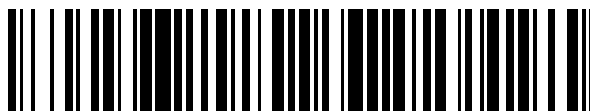


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 447 545**

51 Int. Cl.:

G01N 21/956 (2006.01)

G01B 11/25 (2006.01)

G01M 11/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **06.11.2008** **E 08852427 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **25.12.2013** **EP 2212681**

54 Título: **Sistema y método de deflectometría de transformada de Fourier**

30 Prioridad:

19.11.2007 EP 07121009

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

12.03.2014

73 Titular/es:

**LAMBDA-X (100.0%)
ZONING II RUE DE L'INDUSTRIE 37
1400 NIVELLES, BE**

72 Inventor/es:

**BEGHUIN, DIDIER y
JOANNES, LUC**

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 447 545 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

Sistema y método de deflectometría de transformada de Fourier

La presente invención se refiere a un sistema y método de deflectometría para la inspección óptica de un objeto de fase y amplitud.

5 Cuando un objeto refractivo se ilumina, el frente de onda que atraviesa está afectado según la forma y el índice de refracción del objeto. La intensidad de la luz también estará afectada por la transmisión del objeto. De igual modo, cuando se refleja luz en un objeto reflexivo, la forma de la superficie de reflexión del objeto afectará el frente de onda reflejado y la reflexión de la intensidad de la luz reflejada. Las características ópticas del objeto refractivo o reflexivo se pueden determinar de esta manera.

10 En la industria óptica, es crucial para los inspectores ser capaces de determinar las características ópticas de los productos de una manera tan precisa, completa y automática como sea posible. En particular, según se desarrollan lentes de contacto o gafas correctivas con curvaturas complejas, es muy importante ser capaces de controlar que cada lente se adapte a su especificación particular.

15 Métodos similares de inspección se usan también en otros campos, tales como para la inspección de obleas de semiconductores, paneles de vidrio planas, hojas de plástico, etc. donde el acabado de la forma y/o superficie de objetos reflexivos y/o refractivos ópticamente necesita ser inspeccionada de una manera precisa y eficiente.

Varios sistemas y métodos para la caracterización óptica de objetos reflexivos y/o refractivos se han descrito previamente. Se pueden categorizar, entre otros si extraen información con respecto al frente de onda, su derivada de primer orden, es decir su inclinación, o su derivada de segundo orden, es decir su curvatura.

20 Los sistemas y métodos que pertenecen a la primera categoría comprenden la interferometría directa, como se lleva a cabo con los interferómetros de Michelson, Mach-Zendher, o Fizeau, o con cualquier otro tipo de interferómetros en donde el frente de onda a ser analizado interfiere con un frente de onda de referencia con aberraciones, el cual puede ser esférico, plano, o no esférico. Una revisión profunda de tales sistemas y métodos fue descrita en Daniel Malacara, <<Optical Shop Testing>>, 2ª Edición, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1992, ISBN 0-471-52232-5.

25 Otra técnica en esta categoría es la holografía digital, como se describe en la Solicitud de Patente Internacional WO 00/20929.

Las desventajas principales de estos sistemas y métodos de la primera categoría son que requieren luz coherente, que está sujeta a captura de ruido óptico, así como un frente de onda de referencia, y que están bastante limitados en rango dinámico.

30 Los sistemas y métodos de caracterización óptica existentes más numerosos son probablemente aquéllos que pertenecen a la segunda categoría. La categoría comprende, entre otros la prueba de Hartmann, la prueba de Foucault, la prueba de Ronchi, microscopía de Contraste de Interferencia Diferencial (DIC), interferometría de Cizallamiento, interferometría de desplazamiento lateral, pruebas de Talbot moiré, Shack-Hartmann, deflectometría, deflectometría moiré, desplazamiento de fase Schlieren, y deflectometría de exploración. Algunas de ellas también se describen en el libro antes mencionado <<Optical Shop Testing>>.

35 Comparado con aquéllas de la primera categoría, estas técnicas presentan las ventajas de aceptar deformaciones de frente de onda mayores, es decir un rango dinámico mayor, y no requerir un frente de onda de referencia. No obstante, esta extensión del rango dinámico es a menudo a costa de la sensibilidad. Una desventaja adicional de estas técnicas es que recuperar el frente de onda requiere la integración de la señal derivada obtenida por estos métodos. Esto se discute, por ejemplo en C. Elster, I. Weingätner, "Solution to the shearing problem", App. Opt., 38 (1999) 5.024-5.031.

40 Algunas de las técnicas descritas permiten la adquisición simultánea de las derivadas del frente de onda en dos ejes, por ejemplo el sistema y método de interferometría de cizalladura que usa una retícula con dos direcciones ortogonales descrita en J.C. Wyant, "Double Frequency Grating Lateral Shear Interferometer", App. Oct., 12(9), p. 2.057-2.060, 1.973; el sistema y método de interferometría de desplazamiento lateral descritos en J. Primot, S. Veighe, N. Gérineau, R. Haïdar, J.C. Chanteloup, <<L'analyse de surface d'onde par interférométrie à décalage multilatéral>>, Photoniques, 19, p. 57, 2005; las pruebas de Shack Hartmann y Ronchi bidireccionales adaptadas descritas, respectivamente en Xavier Levecq, Samuel Bucourt, "Analyseur de front d'onde: les évolutions des analyseurs Shack-Hartmann>>, Photoniques, 19, p. 53, 2005; y A. Cordero-Dávila, E. Luna-Aguilar, S. Vázquez-Montiel, S. Zárate-Vázquez, y M.E. Percino-Zacarías, "Ronchi test with a square grid", App. Oct. 37(4), p. 672-675, 1998; o los sistemas y métodos de deflectometría moiré descritos en, por ejemplo Jesús Villa, Juan Antonio Quiroga, y Manuel Servin, "Improved regularized phase-tracking technique for the processing of squared-grating deflectograms", App. Opt. 39(4), p. 502-508, 2000, o la Patente de EE.UU. US 6.771.362.

45 Estas técnicas basadas en frente de onda diferencial hacen presente sin embargo la desventaja de una resolución espacial limitada. La resolución espacial está limitada, por ejemplo, por el cizallamiento lateral en sistemas de

interferometría de cizalladura; por la discretización debida al número finito de micro lentes en la prueba de Shack Hartmann, como se describe en la US 6.130.419; o por la separación de los rasgos del patrón usado en el método de deflectometría descrito en la Patente de EE.UU. US 6.496.253. Como resultado, el frente de onda se puede reconstruir solamente con una resolución espacial limitada. Las frecuencias espaciales altas entonces no son accesibles con esos métodos; lo cual los hace inadecuados, por ejemplo, para la detección de pequeños defectos tales como arañazos, polvo, marcas de herramientas o picaduras, así como aquél de micro grabados que se usa en lentes oftalmológicas progresivas para gafas. Otros medios de inspección, tales como, por ejemplo iluminación de campo oscuro, son de esta manera necesarios para estos propósitos. La especificación de la Solicitud de Patente Internacional WO 2005/121740 A1 resume bien este problema, y propone una solución basada en el uso de patrones alternos.

El mismo problema también ocurre en deflectometría moiré e interferometría Talbot, como se describe en Juan Antonio Quiroga, Daniel Crespo, Eusebio Bernabéu, "Fourier transform method for automatic processing of moiré deflectograms", *Opt. Eng.* 38 (6), p. 974-982, 1999, y en el artículo antes mencionado de Villa et al. En el método de deflectometría descrito en la US 6.771.362, se hace frente al problema de resolución espacial aumentando la separación axial entre 2 retículas cuadradas, pero esto se mantiene limitado a resoluciones espaciales relativamente bajas. Adaptaciones similares se han descrito en la US2004/189938 y US 6 717 661.

