

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 393 078**

51 Int. Cl.:

G01B 9/02 (2006.01)

G01B 9/04 (2006.01)

G02B 21/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **01996716 .5**

96 Fecha de presentación: **15.11.2001**

97 Número de publicación de la solicitud: **1364181**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **26.11.2003**

54

Título: **Procedimiento y dispositivo de formación de imagen microscópica interferencial de un objeto a cadencia elevada**

30

Prioridad:

17.11.2000 FR 0014904

45

Fecha de publicación de la mención BOPI:

18.12.2012

45

Fecha de la publicación del folleto de la patente:

18.12.2012

73

Titular/es:

**CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE (100.0%)
3, rue Michel-Ange
75794 Paris Cedex 16, FR**

72

Inventor/es:

**DUBOIS, ARNAUD y
BOCCARA, CLAUDE**

74

Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 393 078 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 y dispositivo de formación de imagen microscópica interferencial de un objeto a cadencia elevada.

La presente invención concierne a un procedimiento y un dispositivo de formación de imagen microscópica interferencial de un objeto a cadencia elevada.

5 Sabido es que los sistemas interferenciales de división de amplitud tienen una gran importancia práctica. Estos miden una diferencia de fase introducida entre dos ondas. El interferómetro de Michelson es utilizado, por ejemplo, en la industria, para medir con una gran precisión distancias muy pequeñas. Se pueden medir así típicamente distancias del orden de 0,1 μm . La modulación de fase es una técnica conocida (Creath [in Progress in Optics, E. Wolf, ed. Elsevier Science, New-York; 26 (1988) 349] y Schwider [in Progress in Optics, E. Wolf, ed. Elsevier Science, New-York; 28 (1990) 271]). Existen dos categorías de interferómetros de modulación de fase. Se distinguen según que la fase sea modulada de manera continua (interferometría de integración de fase) o de manera discreta (interferometría de saltos de fase).

10 En la interferometría de integración de fase, se varía la fase de manera continua y se integra la señal de interferencia en el transcurso de esta variación. Esta variación continua de la fase es, en general, una variación lineal. Esta técnica presenta la ventaja de ser más rápida que la de saltos de fase. Sin embargo, no deja de estar limitada por posibles derivas del tiempo de integración y por problemas de inercia mecánica.

15 Es conocido, por otro lado, otro dispositivo basado en un interferómetro de tipo Michelson que presenta ya no una modulación lineal de la fase, sino una modulación sinusoidal. Esta se obtiene haciendo oscilar el espejo de referencia con el concurso de una cerámica piezoeléctrica (Sasaki y col. [Appl. Opt.; 25 (1986) 3137] y [Appl. Opt.; 26 (1987) 1089]). Sobre el otro brazo del interferómetro se coloca el objeto que va a analizarse. Mediante esta técnica, se pueden obtener así imágenes de fase del objeto. Sin embargo, esta técnica no es aplicable en los microscopios de Mirau y de Michelson, donde el espejo de referencia no es accesible. No se ha aplicado en el microscopio de Linnik.

20 Se ha propuesto asimismo una variante con la puesta en práctica de un modulador de birrefringencia fotoelástica para modular sinusoidalmente la fase y una iluminación estroboscópica para transponer la frecuencia de modulación a una frecuencia compatible con la propia de la cámara (Beaupaire y col. [Optics Lett.; 23 (1998) 244], Dubois y col. [Optics Lett.; 24 (1999) 309] y dispositivo de detección analógica multicanal (patente 2664048)). Sin embargo, éste requiere la utilización de luz polarizada y la fuente de luz se debe modular a cadencia elevada (varios kHz).

25 Por lo tanto, el objetivo de la presente invención es proponer un procedimiento y un dispositivo de formación de imagen microscópica interferencial, simple en su diseño y en su modo operativo, que ponen en práctica un interferómetro de dos ondas y una modulación sinusoidal de la fase.

30 A tal efecto, la invención concierne a un procedimiento y un dispositivo de formación de imagen microscópica interferencial de un objeto de acuerdo con las reivindicaciones 1 a 11.

