referencia 3000 designa el espejo secundario del telescopio, en el caso tomado como ejemplo de un telescopio de dos espejos. La lente 105 tiene una función de colimación y forma la entrada óptica del analizador de superficie de onda. En esta variante del analizador de superficie de onda, la máscara 11 y la red de difracción 12 están adosadas y conjugadas ópticamente con el detector de imagen 13 a través del sistema afocal 100. Están además conjugadas ópticamente con el espejo 2000. La radiación que se utiliza para caracterizar las diferencias de altura y de inclinación de los segmentos de espejo 2001, 2002, 2003... puede entonces ser directamente el haz de luz F_0 que proviene de una estrella E y que alcanza el espejo primario 2000. La máscara 11 se ha diseñado también para ocultar unas porciones del haz F_0 que llegan al nivel del espejo primario 2000 en los intervalos intermedios entre segmentos de espejo vecinos y en unas partes periféricas de los segmentos de espejo.

Se debe entender que la invención puede reproducirse modificando numerosos detalles de realización con respecto a la descripción anterior, conservando al mismo tiempo al menos algunas de las ventajas que se han mencionado. Entre las posibles modificaciones, se citan las siguientes de manera no limitativa:

- el divisor de radiación puede estar constituido por espejos, en lugar de la red de difracción;
- la red de distribución de las zonas de interés que está definida por la máscara, puede ser cuadrada o tener otra forma, en lugar de ser hexagonal. El patrón de la red de difracción debe estar adaptado en consecuencia;
- por equivalencia óptica, el orden de los componentes ópticos que constituyen el analizador de superficie de onda puede modificarse. En particular, la máscara, la red y el sistema óptico afocal pueden disponerse en diferentes órdenes siguiendo el sentido de propagación de la radiación en el interior del analizador de superficie de onda;
- el sistema óptico afocal puede tener una estructura diferente a la de dos lentes convergentes que se ha descrito;
- por efecto de profundidad de campo, la máscara puede estar desfasada en gran medida a lo largo del eje óptico del analizador de superficie de onda, conservando al mismo tiempo un efecto que permanece prácticamente idéntico en la imagen que se ha adquirido; y
- se puede utilizar un analizador de superficie de onda que es conforme a la invención para numerosas aplicaciones, distintas a las que se han descrito.

REIVINDICACIONES

1. Analizador de superficie de onda por interferencia, que comprende:

- 5 - una entrada óptica (10), destinada a recibir una radiación luminosa que tiene una superficie de onda inicial (S_0) que se extiende a través de dicha entrada óptica;
- un divisor de radiación, dispuesto para producir, a partir de haces luminosos (F_1 , F_2) que provienen respectivamente de zonas reducidas en el interior de la entrada óptica (10), al menos dos sub-haces (F'_1 , F''_1 , F'_2 , F''_2) para cada haz luminoso, reproduciendo cada sub-haz unas características de la superficie de onda inicial (S_0) existente en la zona reducida correspondiente;
- 10 - unos caminos ópticos, dispuestos para superponer dos sub-haces (F''_1 , F'_2) que proceden respectivamente de dos zonas reducidas diferentes en el interior de la entrada óptica (10) y que pasan, cada uno, por un camino óptico diferente;
- al menos un detector de imagen (13), dispuesto para adquirir unas figuras de interferencia que son producidas por los sub-haces (F''_1 , F'_2) superpuestos;
- 15 - un módulo de tratamiento (14), adaptado para determinar, a partir de las figuras de interferencia, las diferencias de pistón (p) y de tilt (i) existentes para la superficie de onda inicial (S_0) entre las zonas reducidas de las que provienen los sub-haces superpuestos; y
- 20 - una máscara (11) adaptada para seleccionar, por medio de aberturas de dicha máscara, unas zonas de interés (ZI) disjuntas en el interior de la entrada óptica (10) como zonas reducidas, ocultando al menos en parte la superficie de onda inicial (S_0) fuera de dichas zonas de interés u ocultando al menos en parte unos haces luminosos que no provienen de dichas zonas de interés, de manera que unas porciones (P) separadas del detector de imagen (13) están dedicadas respectivamente a unos pares de zonas de interés que son vecinas en el interior de la entrada óptica,

25 caracterizado por que la máscara (11) y el divisor de radiación se forman juntos mediante un modulador espacial de intensidad.