Un método de Schlieren de desplazamiento de fase se muestra adecuado para obtener de manera precisa no solamente información cuantitativa con respecto a la curvatura del frente de onda por ejemplo a ser adaptado por los polinomios de Zernike, sino también información de contenido de alta resolución espacial con respecto a la fase o absorción, como se describe en L. Joannes, F. Dubois, J.C. Legros, "Phase-shifting Schlieren: high-resolution quantitative Schlieren that uses the phase-shifting technique principle", *App. Opt.* 42(25), p. 5.046-5.053, 2003; y en la Solicitud de Patente Internacional WO 03/048837. Esto se hace posible mediante la codificación tanto de la fase como de la intensidad para cada píxel de la imagen capturada por un sensor de imágenes. No obstante, este método de Schlieren de desplazamiento de fase tiene la desventaja de requerir un equipo comparativamente complicado y costoso.

La tercera categoría de sistemas y métodos de caracterización óptica, aquéllos que obtienen la derivada de segundo orden o curvatura del frente de onda comprenden, entre otros la técnica basada en la prueba de espejo de Makyoh, como se describe, por ejemplo en Ferenc Riesz, I.E. Lukas, y J.P. Makai, "Realisation of quantitative Makyoh topography using a Digital Micromirror Device", Sistema de Medición Óptica para Inspección Industrial, V, Wolfgang Osten, Christophe Gorecki, Erik L. Novak, *proc SPIE* 6616, 66160L (2007). En este método, la curvatura de la curvatura del frente de onda directamente conduce a una modificación de intensidad en relación con la longitud de propagación. Esta variación de intensidad se guarda y analiza. Señalar que la información tosca obtenida por los sistemas y métodos de la segunda categoría, es decir, información relacionada con la derivada de primer orden del frente de onda, en algunos casos se puede procesar a fin de obtener la curvatura del frente de onda, como se describe, por ejemplo, en Héctor Canabal, J. Antonio Quiroga, y Eusebio Bernabéu, "Automatic processing in moiré deflectometry by local fringe direction calculation", *App. Opt.* 37(25), p. 5.894-5.901, 1998.

Un método numérico para analizar los patrones de franjas densas en interferometría o perfilometría se describieron en Mitsuo Takeda y Kazuhiro Muthoh, "Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes", *App. Opt.* 22(24), p. 3.977-3.982, 1983; y Mitsuo Takeda y Seiji Kobayashi, "Lateral aberration measurements with a digital Talbot interferometer", *App. Opt.* 23 (11), p. 1.760-1.764, 1984. Según este método, una transformada de Fourier numérica de la señal de imagen de patrón de franjas se filtra y desplaza en el dominio de Fourier. Se calcula entonces la transformada inversa de Fourier de la transformada de Fourier filtrada y desplazada, y se recupera su mapa de fase. Este método se conoce como Método de Fourier. Este método numérico se puede ver como la forma computacional de holografía y conduce a holografía digital, como se describe en la patente WO 00/20929. Ello fue mostrado, por ejemplo en D. Beghuin, E. Cucho, P. Dahlgren, C. Depeursinge, G. Delacrétaz, y R. P. Salathé, "Single acquisition polarisation imaging with digital holography", *Electronics Letters* 35: 2.053-2.055 (1.999), que el Método de Fourier numérico se puede usar para procesar múltiples zonas en el dominio de Fourier. Para que funcione correctamente el Método de Fourier numérico, el contenido espacial de la fase no debería ser grande comparado con la frecuencia portadora (ver M. Takeda, H. Ina, y S. Kobayashi, "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry", *J. Opt. Soc. Am.* 72, 156 (1982)). En holografía fuera de eje, por ejemplo, el frente de onda de referencia está de esta manera en un ángulo bastante grande del frente de onda del objeto. En otras palabras, a fin de obtener un rango dinámico suficientemente grande, la frecuencia portadora será tan alta como sea posible, lo cual en la práctica está limitado por la definición de los sensores de imagen. En el artículo Jonas Kühn, Tristan Colomb, Frédéric Monfort, Florian Charrière, Christian Depeursinge, "Real-time dual-wavelength digital holographic microscopy with a single hologram", *proc SPIE* vol 6616, se ha descrito que dos portadoras de frecuencia suficientemente separadas en el dominio de Fourier pueden servir para desenvolver la fase sin ambigüedad si las dos señales transportan la misma información, es decir en este caso las distancias ópticas.

Volviendo a la Patente de EE.UU. 6.496.253 B1 antes mencionada, ese documento describe un método de deflectometría para la inspección óptica de un objeto de fase y amplitud colocado en un camino óptico entre una única retícula y un sistema de imágenes. La retícula forma un patrón periódico basado en contraste, y el sistema de

imágenes comprende un objetivo y un sensor de imágenes que comprende una pluralidad de elementos sensores. Realizar este método comprende el paso de capturar a través del objetivo, con el sensor de imágenes, una imagen inicial de dicho patrón distorsionado por el objeto de fase y amplitud.

5 La US-A-4794550 describe un método en el que la gama de medición de contorno Moiré se extiende más allá del límite de la frecuencia de Nyquist. Esto se logra restringiendo la reconstrucción de un contorno de superficie usando un conocimiento previo acerca de la superficie.

La US-A-2004/0189938 describe un aberrómetro de Moiré para medir una aberración del frente de onda de un sistema óptico la luz dispersa de un área de superficie del sistema se convierte en un patrón de franjas de Moiré que se usa para medir la aberración del frente de onda.

10 La US-A-2007/0229848 también mide la aberración del frente de onda de un sistema óptico usando un patrón de interferencia que se produce por un parámetro de sistema que se desplaza desde un valor de diseño dentro de un sistema óptico objetivo.

15 La US-B-6717661 describe un sensor de frente de onda de Moiré Fourier en el que se utilizan dos retículas Moiré en un camino óptico. El deflectograma Moiré producido por las retículas se transforma ópticamente usando una transformada de Fourier para procesamiento adicional.

La US-A-4791584 describe un método similar a aquél tratado en la US-A-4794550 anterior. Los valores de fase absolutos medidos por un interferómetro se reconstruyen aplicando restricciones basadas en un conocimiento previo de cuáles de los valores de fase absolutos deberían ser.

20 La WO-A-2004/025568 describe un método para detectar diferencias entre imágenes complejas en las que componentes de frecuencia alta de las primera y segunda imágenes complejas modificadas se comparan para determinar si encajan la primera y segunda imágenes complejas.

La US-A-2005/0276513 describe un método para caracterizar un sistema de imágenes digital en el que se mide una función de transferencia de modulación.

25 La US-A-6100990 describe un método y aparato para determinar la calidad óptica reflexiva de un objeto usando patrones de escala grises. Los patrones se dirigen sobre el objeto y los patrones reflejados fuera del objeto se procesan para determinar la calidad óptica del objeto.

No obstante, como se indicó anteriormente, este método tenía la desventaja significativa de una resolución espacial limitada. Los patrones de frecuencia espacial altos no son accesibles por este método y pequeños rasgos y defectos en el objeto pueden no ser revelados de esta manera por este método.

30 A fin de resolver este problema, la presente invención proporciona un método de deflectometría para la inspección óptica de un objeto de fase y amplitud colocado en un camino óptico entre una única retícula y un sistema de imágenes, dicho objeto de fase y amplitud que está a una distancia h de la retícula, la retícula que forma un patrón periódico basado en contraste con frecuencias espaciales en ejes ortogonales en un plano de imagen, el sistema de imágenes que comprende un objetivo y un sensor de imágenes que tiene una pluralidad de elementos fotosensibles, en donde dichas frecuencias espaciales no son mayores que la mitad de las frecuencias de muestreo respectivas del sistema de imágenes en dichos ejes ortogonales, el método que comprende los pasos de:

a) capturar, a través del objetivo con el sensor de imágenes, una imagen de dicho patrón periódico basado en contraste distorsionado por el objeto de fase y amplitud;

40 b) calcular una transformada de Fourier de dicha imagen en un dominio de frecuencia espacial, las frecuencias espaciales de un patrón periódico basado en contraste de imagen no distorsionado de dicho dominio espacial que no es mayor que la mitad de las frecuencias de muestreo respectivas del sistema de imágenes, dicha transformada de Fourier de dicha imagen que comprende un espectro de orden cero y al menos dos espectros de primer orden o superior desplazados en el dominio de frecuencia con respecto al espectro de orden cero por dichas frecuencias espaciales de dicho patrón periódico basado en contraste en los ejes x e y y en el plano de imagen;

45 c) seleccionar al menos uno de dicho espectro de primer orden o superior de dicha transformada de Fourier y desplazarlo en dicho dominio de frecuencia a fin de colocarlo sustancialmente en una frecuencia central de dicha transformada de Fourier;

50 d) llevar a cabo una transformada inversa de Fourier de dicho al menos un espectro de primer orden o superior desplazado de dicha transformada de Fourier a fin de obtener una función compleja $g(x,y) = I(x,y)e^{i\varphi(x,y)}$, en donde $I(x,y)$ es una intensidad y $\varphi(x,y)$ una fase enlazada con los ángulos de deflexión óptica θ_x , θ_y ,

respectivamente, en las direcciones de los ejes x e y, según la siguiente fórmula: $\varphi(x,y) = -2\pi h(\mu_0 \tan \theta_x + v_0 \tan \theta_y)$; y

e) desarrollar dicha fase

caracterizado porque el método además comprende los pasos de

5 f) repetir los pasos a) a e) para una segunda posición de la retícula con respecto al objeto de fase y amplitud donde la diferencia de distancia entre la primera posición y la segunda posición es Δh ; y

g) determinar una diferencia de fase a partir de la fase determinada en cada una de las primera y segunda posiciones.