Se describirá con mayor detalle la invención con referencia a los dibujos que se acompañan, en los que:

35 la figura 1 es una representación esquemática del dispositivo de formación de imagen interferencial, en el contexto de un interferómetro de tipo Linnik, según la invención;

la figura 2 es una representación esquemática del conjunto de elementos oscilantes, en el contexto de un interferómetro de tipo Linnik, según la invención;

40 la figura 3 es una representación esquemática del conjunto de elementos oscilantes, en el contexto de un interferómetro de tipo Michelson, según la invención;

la figura 4 es una representación esquemática del conjunto de elementos oscilantes, en el contexto de un interferómetro de tipo Mirau, según la invención; y

la figura 5 es un ejemplo de proceder para la adquisición de una imagen de fase, que representa las tres etapas sucesivas 5a), 5b) y 5c).

45 El procedimiento y el dispositivo de formación de imagen microscópica interferencial de un objeto, de acuerdo con la invención, se pueden aplicar de manera muy general en cualquier microscopio interferencial de dos ondas. Las figuras 1 y 2 son, por ejemplo, una representación esquemática del dispositivo de formación de imagen interferencial, según la invención, en el contexto de un interferómetro de tipo Linnik. Una fuente 1 produce una señal luminosa de la que es portador un haz 2. A diferencia de los dispositivos de la técnica anterior, no es necesaria la utilización de una fuente de iluminación estroboscópica. Asimismo, la luz no tiene por qué estar polarizada. El haz luminoso 2 se envía sobre un divisor de haz 3 que incluye un cubo divisor 4 o una lámina divisora semitransparente asociada a una lámina compensadora colocada a 45° del plano de incidencia del haz 2. Esta divide dicho haz 2 en dos partes 5 y 6 de igual amplitud. Estos haces 5 y 6 se envían cada uno de ellos sobre uno de los brazos del

interferómetro. Sobre un primer brazo 7 del interferómetro se hallan posicionados un objetivo 8 y un objeto 9 que se va a analizar. El objetivo 8 focaliza el haz 5 en el objeto 9. Sobre un segundo brazo 10 del interferómetro se hallan posicionados un objetivo 11 y un espejo de referencia 12 en el que está enfocado el objetivo 11. El objetivo 11 y el espejo 12 van montados sobre una cerámica piezoeléctrica 13 cuya fuente de excitación eléctrica 14 se sincroniza a un sistema de detección multicanal 15. La cerámica piezoeléctrica 13 representa un oscilador mecánico. Éste desplaza un conjunto de elementos 16 del interferómetro que incluye, en la figura 1, el objetivo 11 y el espejo de referencia 12. Pero este conjunto de elementos oscilantes 16 (fig. 2) también puede limitarse solamente al espejo de referencia 12 (conjunto 161), o incluir el objetivo 11, el espejo de referencia 12 y el cubo divisor 3 (conjunto 162). Éste puede ser también solamente el objeto que se va a analizar 9 (conjunto 163) o el conjunto de elementos 164 que incluye el objetivo de referencia 11, el espejo 12, el cubo divisor 3 y el objetivo 8.

En el caso de un interferómetro de Michelson (fig. 3), este conjunto de elementos oscilantes 16 incluye el objetivo 11, el espejo de referencia 12 y el divisor de haz 3. Este conjunto se denomina objetivo de Michelson. El conjunto de elementos oscilantes también puede limitarse al objeto que se va a analizar 9 (conjunto 161).

En el caso de un interferómetro de Mirau (fig. 4), este conjunto de elementos oscilantes 16 se compone del objetivo de Mirau. Se llama objetivo de Mirau al conjunto de elementos constituido a partir del objetivo 11, del espejo de referencia 12 y del divisor de haz 3. El conjunto de elementos oscilantes también puede limitarse al objeto que se va a analizar 9 (conjunto 161).