30 2. Analizador de superficie de onda según la reivindicación 1, en el que el divisor de radiación comprende una red de difracción (12).

35 3. Analizador de superficie de onda según la reivindicación 2, dispuesto de manera que los sub-haces (F'_1 , F''_1 , F'_2 , F''_2) que son producidos por la red de difracción (12) para cada haz (F_1 , F_2), correspondan a los valores +1 y -1 para uno o varios números de orden de difracción.

40 4. Analizador de superficie de onda según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la máscara (11) y el detector de imagen (13) se conjugan ópticamente.

45 5. Analizador de superficie de onda según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que además comprende un sistema óptico afocal (100) dispuesto sobre una trayectoria de radiación entre la entrada óptica (10) y el detector de imagen (13), de manera a transformar, con respecto a unas figuras de interferencia que son adquiridas por el detector de imagen, la superficie de onda inicial (S_0) por homotecia espacial efectiva en el interior de la entrada óptica.

50 6. Analizador de superficie de onda según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores de las cuales la reivindicación 2, en el que la máscara (11) está adaptada para seleccionar las zonas de interés (ZI) según una red hexagonal de distribución de dichas zonas de interés en el interior de la entrada óptica (10), y la red de difracción (12) es bidimensional de patrón hexagonal y está orientada de manera que unos ejes de simetría de la red de difracción estén a 90° de los ejes de simetría de la máscara, en torno a un eje óptico (Δ) del analizador de superficie de onda.

55 7. Analizador de superficie de onda según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la máscara (11) es tal que dos zonas de interés (ZI) cualesquiera que son vecinas tienen una misma forma y un mismo tamaño y están separadas por una zona de ocultamiento de dicha máscara que está situada entre dichas dos zonas de interés vecinas, siendo dicha zona de ocultamiento lo bastante grande para contener una forma que es idéntica a la de cada una de las dos zonas de interés vecinas y que tiene el tamaño de dichas dos zonas de interés vecinas.

60 8. Analizador de superficie de onda según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el módulo de tratamiento (14) comprende una librería de figuras de referencia grabadas, que están constituidas, cada una, por franjas de interferencia rectilíneas y paralelas, estando cada figura de referencia asociada a un valor de diferencia de pistón y a un valor de diferencia de tilt y en el que unos valores de diferencia de pistón y de tilt existentes entre dos zonas de interés (ZI) vecinas se deducen buscando una coincidencia máxima entre la figura de interferencia correspondiente a dichas dos zonas de interés y una de las figuras de referencia grabadas.

65 9. Analizador de superficie de onda según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el módulo de

tratamiento (14) está adaptado para deducir un valor para la diferencia de pistón (p) existente entre dos zonas de interés (ZI) vecinas, a partir de un desfase transversal de franjas existente en la figura de interferencia correspondiente a dichas dos zonas de interés, y

5 para deducir un valor para la diferencia de tilt (i) existente entre dos zonas de interés (ZI) vecinas, a partir de un paso entre franjas existente en dicha figura de interferencia correspondiente a las dos zonas de interés.

10. Analizador de superficie de onda según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que además comprende:

10 - un sistema de separación espectral, adaptado para separar entre sí al menos dos componentes espectrales de la radiación luminosa recibida por la entrada óptica (10),

y estando el analizador de superficie de onda adaptado para adquirir por separado para cada componente espectral, las figuras de interferencia que son producidas por los sub-haces (F''_1 , F'_2) superpuestos, y para determinar las diferencias de pistón (p) y de tilt (i) para cada componente espectral, a partir de las figuras de interferencia adquiridas para dicha componente espectral.

15

11. Procedimiento para determinar unas diferencias de pistón (p) y de tilt (i) entre unas superficies de onda individuales de haces luminosos (F_1 , F_2) susceptibles de producir interferencias, **caracterizado por que** comprende las siguientes etapas:

20

- suministrar un analizador de superficie de onda por interferencia según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10;

25 - dirigir cada haz luminoso (F_1 , F_2) sobre una zona de interés (ZI) diferente, utilizando unas zonas de interés que son vecinas en la entrada óptica (10) del analizador de superficie de onda; y

- activar el detector de imagen (13) y el módulo de tratamiento (14) para determinar las diferencias de pistón (p) y de tilt (i) que existen entre unas superficies de onda individuales cuyos haces luminosos (F_1 , F_2) han sido dirigidos sobre unas zonas de interés (ZI) vecinas.