10 h es la distancia entre la retícula y el objeto de fase y amplitud, x e y son ejes ortogonales en el plano de imagen, y μ_0 y v_0 son, respectivamente, frecuencias espaciales del patrón periódico en los ejes x e y, menores o iguales que las frecuencias de Nyquist del sistema de imágenes en los ejes x e y respectivos.

15 Por "frecuencia de Nyquist" se entiende una frecuencia que corresponde a la mitad de la frecuencia de muestreo de un sistema de procesamiento de señales discretas. Según el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon, se puede evitar la distorsión por repliegue del espectro de señal si la frecuencia de Nyquist es mayor que la frecuencia máxima de la señal que se muestrea. La frecuencia de muestreo espacial en una dirección dada de un sensor de imágenes que comprende una pluralidad de elementos fotosensibles es la inversa de la distancia entre los elementos fotosensibles adyacentes en esa dirección. La frecuencia de Nyquist del sistema de imágenes en una dirección dada corresponde a la frecuencia de Nyquist del sensor de imágenes en esa dirección, multiplicada por el factor de aumento del objetivo. Con frecuencias espaciales μ_0 , v_0 no mayores que las frecuencias de Nyquist

20 correspondientes del sensor de imágenes, la imagen del patrón distorsionado tiene que ser resuelta completamente, impidiendo de esta manera la formación de franjas de moiré. Por el contrario, el método de contorno de moiré descrito en el documento de la técnica anterior US 4.794.550 genera franjas de moiré a través de distorsión por repliegue del espectro de imagen usando patrones con frecuencias espaciales mayores que las frecuencias de Nyquist de un sistema de imágenes.

25 Si la retícula forma, por ejemplo, un patrón sinusoidal de frecuencia espacial alta de franjas rectas paralelas, la imagen sin distorsiones de la retícula en el sensor de imágenes se podría describir por la siguiente función f de las coordenadas de imagen x,y:

$$f(x,y) = I_0(1 + V_0 \cos(2\pi\mu_0 x + 2\pi v_0 y + \Phi)) \quad (1)$$

30 donde V_0 es la visibilidad del patrón de franjas sin distorsiones en el sensor de imágenes, Φ es una fase constante, e I_0 el brillo medio.

Cuando el objeto de fase y amplitud se inserta entre la retícula y el sistema de imágenes, distorsiona la imagen de la retícula en el sensor de imagen.

Una vez distorsionada, la imagen f(x,y) se puede expresar de esta manera como:

$$f(x,y) = I_0 T(x,y) (1 + V(x,y) \cos(2\pi\mu_0 x + 2\pi v_0 y + \Phi + \varphi(x,y))) \quad (2)$$

35 donde T(x,y) es la transmisión local del objeto, que se supone que varía lentamente, V(x,y) es la visibilidad local del patrón de franjas distorsionado, el cual refleja rasgos de frecuencia espacial alta del objeto, y $\varphi(x,y)$ es la fase local.

La ecuación (2) de la imagen distorsionada tiene dos términos, $f_1(x,y)$ y $f_2(x,y)$, en donde el primer término $f_1(x,y)$ es igual a $I_0 T(x,y)$, es decir, la intensidad de transmisión del objeto, cuya transformada de Fourier estará centrada sobre la frecuencia central en el dominio de frecuencia (dominio de Fourier). Suponiendo que la fase constante $\Phi = 0$, el segundo término $f_2(x,y)$ se puede expresar como sigue:

$$f_2(x,y) = I(x,y) (e^{i(2\pi\mu_0 x + 2\pi v_0 y + \varphi(x,y))} + e^{-i(2\pi\mu_0 x + 2\pi v_0 y + \varphi(x,y))}) \quad (3)$$

donde I(x,y) es real, e igual a la mitad del producto de la intensidad de transmisión $I_0 T(x,y)$ del objeto (o su intensidad de reflexión, en el caso de un objeto reflexivo) por la visibilidad local de los patrones V(x,y).

45 Dado que $f_2(x,y)$ es por sí misma la suma de dos términos que son idénticos excepto en el signo de su fase, cada espectro de primer orden de la transformada de Fourier de la imagen f(x,y) corresponderá a la transformada de

Fourier de uno de estos términos. Designando la transformada de Fourier del primero de estos dos términos como $F(\mu, \nu)$, donde μ y ν son las coordenadas de frecuencia:

$$F(\mu, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y) (e^{i(2\pi((\mu_0 - \mu)x + (\nu_0 - \nu)y) + \varphi(x, y))}) dx dy \quad (4)$$

5 En el dominio de frecuencia, dicho espectro de primer orden es de esta manera desplazado aproximadamente en (μ_0, ν_0) de la frecuencia central de la transformada de Fourier. Desplazar $F(\mu, \nu)$ hacia el centro del dominio de la frecuencia mediante un desplazamiento de coordenadas a las coordenadas (μ', ν') , en donde, por ejemplo, $\mu' = \mu - \mu_0$ y $\nu' = \nu - \nu_0$, provoca $F(\mu', \nu')$:

$$F(\mu', \nu') = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y) (e^{-i2\pi(\mu'x + \nu'y) + i\varphi(x, y)}) dx dy \quad (5)$$

10 $F(\mu', \nu')$ es la transformada de Fourier de la función compleja antes mencionada $g(x, y)$. De esta manera, llevar a cabo la transformada inversa de Fourier de $F(\mu', \nu')$ nos conducirá a esa función, y, por lo tanto, las funciones de fase e intensidad.

La fase local $\varphi(x, y)$ está relacionada con las derivadas de primer orden del frente de onda $W(x, y)$. Si las desviaciones angulares de un rayo de luz, respectivamente, en las direcciones x e y se denominan θ_x y θ_y , las tangentes de estas desviaciones angulares se expresarán como sigue:

$$15 \quad \tan(\theta_x) = \frac{\partial W(x, y)}{\partial x}, \quad \tan(\theta_y) = \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} \quad (7)$$

La fase $\varphi(x, y)$ está enlazada con estas desviaciones angulares θ_x y θ_y , a saber de la siguiente forma:

$$\varphi(x, y) = -2\pi \tan(\theta_x) h \mu_0 - 2\pi \tan(\theta_y) h \nu_0 \quad (8)$$

donde h es la distancia entre la retícula y el frente de onda, y donde se considera que un objeto de fase de potencia positiva provoca las desviaciones angulares positivas θ_x y θ_y .

20 Aunque el método de Fourier aplicado en la invención es similar a aquél aplicado en el método de perfilometría de la transformada de Fourier antes mencionado, en esas descripciones de la técnica anterior esto se usó en conjunto con una configuración óptica diferente que usa un proyector enfocado. Como resultado, la fase resultante se enlazó directamente con el perfil del objeto inspeccionado, en lugar de las derivadas de primer orden del frente de onda, como en la presente invención. Esto los hacía menos adecuados para las aplicaciones ópticas de la presente invención. Además, junto con las derivadas de primer orden del frente de onda, el método de la invención también se puede usar para detectar rasgos de frecuencia espacial alta del objeto, tales como pequeños defectos y micro grabados. Como se vio anteriormente, la función compleja $g(x, y)$ tiene una amplitud $I(x, y)$. Dado que $I(x, y) = I_0 T(x, y) V(x, y) / 2$, tales rasgos que afectan a la transmisión local, reflectancia o visibilidad del patrón de franjas del objeto se revelarán mediante esta amplitud $I(x, y)$.