Una modulación de fase es obtenida por lo tanto haciendo oscilar de manera sinusoidal el conjunto de elementos 16. La amplitud de esta oscilación es regulable. La señal de interferencia así modulada (de manera periódica pero no sinusoidal) es integrada constantemente durante unas fracciones $1/n$, siendo n entero y mayor o igual que 2, del período de modulación T mediante el sistema de detección multicanal 15. El detector multicanal 15 opera a una frecuencia f tal que $f = n.f$. El sistema de detección multicanal 15 incluye un sistema óptico 17 que focaliza los haces en una cámara CCD 18. Los píxeles de la cámara CCD 18 detectan así, para un gran número de puntos del campo, la señal después de la interferencia. La cámara CCD 18 se sincroniza a la señal sinusoidal que gobierna la oscilación mecánica. La fase de esta sincronización se puede ajustar con el fin de reducir el ruido en las imágenes del objeto. Su valor puede ser del orden de 1 rad. Un ordenador 19 permite registrar por ejemplo, en una memoria intermedia, los datos obtenidos durante cada fracción de período $1/n$ y calcular a continuación la imagen del objeto. La frecuencia de producción de las imágenes depende de la velocidad de funcionamiento de la cámara 18. No obstante, es necesario que el ordenador 19 tenga tiempo de calcular la imagen a partir de la serie de imágenes en memoria durante el tiempo de adquisición de la serie siguiente.

Se recurre a una fuente de luz que presenta una pequeña longitud de coherencia para obtener imágenes tomográficas o para evitar la presencia de interferencias parásitas. Una fuente de este tipo permite localizar franjas en un segmento del espacio. El espesor de este segmento es del orden de la semilongitud de coherencia.

Una fuente cuasi-monocromática permite la visualización de alturas de relieve considerables, del orden de la longitud de coherencia. Tal fuente cuasi-monocromática puede ser una fuente blanca (halógena) delante de la cual se ubica un filtro interferencial.

La señal de interferencia entregada por interferómetros de dos ondas, en cada punto del campo, puede escribirse:

$$I = \bar{I} + A \cos \phi$$

donde \bar{I} es la intensidad media, ϕ es la fase óptica y A es la amplitud de las franjas de interferencia. Haciendo oscilar un objetivo 11 y el espejo de referencia 12 (y el divisor 3 para los microscopios de Michelson y Mirau) según se ha descrito anteriormente, se introduce una modulación de fase sinusoidal de amplitud ψ , de fase de sincronización θ y de período $T = 2\pi/\omega$. La intensidad de la señal se encuentra entonces modulada asimismo en el tiempo, de manera periódica pero no sinusoidal:

$$I(t) = \bar{I} + A \cos[\phi + \psi \sin(\omega t + \theta)]$$

En el dispositivo de la Figura 1, la cámara 18 funciona a 200 Hz y la oscilación mecánica 16 a una frecuencia de 50 Hz. Cabe así la posibilidad de obtener series de cuatro imágenes de manera continua.

Por lo tanto, la señal $I(t)$ es integrada sucesivamente durante cuartos del período de modulación T . Estas cuatro imágenes se escriben matemáticamente:

$$E_p = \int_{(p-1)T/4}^{pT/4} I(t) dt \quad p = 1,2,3,4$$

Se desarrolla $I(t)$ en serie de funciones de Bessel de primera especie J_n y se combinan entonces las imágenes de la

siguiente manera:

$$\Sigma_s = -E1 + E2 + E3 - E4 = (4T / \pi) \Gamma_s A \cdot \phi$$

$$\Sigma_c = -E1 + E2 - E3 + E4 = (4T / \pi) \Gamma_c A \cdot \phi$$

donde

$$\Gamma_s = \Sigma(-1)^n [J_{2n+1}(\psi)/(2n+1)] \sin[(2n+1)\theta]$$

$$\Gamma_c = \Sigma [J_{4n+2}(\psi)/(2n+1)] \sin[2(2n+1)\theta]$$

Ello permite acceder a la fase ϕ que puede ser obtenida en virtud de la ecuación:

$$\tan \phi = (\Gamma_c / \Gamma_s) (\Sigma_s / \Sigma_c)$$

y a la amplitud A dada por:

$$A^2 = (\Gamma_c \Sigma_s)^2 + (\Gamma_s \Sigma_c)^2$$

Se ve, pues, que la adquisición de cuatro imágenes permite así determinar completamente la amplitud y la fase de la onda luminosa proveniente del objeto. Sin embargo, estas relaciones todavía dependen de la amplitud ψ y de la fase de sincronización θ de la modulación sinusoidal de fase, a través de los parámetros Γ_c y Γ_s . Se puede ajustar ventajosamente estos parámetros, de modo que se simplifiquen las fórmulas anteriormente enunciadas. Por ejemplo, la amplitud de modulación $\psi = 2,45$ rad y la fase de sincronización $\theta = 0,98$ rad permiten esta simplificación, entonces se obtiene:

$$\tan \phi = (\Sigma_s / \Sigma_c) = (E1 - E2 - E3 + E4) / (E1 - E2 + E3 - E4)$$

y

$$A^2 = (E1 - E2 - E3 + E4)^2 + (E1 - E2 + E3 - E4)^2$$

La figura 5 representa un ejemplo de adquisición de una imagen de fase. Cada imagen intermedia E_p ($p = 1$ a 4) ha sido obtenida sucesivamente durante unos cuartos del período de modulación T (5a). El cálculo de la fase a partir de las fórmulas anteriormente establecidas se efectúa en tiempo real (5b). Una imagen de fase módulo 2π (o π) del objeto (9) que se va a analizar es producida por el ordenador (19) (5c). A continuación se desarrolla la fase para obtener una imagen topográfica. El desenrollado de fase (phase unwrapping) consiste en añadir (o sustraer) un desfase de 2π (o π) a cada discontinuidad.

Este procedimiento y dispositivo de formación de imagen microscópica interferencial de un objeto se pueden aplicar ventajosamente en la caracterización de capas delgadas y de interfaces, para el control de componentes en microelectrónica.

Se pueden utilizar asimismo en el contexto de controles e inspecciones a cadencia elevada; en la biología; en el estudio de objetos inestables a lo largo del tiempo (por ejemplo, estudios *in vivo*, fenómenos oscilantes) o de objetos en entornos inestables (por ejemplo, en presencia de vibraciones o de derivas).