30 12. Procedimiento según la reivindicación 11, conforme al cual los haces luminosos (F_1 , F_2) son producidos por una fuente de radiación (2100) dispuesta para que dicha radiación sea reflejada simultáneamente por unos segmentos (2001, 2002) yuxtapuestos de un espejo (2000),

y para segmento (2001, 2002) del espejo, una parte de la radiación que es reflejada por dicho segmento del espejo forma el haz luminoso (F_1 , F_2) que está dirigido sobre una de las zonas de interés (ZI) de la entrada óptica (10),

35 y el procedimiento comprende además calcular unas diferencias de altura y unas diferencias de inclinación que existen entre dos segmentos (2001, 2002) vecinos del espejo, a partir de unos valores de las diferencias de pistón (p) y de tilt (i) que se han determinado para los haces luminosos correspondientes.

13. Procedimiento según la reivindicación 11, conforme al cual los haces luminosos (F_1 , F_2) están producidos respectivamente por unas fuentes láser (1000) separadas, concretamente, unas fuentes láser de fibra.

40

14. Procedimiento según la reivindicación 13, según el cual las fuentes láser (1000) son de tipo láser de pulsos y el analizador de superficie de onda es conforme a la reivindicación 2,

y el procedimiento además comprende el cálculo de las diferencias temporales y de las diferencias de dirección de propagación que existen entre unos pulsos de radiación que son producidos por dos fuentes láser diferentes, de los cuales los haces (F_1 , F_2) han sido dirigidos sobre dos zonas de interés (ZI) vecinas, a partir de unos valores de las diferencias de pistón (p) y de tilt (i) que se han determinado para dichos haces.