30 En la US 2007/0229848 también se aplica un método de Fourier similar. No obstante, se aplica, no sobre una imagen distorsionada, resuelta completamente de un patrón de retícula, sino sobre un patrón de interferencia. No es de esta manera un método de deflectometría en el sentido de la presente invención, y no tiene los mismos resultados y aplicaciones.

35 El método de la invención puede proporcionar de esta manera tanto una forma de frente de onda general como rasgos de transmisión y reflectancia local pequeños, y esto con una configuración óptica comparativamente simple.

Ventajosamente, varios espectros de primer orden y/o superior de dicha transformada de Fourier se seleccionan y desplazan en dicho dominio de frecuencia a fin de colocarlos sustancialmente en una frecuencia central de dicha transformada de Fourier. Esto tiene la ventaja de mejorar la relación señal/ruido del método de deflectometría de la invención.

40 Ventajosamente, el método de la invención además puede comprender un paso de desenvolver dicha fase, permitiendo de esta manera la recuperación de una forma de frente de onda continua. Cómo realizar tal paso de desenvolver la fase es bien conocido por los expertos, por ejemplo a partir de Dennis C Ghiglia, Mark D. Pritt, "Two-

dimensional phase unwrapping, Theory, Algorithms and Software”, John Wiley & Sons, Inc, Nueva York, 1998, ISBN 0-471-24935-1.

5 Ventajosamente, el método de la invención puede comprender además un paso de filtrar dicha intensidad por debajo de un cierto umbral. Limitando la intensidad, es posible obtener un mapa de intensidad de alto contraste que permite un reconocimiento claro de pequeños rasgos en el objeto.

10 Ventajosamente, dichos pasos se pueden llevar a cabo con dos patrones alineados en un ángulo uno con respecto al otro. Los dos patrones se pueden usar posteriormente o simultáneamente en forma por ejemplo de una composición de dos patrones Ronchi superpuestos en la misma placa de vidrio. Procesando las imágenes distorsionadas de dos patrones diferentes, no paralelos por el método de Fourier antes mencionado, se obtienen dos fases locales $\varphi_A(x,y)$ y $\varphi_B(x,y)$. Las derivadas de primer orden locales se pueden recuperar entonces del sistema de dos ecuaciones siguiente:

$$\varphi_A(x, y) = -2\pi \frac{\partial W(x, y)}{\partial x} h\mu_{0,A} - 2\pi \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} hv_{0,A} \quad (9)$$

$$\varphi_B(x, y) = -2\pi \frac{\partial W(x, y)}{\partial x} h\mu_{0,B} - 2\pi \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} hv_{0,B} \quad (10)$$

donde $\mu_{0,A}$ y $v_{0,A}$ son las frecuencias espaciales del primer patrón en las direcciones x e y y $\mu_{0,B}$ y $v_{0,B}$ son las frecuencias espaciales del segundo patrón en las direcciones x e y.

15 Ventajosamente, dichos pasos se pueden llevar a cabo con la retícula en una primera posición con respecto al objeto y con la retícula en una segunda posición con respecto al objeto, dichas primera y segunda posiciones que están desplazadas en una distancia conocida a lo largo del camino óptico. Dado que las ecuaciones son lineales, es posible calcular la diferencia entre las fases recuperadas a partir de las imágenes del mismo patrón distorsionado por el mismo objeto y estas dos diferentes posiciones separadas por dicha distancia conocida Δh a lo largo del eje
20 óptico. Esta diferencia de fase $\Delta \varphi(x,y)$ también se puede expresar como:

$$\Delta \varphi(x, y) = -2\pi \tan(\theta_x) \Delta h \mu_0 - 2\pi \tan(\theta_y) \Delta h v_0 \quad (11)$$

De esta manera, usando los mismos dos patrones no paralelos, diferentes antes mencionados, también es posible obtener un sistema de dos ecuaciones como sigue:

$$\Delta \varphi_A(x, y) = -2\pi \frac{\partial W(x, y)}{\partial x} \Delta h \mu_{0,A} - 2\pi \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} \Delta h v_{0,A} \quad (12)$$

$$\Delta \varphi_B(x, y) = -2\pi \frac{\partial W(x, y)}{\partial x} \Delta h \mu_{0,B} - 2\pi \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} \Delta h v_{0,B} \quad (13)$$

25 Así, incluso si la distancia precisa entre la retícula y el objeto en cualquiera de las dos posiciones es bien conocida, con una diferencia de distancia conocida Δh es todavía posible recuperar las derivadas de primer orden del frente de onda en los ejes x e y.

30 En cualquiera de los dos casos, el frente de onda se puede integrar entonces a partir de sus derivadas de primer orden en los ejes x e y mediante cualquier método de integración numérica conocido por los expertos. Ejemplos de tales métodos de integración numérica se pueden encontrar en L.P. Yaroslavsky, A. Moreno, y J. Campos, “Numerical Integration of Sampled Data for Shape Measurements: Metrological Specifications”, p. 380-387, en W. Osten, “Fringe 2005”, Springer-Verlag, Berlín, 2006. Una adaptación polinómica de Zernike del frente de onda basada en las derivadas de primer orden se pueden encontrar también en Hedser van Brug, “Zernike polynomials as a basis for wave-front fitting in lateral shearing interferometry”, A.O., 36-13, p. 2.788-2.790, 1977.

35 Ventajosamente, en el método de la invención, se pueden capturar varias imágenes distorsionadas del patrón, con el objeto a varias distancias en dicho camino óptico con respecto a la retícula, y el método puede comprender además los pasos de:

- (i) capturar dichas múltiples imágenes distorsionadas del patrón a partir de dicho objeto de fase y amplitud a diversas distancias en dicho camino óptico con respecto a la retícula;

(ii) combinar dichas múltiples imágenes distorsionadas para obtener una imagen compuesta;

(iii) calcular una transformada de Fourier de dicha imagen compuesta en un dominio de frecuencia espacial;

(iv) seleccionar al menos un espectro de primer orden o superior de dicha transformada de Fourier de la imagen compuesta y desplazarlo en dicho dominio de frecuencia a fin de colocarlo sustancialmente en una frecuencia central de dicha transformada de Fourier; y

(v) llevar a cabo una transformada inversa de Fourier de dicho al menos un espectro de primer orden o superior desplazado de dicha transformada de Fourier de la imagen compuesta a fin de obtener una función compleja $g_M(x, y) = I_M(x, y)e^{i\varphi_M(x, y)}$ en donde $I_M(x, y)$ es una intensidad y $\varphi_M(x, y)$ una fase, e $I_M(x, y)$ está enlazada con el nivel de contraste en la imagen compuesta.

El análisis de la imagen compuesta usando el método de Fourier antes mencionado se puede usar para localizar el centro óptico del objeto. Un mapa de la amplitud $I_M(x, y)$ de la salida de aplicar este método de Fourier a tal imagen compuesta mostrará las franjas que corresponden a áreas de más o menos contraste, al menos una de las cuales contiene un centro óptico del objeto.

Dicha combinación se podría llevar a cabo por ejemplo mediante suma, resta o multiplicación digital de las imágenes del patrón distorsionadas.