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de formación de imagen microscópica interferencial de un objeto (9) en el que:
 - se envía un haz (2) procedente de una fuente de luz (1) de pequeña longitud de coherencia en cada uno de los brazos de un microscopio interferencial de dos ondas, incluyendo uno de los brazos (7) un objeto (9) que se va a analizar e incluyendo el otro brazo (10) un espejo de referencia (12),
 - se introduce una modulación sinusoidal de frecuencia f , que tiene una amplitud ψ y una fase de sincronización θ , de la diferencia de fase óptica entre los dos brazos (6, 7) del interferómetro, resultando dicha modulación de la oscilación mecánica de un conjunto de elementos (16) del interferómetro,
 - se integra la señal de interferencia (S) en el transcurso de dicha modulación de la diferencia de fase por medio de un detector multicanal (15) que opera a una frecuencia f' tal que $f' = n.f$, siendo n entero y mayor o igual que 2, realizándose la integración de la señal de interferencia (S) durante fracciones $1/n$ de período de la modulación, y
 - se registran las señales de interferencia integradas durante cada fracción de período $1/n$,
 - se procesan digitalmente dichas señales registradas con el fin de calcular una imagen tomográfica de un segmento de dicho objeto, presentando dicho segmento un espesor del orden de la mitad de la longitud de coherencia de dicho haz de luz.
2. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado porque la amplitud de modulación ψ y la fase de sincronización θ de la oscilación mecánica son ajustables.
3. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 ó 2, en el que se focaliza dicha luz de pequeña longitud de coherencia (2) en el objeto que se va a analizar (9), en el espejo de referencia (12) y en el detector multicanal (15).
4. Dispositivo de formación de imagen microscópica interferencial de un objeto (9), que incluye:
 - una fuente de luz (1) que produce un haz luminoso (2) de pequeña longitud de coherencia,
 - un microscopio interferencial de dos ondas, que comprende un divisor de haz (3) destinado a recibir el haz luminoso (2) procedente de la fuente de luz (1) para formar un primer haz luminoso (5) sobre un primer brazo (7) del microscopio interferencial, estando dicho primer brazo adaptado para recibir un objeto (9) que se va a analizar, y un segundo haz luminoso (6) sobre un segundo brazo (10) del microscopio interferencial, incluyendo dicho segundo brazo (10) un espejo de referencia (12),
 - un oscilador mecánico (13) para desplazar un conjunto de elementos del microscopio interferencial con el fin de introducir una modulación de fase sinusoidal y de frecuencia f de la diferencia de fase óptica entre los dos brazos del microscopio interferencial;
 - un sistema óptico (8) que focaliza dicho primer haz luminoso (5), procedente del divisor de haz (3) del microscopio interferencial, en el objeto (9) que se va a analizar,
 - un detector multicanal (15) que opera a una frecuencia f' tal que $f' = n.f$, n entero y mayor o igual que 2, que integra la señal de interferencia (S), durante fracciones $1/n$ de período de la modulación, y
 - un ordenador (19) para registrar las señales de interferencia integradas obtenidas durante cada fracción de período $1/n$ y para calcular a continuación una imagen tomográfica de un segmento de dicho objeto, presentando dicho segmento un espesor del orden de la mitad de la longitud de coherencia de dicho haz de luz.
5. Dispositivo según la reivindicación 4, caracterizado porque el oscilador mecánico (13) es un sistema piezoeléctrico.
6. Dispositivo según una de las reivindicaciones 4 ó 5, caracterizado porque incluye asimismo un sistema óptico (17) de focalización de la luz en el detector multicanal (15).
7. Dispositivo según una de las reivindicaciones 4 a 6, caracterizado porque el microscopio interferencial es de tipo Linnik y el conjunto de elementos oscilantes (16) es el propio microscopio interferencial de Linnik, compuesto por un objetivo de focalización (11) de la luz (2) en el espejo de referencia (12), por el espejo de referencia (12) en el que está enfocado el objetivo (11), por el divisor de haz (3), por un objetivo del sistema óptico (8) de focalización de la luz (2) en el objeto que se va a analizar (9) y por eventuales láminas de retardo de fase.
8. Dispositivo según una de las reivindicaciones 4 a 6, caracterizado porque el microscopio interferencial es de tipo Linnik y el conjunto de elementos oscilantes (16) se limita solamente al espejo de referencia (12).

9. Dispositivo según una de las reivindicaciones 4 a 6, caracterizado porque el microscopio interferencial es de tipo Mirau y el conjunto de elementos oscilantes (16) es el propio objetivo de Mirau.

5 10. Dispositivo según una de las reivindicaciones 4 a 6, caracterizado porque el microscopio interferencial es de tipo Michelson y el conjunto de elementos oscilantes (16) se compone del objetivo, del espejo de referencia y del divisor de haz, conjunto que se denomina objetivo de Michelson.

11. Dispositivo según una de las reivindicaciones 4 a 6, caracterizado porque el microscopio interferencial es de tipo Linnik y el conjunto de elementos oscilantes (16) se compone del espejo de referencia (12) y de un objetivo (11) de focalización de la luz (2) en el espejo de referencia (12).