45

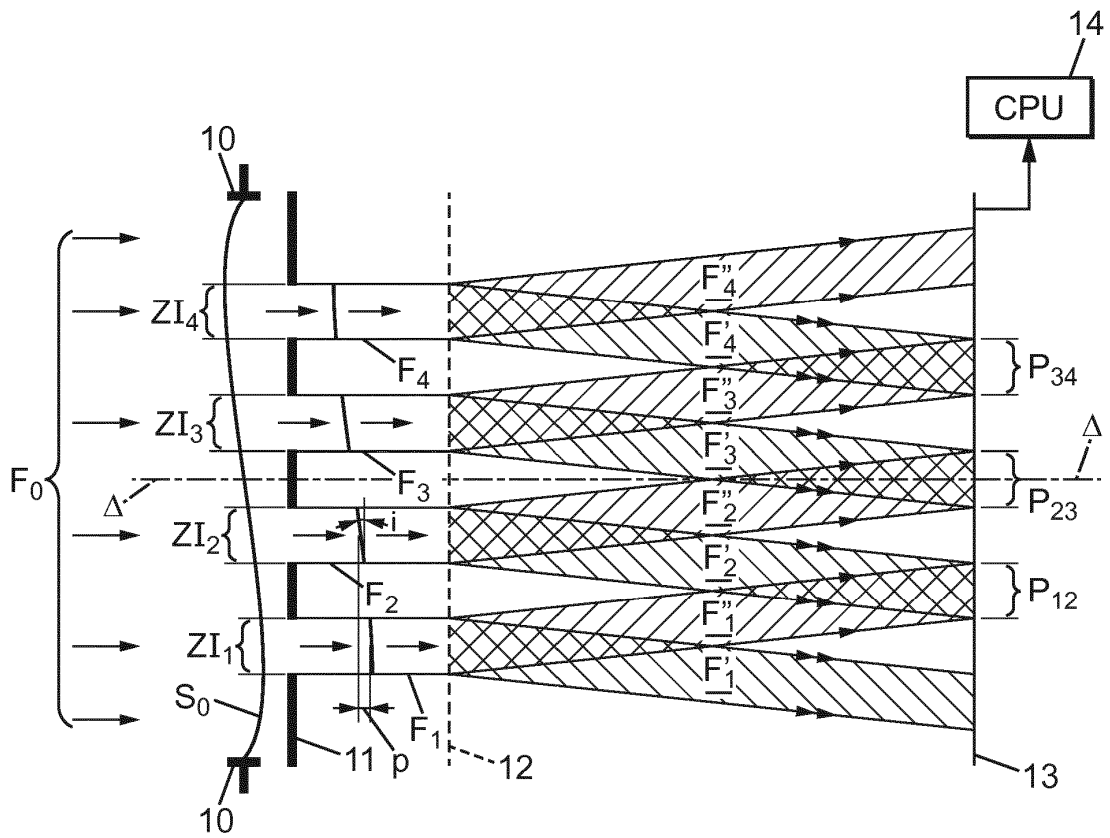


FIG. 1

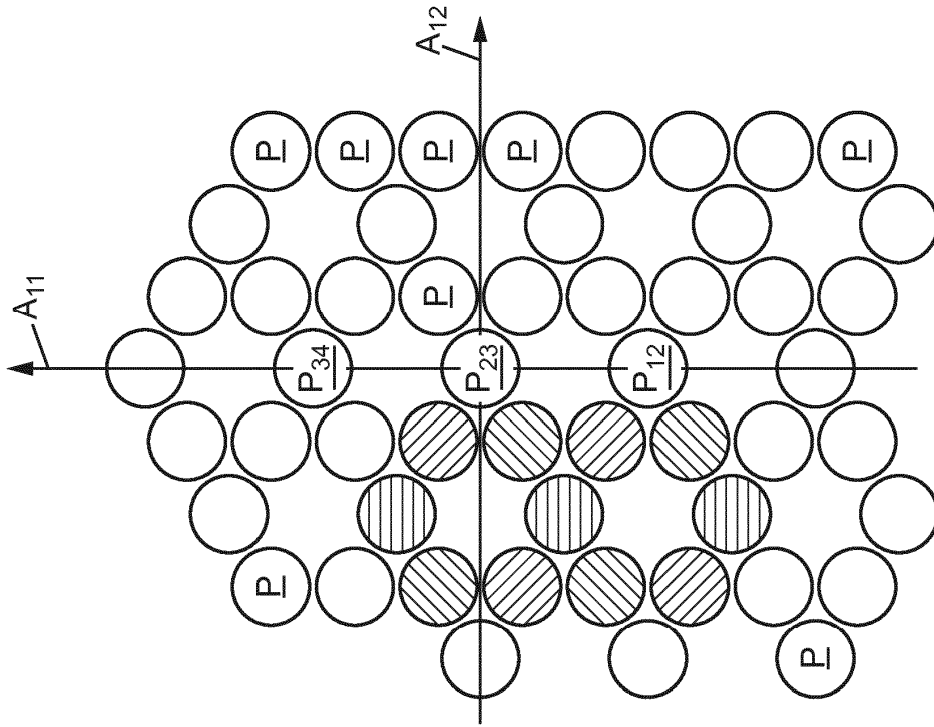