Incluso más ventajosamente, dicho patrón puede comprender dos juegos cruzados de franjas paralelas, y dichos pasos de calcular una transformada de Fourier de la imagen compuesta, seleccionar y desplazar dicho espectro de dicha transformada de Fourier de la imagen compuesta, y llevar a cabo una transformada inversa de Fourier de dicho espectro desplazado de la transformada de Fourier de la imagen compuesta se puede llevar a cabo primero con un desplazamiento cercano a $\mu_{0,A}$ y $\nu_{0,A}$, y luego con un desplazamiento cercano a $\mu_{0,B}$ y $\nu_{0,B}$ a fin de obtener dos mapas de amplitud, respectivamente $I_{MA}(x, y)$ e $I_{MB}(x, y)$, a fin de obtener dos mapas de amplitud $I_{MA}(x, y)$ e $I_{MB}(x, y)$. Los dos patrones pueden estar en la misma retícula, por ejemplo como una composición de dos patrones Ronchi superpuestos en la misma placa de cristal. Ya que las franjas de los dos mapas de amplitud $I_{MA}(x, y)$ e $I_{MB}(x, y)$ se cruzarán, la posición de un centro óptico se puede determinar de manera más precisa en los puntos de cruce. Preferiblemente, el método de la invención puede comprender el paso de combinar dichos dos mapas de amplitud $I_{MA}(x, y)$ e $I_{MB}(x, y)$, por ejemplo mediante suma o multiplicación.

En una realización alternativa, una imagen moiré del patrón, se puede capturar o bien distorsionando por repliegue del espectro o bien mediante superposición con una retícula adicional a una distancia diferente en el eje óptico con respecto al objeto. Una transformada de Fourier de dicha imagen moiré en un dominio de frecuencia espacial se calcula y al menos un espectro de primer orden o superior de dicha transformada de Fourier de la imagen moiré se selecciona y desplaza en dicho dominio de frecuencia a fin de colocarlo en una frecuencia central de dicha transformada de Fourier. Una transformada inversa de Fourier se lleva a cabo en dicho al menos un espectro de primer orden o superior desplazado de dicha transformada de Fourier de la imagen moiré a fin de obtener una función compleja $g_M(x, y) = I_M(x, y)e^{i\varphi_M(x, y)}$ en donde $I_M(x, y)$ es una intensidad y $\varphi_M(x, y)$ una fase, e $I_M(x, y)$ está enlazada con el nivel de contraste en la imagen moiré.

Como en el caso del análisis de Fourier de la imagen compuesta antes mencionada, una mapa de la amplitud $I_M(x, y)$ de la salida de aplicar este método de Fourier a la imagen moiré mostrará las franjas que corresponden a áreas moiré de más o menos contraste, una de las cuales contiene el centro óptico del objeto.

Particularmente ventajosamente, dichos pasos se pueden llevar a cabo con la retícula en una pluralidad de diferentes distancias en el camino óptico con respecto al objeto. Cuando se varía la distancia de la retícula, estas franjas variarán, excepto para la franja que corresponde al centro óptico del objeto. El centro óptico se puede situar de esta manera más fácilmente y sin ambigüedad. En particular, sumando los mapas de amplitud, la franja que contiene el centro óptico del objeto se amplificará con respecto a las otras.

También particularmente ventajosamente, dicho patrón puede comprender dos o más conjuntos cruzados de franjas paralelas. Esto generará imágenes moiré con franjas que se cruzan, el centro óptico del objeto que está marcado por una de estas intersecciones.

En particular, dicho objeto de fase y amplitud puede ser un objeto refractivo, dicha imagen inicial que es una imagen de dicho patrón a través de dicho objeto refractivo. El método de la invención se puede usar de esta manera, por ejemplo, para la inspección óptica de lentes, tales como lentes oftalmológicas, incluyendo lentes progresivas, lentes de contacto u otras lentes con características de refracción complejas, o para la inspección óptica de placas de vidrio, láminas de plástico finas u otros objetos refractivos.

Alternativamente, dicho objeto de amplitud y fase puede ser un objeto reflexivo, dicha imagen inicial que es una imagen de dicho patrón reflejado por el objeto reflexivo. El método de deflectometría de la invención se puede usar

de esta manera también para la inspección óptica de espejos, de obleas de silicio o de otros objetos reflexivos, por ejemplo reflectores parabólicos o elípticos.

La presente invención también proporciona un sistema de deflectometría para la inspección óptica de un objeto de fase y amplitud, el sistema que comprende:

- 5 una retícula que forma un patrón periódico basado en contraste;
- un sistema de imágenes que comprende un objetivo y un sensor de imágenes que comprende una pluralidad de elementos fotosensibles;
- medios para sujetar dicho objeto en un camino óptico entre dicha retícula y el sistema de imágenes, a una distancia h de dicha retícula; y

- 10 un sistema de procesamiento de datos conectado a dicho sensor de imágenes, dicho sistema de procesamiento de datos que está programado para llevar a cabo el método de deflectometría descrito anteriormente;

caracterizado porque el sistema comprende además medios para variar la distancia relativa entre dicho objeto de fase y amplitud y dicha retícula.

- 15 Ventajosamente, dicho objetivo puede ser un objetivo telecéntrico. Este tiene la ventaja de proporcionar un factor de aumento constante independientemente de la distancia entre el objeto y el sistema de imágenes.

Ventajosamente, si dicho objeto de fase y amplitud es un objeto reflexivo, el sistema de deflectometría puede comprender además un divisor de haz para reflejar dicho patrón hacia el objeto reflexivo mientras que transmite su reflexión distorsionada hacia el sistema de imágenes. La retícula se puede desplazar de esta manera del eje óptico del sistema de imágenes, evitando de esta manera una obstrucción e interferencia.

- 20 Ventajosamente, dicho patrón puede comprender al menos un conjunto de franjas paralelas separadas por igual, preferiblemente en forma de un patrón Ronchi. Tal patrón proporciona una frecuencia portadora sin ambigüedad para el método de deflectometría de Fourier de la invención.

Ventajosamente, dichas frecuencias espaciales μ_0 , ν_0 pueden ser de alrededor de la mitad de las frecuencias de Nyquist respectivas del sistema de imágenes en dichos ejes x , y .

- 25 En una imagen distorsionada del patrón, la frecuencia espacial de la señal muestreada perpendicularmente a las franjas del patrón sería aquella de las franjas del patrón, dividida por el factor de aumento del objetivo. No obstante, el objeto puede ser uno que aumenta, al menos localmente, la frecuencia espacial de la imagen distorsionada, tal como, por ejemplo, una lente esférica divergente. Una frecuencia espacial del patrón de retícula de alrededor de la mitad de la frecuencia de Nyquist del sensor de imagen perpendicularmente a las franjas, multiplicada por el factor
- 30 de aumento del objetivo, asegurará para la mayoría de los casos prácticos un rango dinámico accesible en la imagen distorsionada de alrededor de 1/6 a 5/6 de la frecuencia de Nyquist, manteniendo de esta manera un margen de seguridad por debajo de dicha frecuencia de Nyquist de corte, y evitando de manera segura la distorsión por repliegue de espectro.

- 35 Ventajosamente, dicho patrón puede comprender dos conjuntos sustancialmente perpendiculares de franjas paralelas separadas por igual. Tal patrón facilita sustancialmente localizar el centro óptico del objeto usando la imagen de moiré digital antes mencionada, ya que generará dos conjuntos de franjas moiré que se cruzan, el centro óptico que está situado en una de las intersecciones de franja.

- 40 Ventajosamente, la retícula se puede formar mediante un patrón de contraste impreso en una placa de vidrio. Esto proporciona un patrón aún efectivo simple para el método antes mencionado. Preferiblemente, dicho patrón de contraste es un patrón litográfico de metal, que asegura una alta precisión del patrón y de esta manera un bajo ruido de señal.

Alternativamente, dicha retícula se puede formar mediante una pantalla de matriz activa, tal como, por ejemplo, una pantalla LCD. Tal pantalla de matriz activa permitirá alterar el patrón sin mover la retícula, o bien para generar patrones no paralelos, o bien para desplazar virtualmente la retícula en el camino óptico.

- 45 La presente invención se refiere también a un medio de almacenamiento de datos que comprende un conjunto de instrucciones para un sistema de procesamiento de datos para llevar a cabo un método de deflectometría según la invención; a un conjunto de señales en forma magnética, electromagnética, eléctrica y/o mecánica, que comprende un conjunto de instrucciones para un sistema de procesamiento de datos para llevar a cabo un método de deflectometría según la invención; y/o a un proceso de transmisión, a través de medios magnéticos,
- 50 electromagnéticos, eléctricos y/o mecánicos, un conjunto de instrucciones para un dispositivo de procesamiento de datos para llevar a cabo un método de deflectometría según la invención.