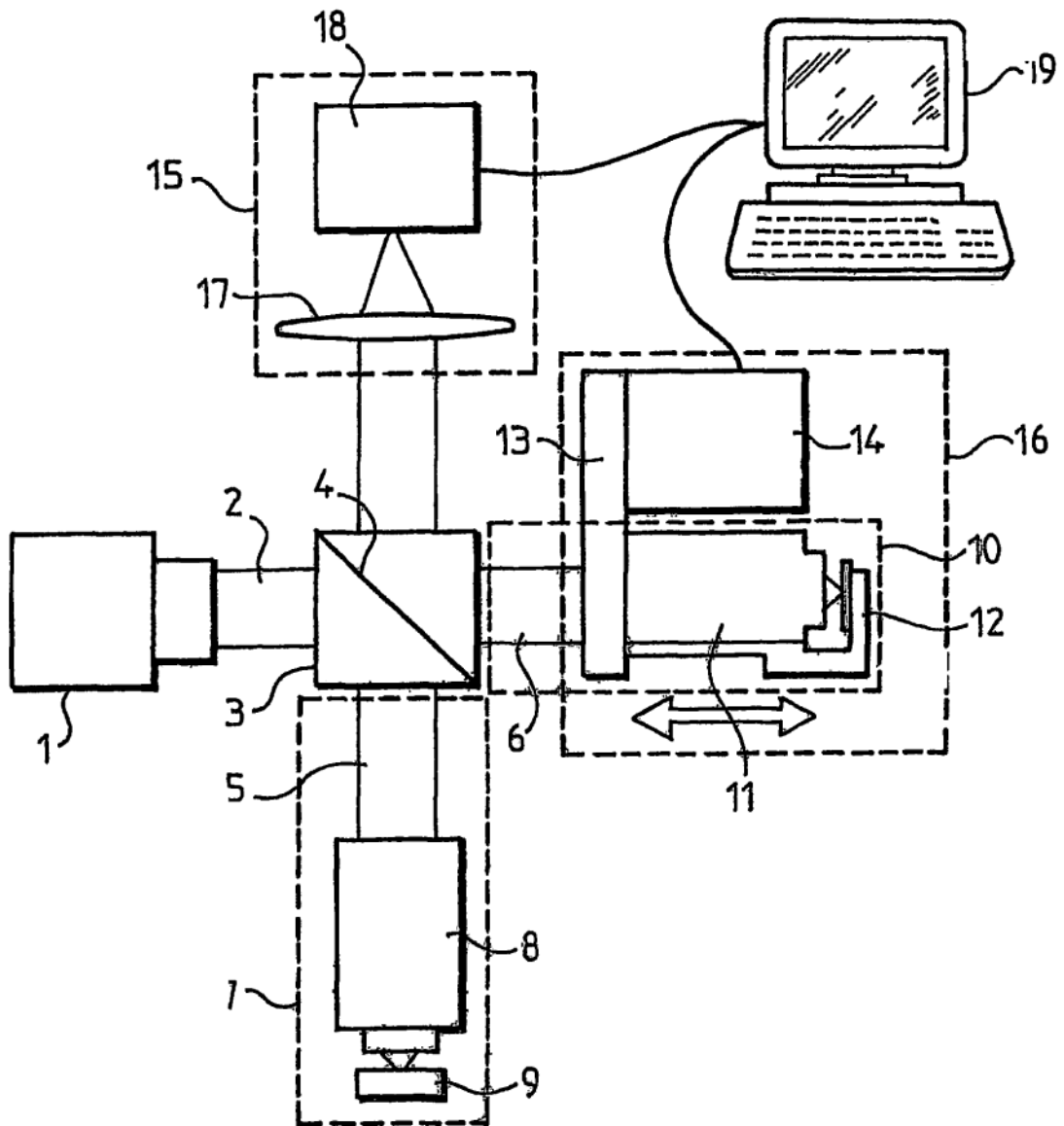


FIG.1

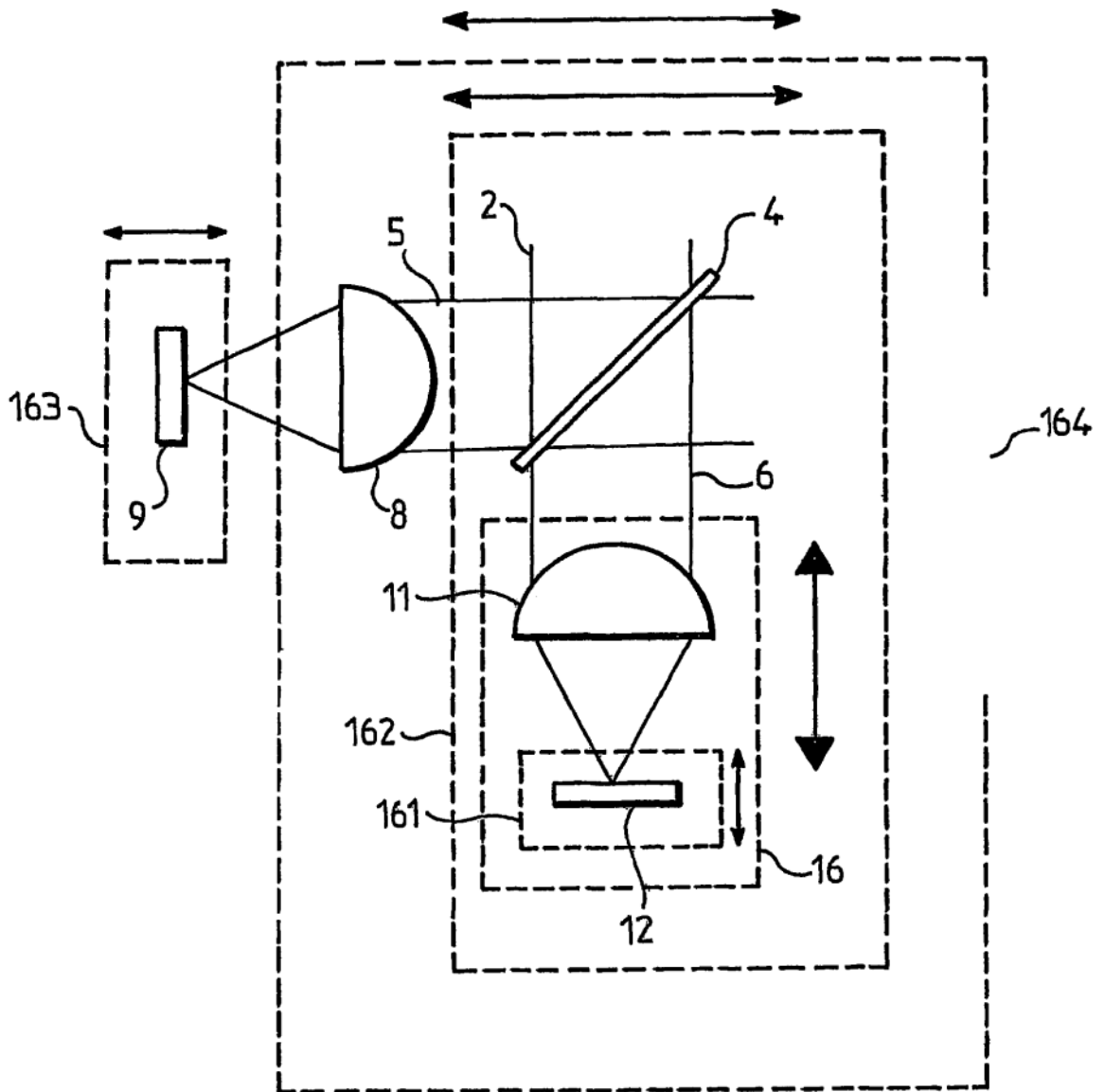


FIG. 2

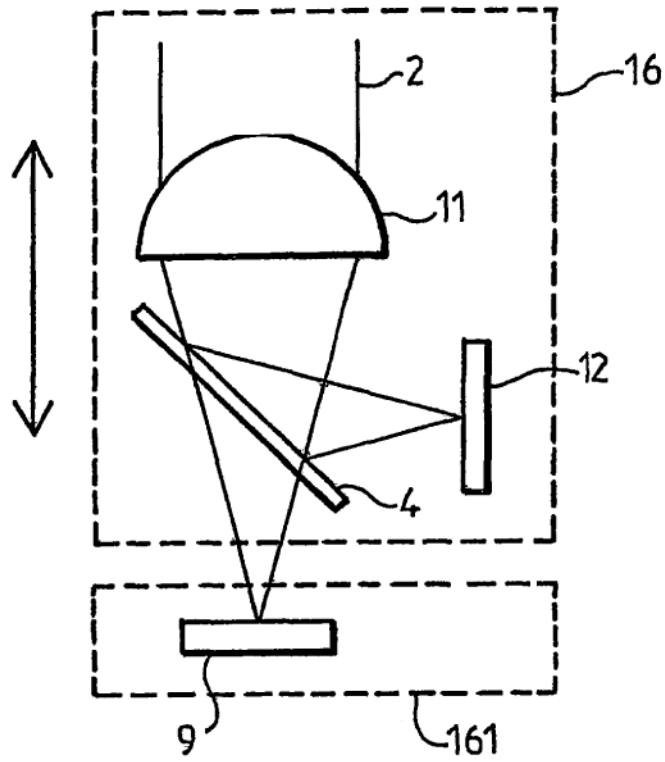


FIG. 3