FIG. 2b

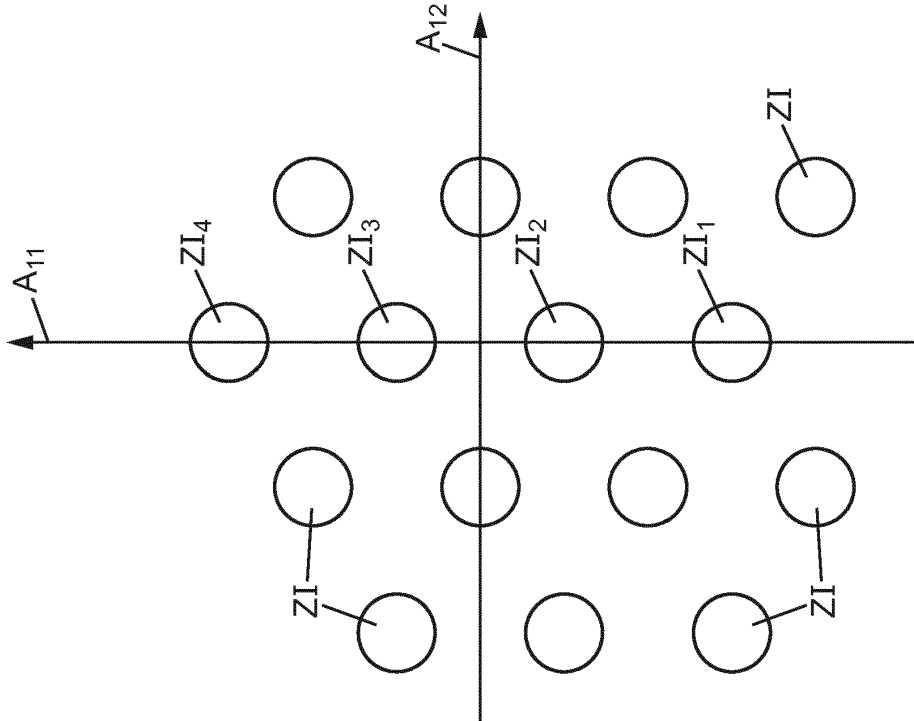


FIG. 2a