- 5 Como "medio de almacenamiento de datos" se entiende cualquier medio físico capaz de contener datos legibles por un dispositivo de lectura durante al menos un cierto periodo de tiempo. Ejemplos de tales medios de almacenamiento de datos son cintas y discos magnéticos, discos ópticos (solamente de lectura así como grabables o re escribibles), memorias de circuito lógico, tales como pastillas de memoria solamente de lectura, pastillas de memoria de acceso aleatorio y pastillas de memoria instantánea, e incluso medios de almacenamiento de datos más exóticos, tales como memorias químicas, bioquímicas o mecánicas.
- Se describirán ahora realizaciones particulares de la invención de una forma ilustrativa, pero no restrictiva, con referencia a las siguientes figuras:
- 10 La Fig. 1 muestra una vista esquemática de una primera realización de un sistema de deflectometría según la invención;
- La Fig. 2 muestra una vista esquemática de una segunda realización de un sistema de deflectometría según la invención;
- La Fig. 3 muestra una vista esquemática de una tercera realización de un sistema de deflectometría según la invención;
- 15 La Fig. 4 ilustra esquemáticamente la relación entre el frente de onda, ángulo de deflexión y fase;
- La Fig. 5 muestra un diagrama de flujo de una realización de un método de deflectometría según la invención;
- La Fig. 6 muestra una imagen de patrón de contraste distorsionado por un objeto de fase y amplitud en el camino óptico de dicha primera realización;
- La Fig. 6a muestra un detalle de la imagen de la Fig. 6;
- 20 La Fig. 7 muestra una transformada de Fourier de dicho patrón distorsionado en el dominio de frecuencia espacial;
- La Fig. 8 muestra un mapa de amplitud de contraste mejorado de la transformada inversa de Fourier de un espectro de primer orden desplazado de dicha transformada de Fourier;
- La Fig. 9 muestra un mapa de fase de la transformada inversa de Fourier de un espectro de primer orden desplazado de dicha transformada de Fourier;
- 25 La Fig. 10 muestra el mismo mapa de fase después de desenvolver;
- La Fig. 11 muestra la diferencia entre dos mapas de fase desenvueltos que se obtienen de dos imágenes diferentes adquiridas con el objeto a dos distancias diferentes de la retícula;
- La Fig. 12 muestra una imagen compuesta moiré obtenida restando dos imágenes del mismo patrón distorsionado por el objeto de fase y amplitud en diferentes posiciones relativas del objeto y la retícula;
- 30 La Fig. 13 muestra un mapa de amplitud de la transformada inversa de Fourier de un espectro de primer orden desplazado de la transformada de Fourier de dicha imagen moiré digital; y
- La Fig. 14 muestra un mapa de amplitud de la transformada inversa de Fourier de un espectro de primer orden desplazado de la transformada de Fourier de una imagen compuesta obtenida mediante combinación de más de dos imágenes del mismo patrón distorsionado por el objeto de fase y amplitud en posiciones relativas diferentes del objeto y la retícula.
- 35 La Fig. 1 muestra una realización preferida de un sistema de deflectometría 1 según la invención para la inspección óptica de un objeto refractivo 2. Este sistema comprende una retícula 3 y un sistema de imágenes 4 que comprende un objetivo telecéntrico 5 y un sensor de imágenes 6 conectado a un sistema de procesamiento de datos 7. El objetivo telecéntrico 5 comprende un primer conjunto de elementos ópticos 5a, una apertura 5b y posiblemente un segundo conjunto de elementos ópticos 5c. El sensor de imágenes 6 comprende una pluralidad de elementos fotosensibles, dispuestos en una formación cuadrada en esta realización particular. No obstante, disposiciones alternativas de los elementos fotosensibles se considerarían también por los expertos, según las circunstancias. La retícula 3 está en el eje óptico 8 del sistema de imágenes 4, de manera que el objeto refractivo 2 se puede colocar entre ellos a fin de ser inspeccionado ópticamente.
- 40 La retícula 3 muestra al menos un patrón periódico basado en contraste. Por ejemplo, la retícula 3 puede ser una retícula Ronchi con un patrón formado por un conjunto de franjas rectas paralelas, en donde el contraste sigue una curva sinusoidal perpendicularmente a las franjas. Dos de tales conjuntos de franjas paralelas se pueden disponer también orientados en direcciones ortogonales, a fin de formar una cuadrícula. En esta realización preferida la retícula 3 está formada por una placa de vidrio en la que se ha impreso el patrón, por ejemplo usando litografía de metal.
- 45 Alternativamente, la retícula podría estar formada por una pantalla de matriz activa, tal como una pantalla
- 50

LCD, o visualizador OLED, que permitiría alterar el patrón a voluntad. Esto podría permitir, por ejemplo, desplazar virtualmente la retícula 3 con respecto al objeto alterando la frecuencia espacial del patrón.

La Fig. 2 muestra una segunda realización, simplificada de un sistema de deflectometría 1 según la invención. Como la realización ilustrada en la Fig. 1, este sistema de deflectometría 1 comprende una retícula 3, y un sistema de imágenes 4 que comprende un objetivo 5 y un sensor de imágenes 6 conectado a un sistema de procesamiento de datos 7. Como en la realización preferida, la retícula 3 está en el eje óptico 8 del sistema de imágenes 4, de manera que un objeto refractivo 2 a ser inspeccionado ópticamente se puede insertar entre ellos. La retícula 3 también es del mismo tipo que la retícula 3 de la realización preferida. No obstante, en esta realización simplificada, el objetivo 5 no es telecéntrico y comprende una apertura 5b y un conjunto de elementos ópticos 5c.

La Fig. 3 muestra una tercera realización de un sistema deflectométrico 1 según la invención, adaptada a la caracterización óptica de un objeto reflexivo 2. Esta realización también comprende una retícula 3 y un sistema de imágenes 5. En esta realización, para evitar obstruir el camino óptico, la retícula 3 está desplazada del eje óptico 8 del sistema de imágenes 5. Sin embargo para ser capaz de tener una imagen de una reflexión de su patrón por el objeto reflexivo 2, el sistema de deflectometría 1 además comprende un divisor de haz 9 colocado en el eje óptico 8 a fin de reflejar la imagen de la retícula 3 hacia el objeto reflexivo 2, mientras que permite que al menos parte de la luz reflejada por dicho objeto reflexivo 2 atraviese hacia el sistema de imágenes 4. En este sentido, el objeto reflexivo 2 todavía puede estar colocado en un camino óptico entre la retícula 3 y el sistema de imágenes 4. Como en la primera realización, el sistema de imágenes 5 comprende un objetivo telecéntrico 5 y un sensor de imágenes 6. El objetivo telecéntrico 5 comprende un primer conjunto de elementos ópticos 5a, una apertura 5b y un segundo conjunto de elementos ópticos 5c. No obstante, los expertos también contemplarían realizaciones alternativas con un sistema de imágenes simplificado como en la segunda realización. La retícula 3 también puede ser de los mismos tipos que aquéllas de la primera y segunda realizaciones.

A fin de inspeccionar un objeto refractivo en la primera o segunda realizaciones, o un objeto reflexivo en la tercera realización, según el método de caracterización óptica de la invención, el objeto se inserta en el camino óptico entre la retícula 3 y el sistema de imágenes 5, como se muestra en las Fig. 1-3, de manera que distorsionará la imagen de la retícula 3 capturada por el sensor de imágenes 6.

Una realización del método de deflectometría de la invención se describirá ahora con la inspección óptica de una lente de corrección progresiva oftalmológica que usa el sistema de deflectometría 1 ilustrado en la Fig. 1 como ejemplo.

En un primer paso 501 de este método de deflectometría, como se ilustra en la Fig. 5, una imagen distorsionada 601 de una retícula Ronchi 3 con un patrón de frecuencia espacial alto diagonal de franjas paralelas 602, como se ve a través de este objeto de fase y amplitud 2 y el objetivo telecéntrico 5, se captura por el sensor de imágenes 6. Tal imagen distorsionada 601 se ilustra en la Fig. 6. Un detalle 601a de esta imagen 601 se ilustra en la Fig. 6a, que muestra cómo el patrón está distorsionado localmente por un micro grabado de identificación del objeto 2.