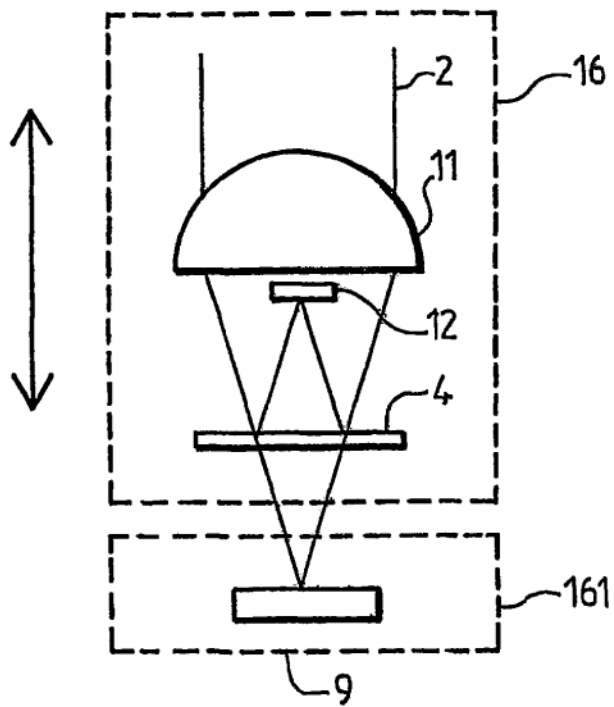
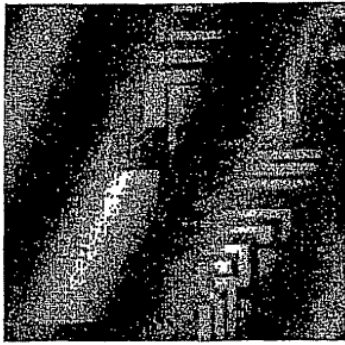
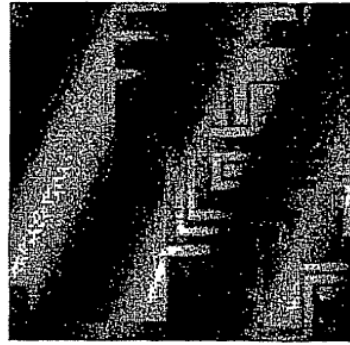


FIG. 4

E₁



E₂

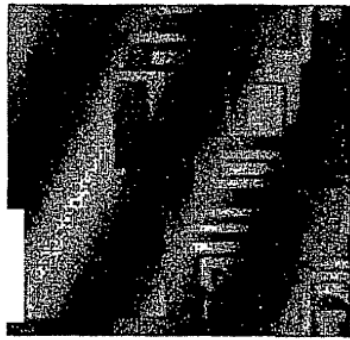


5a)

E₃



E₄

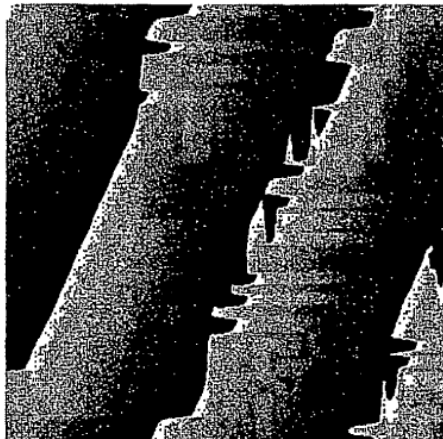


↓

$$\tan(\phi) = \frac{E_1 - E_2 - E_3 + E_4}{E_1 - E_2 + E_3 - E_4}$$

↓

5b)



5c)

FIGURA 5