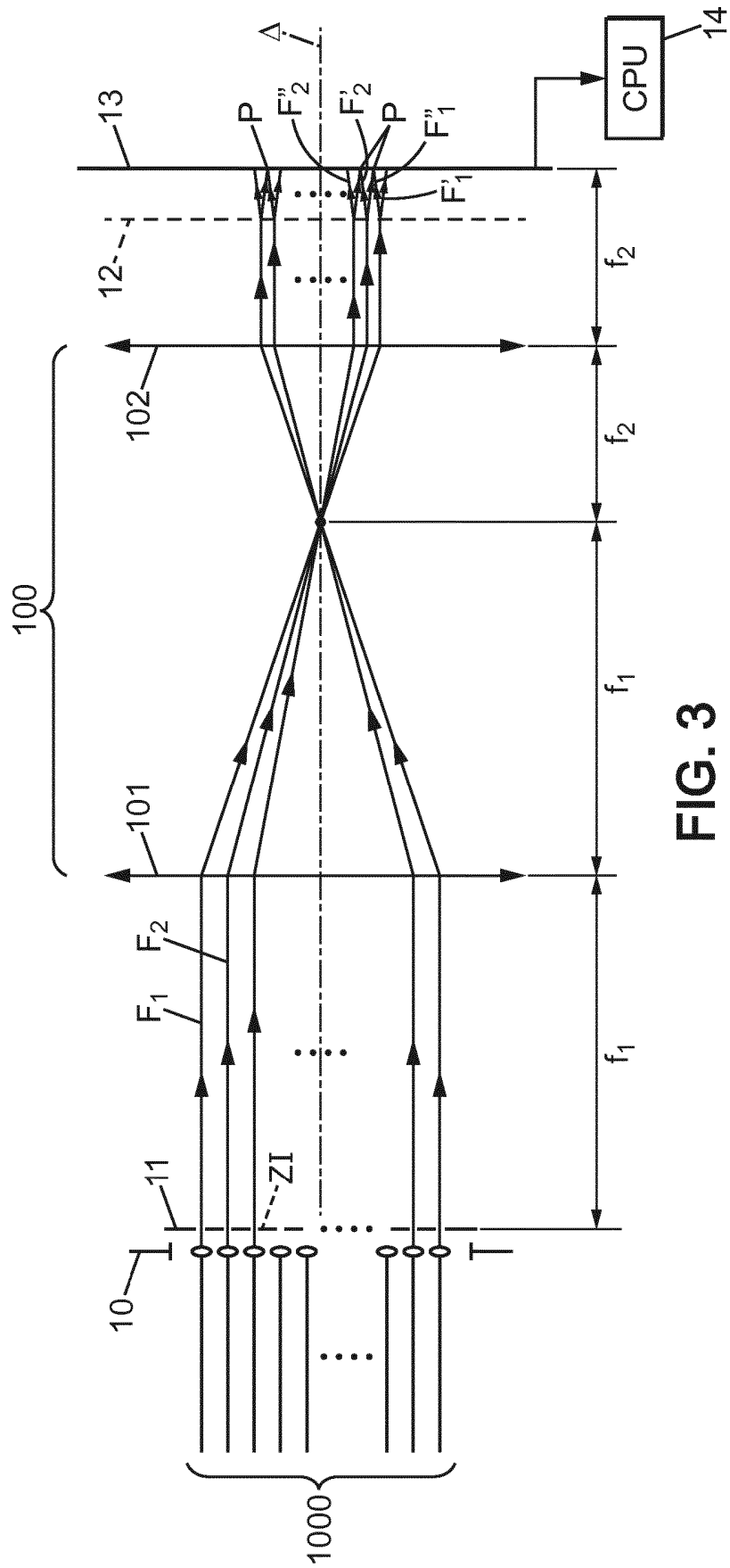


FIG. 3

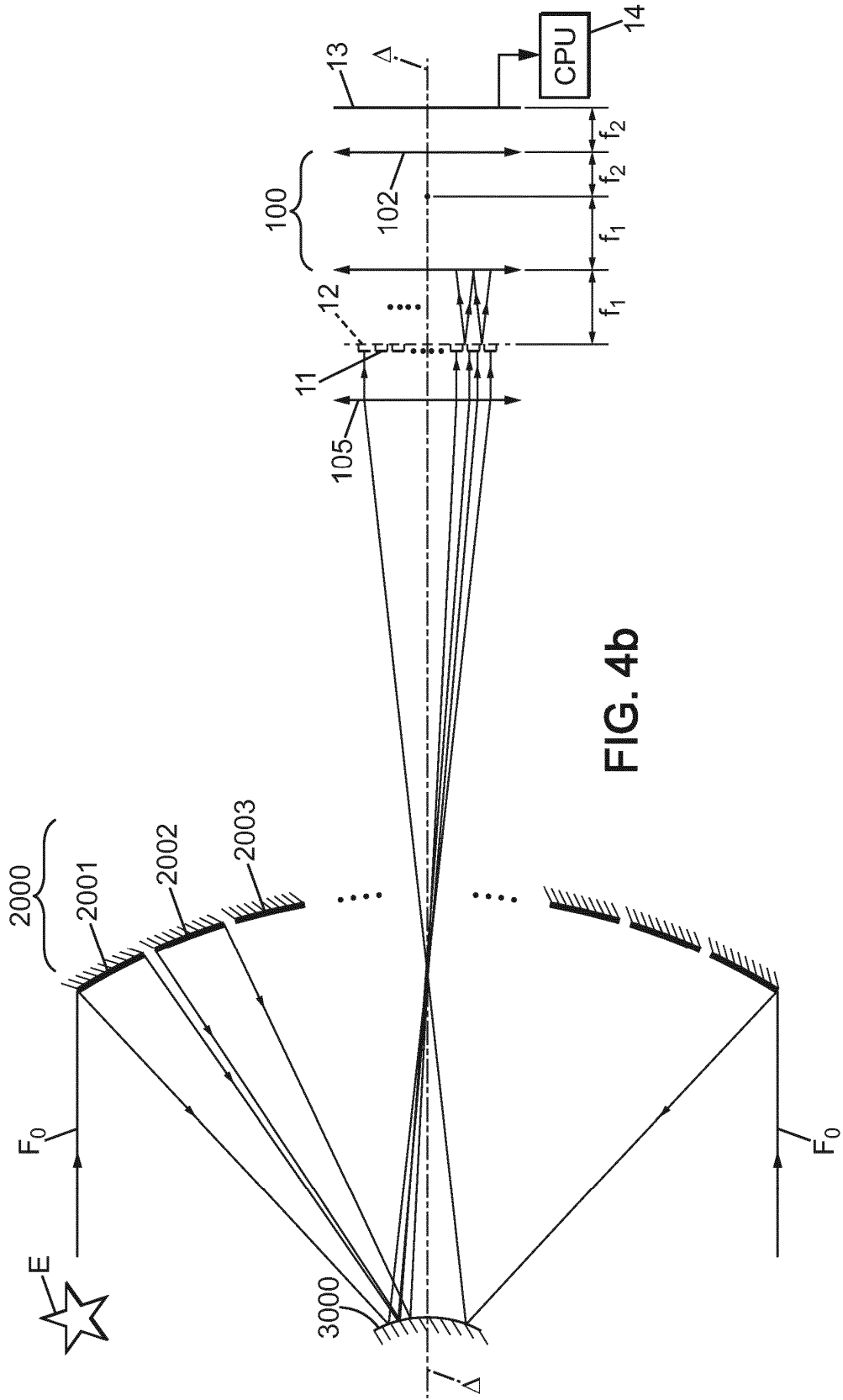


FIG. 4b