Esta imagen 601 se puede procesar entonces directamente en el sistema de procesamiento de datos 7 en el paso 502 realizando una transformada de Fourier. Dado que esta imagen 601 se captura por una formación 2D de elementos fotosensibles discretos, esta transformada de Fourier será una Transformada de Fourier Discreta (DFT) 2D. Un método numérico particularmente ventajoso para hacer esto es el método de Transformada Rápida de Fourier (FFT). La Fig. 7 ilustra esta transformada de Fourier en escala logarítmica en el dominio de la frecuencia. Esta transformada de Fourier muestra un pico central 701, que corresponde a su espectro de orden 0, y dos espectros de primer orden 702, desplazados en el dominio de la frecuencia, con respecto al pico central 701, aproximadamente en las frecuencias espaciales μ_0 y ν_0 del patrón de franjas, respectivamente, en los ejes x e y en el plano de imagen.

En un siguiente paso 503, uno de dichos espectros de primer orden 702 se selecciona y desplaza hacia la frecuencia central de la transformada de Fourier. Esto se puede hacer, por ejemplo, seleccionando, en dicha transformada de Fourier, una región de frecuencia cerrada que comprende dicho espectro de primer orden 702, filtrando el resto de la transformada de Fourier y luego realizando un cambio de coordenadas a fin de colocar sustancialmente dicho espectro de primer orden en las coordenadas de frecuencia central de la transformada de Fourier. Dado que los espectros de primer orden 702 se desplazarán aproximadamente en (μ_0, ν_0) de las coordenadas de la frecuencia central de la transformada de Fourier, esto se puede realizar mediante un desplazamiento de coordenadas a las coordenadas (μ', ν') , en donde $\mu' = \mu - \mu_0$ y $\nu' = \nu - \nu_0$. Se debe señalar que se podría aplicar un desplazamiento diferente, pero que esta diferencia de desplazamiento tendría que ser compensada después, por ejemplo, mediante un desplazamiento de fase lineal correspondiente. Esto podría ser útil, por ejemplo si el objeto 2 era una lente de potencia intensa, que produce espectros de primer orden 702 desplazados de las coordenadas de la frecuencia central por frecuencias significativamente diferentes de (μ_0, ν_0) .

Se debería señalar, que, para mejorar la relación señal/ruido de este método de deflectometría, también sería posible seleccionar no sólo uno, sino varios, espectros de primer orden o superior y desplazar todos ellos secuencialmente hacia las coordenadas de la frecuencia central. Para cada uno de ellos, se puede recuperar un mapa de fase, y se pueden recombinar varios mapas de fases.

En el paso 504, se realiza entonces una transformada inversa de Fourier en este espectro de primer orden 702 desplazado, provocando una formación compleja de puntos. Mapear la amplitud de esta formación compleja en un paso 505 provoca un mapa de amplitud que revela pequeños rasgos, tales como abolladuras, arañazos o micro grabados, que afectan localmente la transparencia del objeto 2. Dado que este método revela rasgos de un tamaño de la misma magnitud que la distancia entre franjas en el patrón de retícula, y en este método la frecuencia espacial de ese patrón puede ser particularmente alta, es posible de esta manera revelar rasgos particularmente pequeños que no serían fácilmente detectados por otros métodos de deflectometría. Un paso adicional 506 puede mejorar el contraste filtrando esta amplitud por debajo de un cierto umbral y fijando todas las posiciones por encima de ese umbral en un valor máximo. El resultado de tal paso de mejora de contraste 506 se ilustra en la Fig. 8. Como se puede ver en esa figura, el micro grabado 801 es claramente visible, como lo son pequeños arañazos, abolladuras y marcas 802 en el objeto 2. En combinación con el reconocimiento de carácter automático del micro grabado 801, esto se puede usar para automatizar el proceso de inspección.

En paralelo al paso de mapeado de amplitud 505, también se puede realizar un paso de mapeado de fase 507. Esto provoca un mapa de fase envuelto como se muestra en la Fig. 9. Este mapa de fase envuelto entonces se puede desenvolver por medios convencionales en el paso 508, provocando el mapa de fase desenvuelto mostrado en la Fig. 10.

Esta fase $\varphi(x,y)$ está relacionada con la desviación angular de los rayos de luz 401 y la derivada de primer orden del frente de onda 402, como se ve en las ecuaciones antes mencionadas (7) y (8) y se ilustra en la Fig. 4. Si los pasos 501-504 y 507, 508 se realizan de nuevo con la retícula 3 desplazada a una distancia diferente con respecto al objeto, provocará un mapa de fase diferente. Calcular en el siguiente paso 509 las diferencias de fase $\Delta \varphi$ entre los mapas provoca un mapa de diferencia de fase como se muestra en la Fig. 11. Esta diferencia de fase en cada punto es proporcional a la derivada de primer orden del frente de onda perpendicularmente a las franjas paralelas. El ángulo de desviación de luz θ perpendicularmente a las franjas se puede recuperar en el siguiente paso 509 con la ecuación:

$$\theta(x, y) = \arctan\left(\frac{-p\Delta\varphi(x, y)}{2\pi\Delta h}\right) \quad (14)$$

donde p es el periodo del patrón (es decir, la inversa de la frecuencia espacial) en la retícula 3, y $\Delta \varphi$ y Δh las diferencias de fase y distancia, respectivamente. Para recuperar las derivadas de primer orden en dos direcciones diferentes, se pueden repetir los mismos pasos después de girar el patrón en un cierto ángulo en el plano de la retícula 3. Las derivadas de primer orden en las direcciones x e y se pueden recuperar entonces usando las ecuaciones antes mencionadas (12) y (13). El frente de onda también se puede reconstruir mediante integración numérica de esas derivadas de primer orden.

Si la distancia h entre el objeto 2 y la retícula 3 es conocida, no será necesario calcular las diferencias de fase entre los dos de tales mapas de fase obtenidos a diferentes distancias h entre la retícula 3 y el objeto 2. En su lugar, si se calcula una fase de referencia φ_0 realizando dicho método de Fourier, es decir, los pasos 502-504, sobre una imagen no distorsionada de la retícula 3 con el objeto 2 quitado del camino óptico, se puede calcular el ángulo de desviación de luz local a partir de la ecuación:

$$\theta(x, y) = \arctan\left(p\frac{(\varphi(x, y) - \varphi_0(x, y))}{2\pi h}\right) \quad (15)$$

La apertura numérica AN del objetivo telecéntrico 5 se adaptará a la frecuencia del patrón. Puede ser aproximadamente $1,22 \lambda/p$, donde λ es la longitud de onda. Si el objeto 2 se saca fuera del foco en una distancia h, la incertidumbre espacial se puede evaluar como $2,44 \lambda/ph$, para una distancia suficientemente grande h.

La fase recuperada según este nuevo método aquí es equivalente a la fase recuperada por el método de Desplazamiento de fase Schlieren, como se describe, por ejemplo en la Solicitud de Patente de EE.UU. US 2005/036153 A1. Se puede procesar de esta manera de la misma forma para extraer cualquier parámetro de interés, y entre otros la reconstrucción del frente de onda, el cálculo de los perfiles de superficie refractivos o reflexivos.

El método de Fourier, es decir, los pasos 502-504, también se puede aplicar a una imagen compuesta como se ilustra en la Fig. 12. Tal imagen compuesta se puede crear o bien superponiendo dos retículas 3 de desplazamiento axialmente para obtener una imagen moiré, o combinando, digitalmente o de otro modo, las imágenes distorsionadas de la misma retícula 3 a diferentes distancias del objeto 2. Las imágenes se pueden combinar en un paso 510 mediante cualquier operación matemática adecuada, tal como, por ejemplo, resta, suma o multiplicación. Alternativamente, se puede obtener una imagen moiré similar distorsionando por repliegue del espectro.

Un paso posterior 511 de mapeado de amplitud $I_M(x,y)$ de la salida de aplicar este método de Fourier, con desplazamientos de coordenadas en el dominio de Fourier iguales o cercanos a las frecuencias portadoras μ_0 y ν_0 , a tal imagen compuesta en un paso 511 revelará áreas de más o menos contraste dependiendo de las operaciones matemáticas que se realizaron para generar la imagen compuesta. Si se usó la suma, el paso 511 revelará las áreas de más contraste, mientras que si se usó la resta, el paso 511 revelará las áreas moiré de menos contraste, por ejemplo. Esto se ilustra mediante el mapa de amplitud mostrado en la Fig. 13. Si se varía la distancia h de la retícula, estas áreas moiré de más o menos contraste variarán, excepto para un área que comprende un centro óptico del objeto 2, es decir, un punto del objeto 2 donde no hay deflexión óptica. Dado que el desplazamiento tiene lugar a lo largo del eje óptico, combinar una pluralidad de tales mapas de intensidad revelará una única zona de amplitud baja en donde estará situado el centro óptico.

Si se puede cambiar arbitrariamente la distancia h entre el objeto 2 y la retícula 3, se pueden aplicar pequeños pasos primero para situar aproximadamente el centro óptico, seguido por desplazamientos más grandes para refinar la posición del centro óptico.

También es posible detectar sin ambigüedad el centro óptico aplicando el método de Fourier antes mencionado a una combinación (por ejemplo suma, resta o multiplicación) de más de dos imágenes distorsionadas, por ejemplo 15, capturadas con diferentes distancias h entre la retícula 3 y el objeto 2. El al menos un centro óptico entonces se encuentra en un máximo 1401 del mapa de amplitud resultante, como se muestra en la Fig. 14. Qué máximos corresponden a los centros ópticos se puede determinar mediante umbrales.

En una realización preferida, se usa un patrón que presenta una estructura periódica en dos direcciones diferentes, por ejemplo una cuadrícula obtenida superponiendo dos patrones Ronchi dispuestos ortogonalmente. Entonces es posible llevar a cabo el método de Fourier antes mencionado primero con un desplazamiento cercano a $\mu_{0,A}$, $\nu_{0,A}$, y luego con un cambio cercano a $\mu_{0,B}$, $\nu_{0,B}$, a fin de obtener dos mapas de amplitud, serían obtenidas respectivamente $I_{MA}(x,y)$ e $I_{MB}(x,y)$ con franjas de amplitud baja que se cruzan, sus intersecciones que indican un centro óptico efectivo potencial. Preferiblemente, combinar estos mapas de amplitud $I_{MA}(x,y)$ e $I_{MB}(x,y)$, por ejemplo mediante una multiplicación, y luego poniendo umbrales al mapa compuesto resultante revela el centro o centros ópticos.

Usar la primera realización del sistema de deflectometría de la invención, como se ilustra en Figura 1, será necesario para conocer el factor de aumento a fin de ser capaz de integrar las derivadas del frente de onda y calcular por ello el frente de onda. El factor de aumento se puede obtener directamente por análisis de la imagen del patrón de frecuencia espacial alta, que se supone que es conocido con precisión. Las no linealidades locales del objetivo 5 se pueden corregir por ejemplo mediante el análisis de la fase de referencia φ_0 que se obtiene realizando el método de Fourier sobre una imagen no distorsionada del patrón en ausencia de cualquier objeto de fase y amplitud 2 en el camino óptico entre la retícula 3 y el sistema de imágenes 4. La ventaja de un objetivo telecéntrico 5 es que el factor de aumento es independiente de la distancia entre el objeto 2 y el objetivo 5, de manera que o bien la retícula 3 o bien el objeto 2 se puede mover a fin de variar su distancia relativa h .

Cuando se usa un sistema de deflectometría como se ilustra en la Fig. 2 donde el objetivo 5 no es telecéntrico, se pueden realizar los mismos pasos que se describieron aquí anteriormente, pero la distancia desde el objeto 2 a la apertura 5b tendrá que ser conocida para evaluar el factor de aumento. En este caso, la detección del centro óptico llega a ser más complicada. La opción más simple es trasladar la retícula 3 a lo largo del camino óptico, y restar a la imagen distorsionada, la imagen de referencia de la retícula 3 en ausencia del objeto 2, para la misma posición de la retícula 3. No obstante, esto sería factible solamente para lentes delgadas. Sin embargo, por lo que respecta a la inspección estética o de micro grabados, esta realización no presenta ningún inconveniente.

También es posible recuperar el ángulo de desviación de luz θ cambiando la distancia entre el objeto 2 y la apertura 5b, mientras que se mantiene una distancia constante h entre la retícula 3 y el objeto 2. En esta realización del método de deflectometría de la invención, a fin de mantener el factor de aumento constante, la apertura 5b se puede trasladar a lo largo del eje óptico 8 del sistema de imágenes 4.

Un objeto 2 reflexivo se puede inspeccionar aplicando los mismos métodos, por ejemplo, con el sistema de deflectometría 1 de la Fig. 3.

Aunque la presente invención se ha descrito con referencia a realizaciones ejemplares específicas, será evidente que se pueden hacer diversas modificaciones y cambios a estas realizaciones sin apartarse del alcance más amplio de la invención que se expone en las reivindicaciones. Por consiguiente, la descripción y dibujos tienen que ser considerados en un sentido ilustrativo en lugar de en un sentido restrictivo.

REIVINDICACIONES

1. Un método de deflectometría para la inspección óptica de un objeto de fase y amplitud (2) colocado en un camino óptico entre una única retícula (3) y un sistema de imágenes (4), dicho objeto de fase y amplitud (2) que está a una distancia h de la retícula (3) en una primera posición, la retícula (3) que forma un patrón periódico basado en contraste con: las frecuencias espaciales μ_0, ν_0 , respectivamente, en los ejes ortogonales x, y en un plano de imagen, el sistema de imágenes (4) que comprende un objetivo (5) y un sensor de imágenes (6) que tiene una pluralidad de elementos fotosensibles, en donde dichas frecuencias espaciales μ_0, ν_0 no son mayores que la mitad de las frecuencias de muestreo respectivas del sistema de imágenes (4) en dichos ejes x, y , el método que comprende los pasos de:
- 5 a) capturar, a través del objetivo (5) con el sensor de imágenes (6), una imagen (601) de dicho patrón periódico basado en contraste distorsionado por el objeto de fase y amplitud (2);
- b) calcular una transformada de Fourier de dicha imagen (601) en un dominio de frecuencia espacial, dicha transformada de Fourier de dicha imagen que comprende un espectro de orden cero (701) y al menos dos espectros de primer orden o superior (702) desplazados en el dominio de frecuencia con respecto al espectro de orden cero (701) por dichas frecuencias espaciales μ_0, ν_0 de dicho patrón periódico basado en contraste en los ejes x e y en el plano de imagen;
- 15 c) seleccionar al menos uno de dicho espectro de primer orden o superior (702) de dicha transformada de Fourier y desplazarlo en dicho dominio de frecuencia a fin de colocarlo sustancialmente en una frecuencia central de dicha transformada de Fourier;
- d) llevar a cabo una transformada inversa de Fourier de dicho al menos un espectro de primer orden o superior (702) de dicha transformada de Fourier a fin de obtener una función compleja $g(x,y) = I(x,y)e^{i\varphi(x,y)}$, en donde $I(x,y)$ es una intensidad y $\varphi(x,y)$ una fase enlazada a los ángulos de deflexión óptica θ_x, θ_y en, respectivamente, las direcciones de los ejes x e y , según la siguiente fórmula: $\varphi(x,y) = -2\pi h(\mu_0 \tan \theta_x + \nu_0 \tan \theta_y)$; y
- 20 e) desenvolver dicha fase;
- caracterizado porque el método además comprende los pasos de:
- f) repetir los pasos a) a e) para una segunda posición de la retícula (3) con respecto al objeto de fase y amplitud (2) donde la diferencia de distancia entre la primera posición y la segunda posición es Δh ; y
- 30 g) determinar una diferencia de fase a partir de la fase determinada en cada una de las primera y segunda posiciones.
2. El método de deflectometría según la reivindicación 1, en donde varios espectros de primer orden y/o superior (702) de dicha transformada de Fourier se seleccionan y desplazan en dicho dominio de frecuencia a fin de colocarlos sustancialmente en una frecuencia central de dicha transformada de Fourier.
3. El método de deflectometría según la reivindicación 1 o 2, en donde dichos pasos se llevan a cabo con dos patrones cruzados en un ángulo uno con respecto al otro.
4. El método de deflectometría según cualquiera de las reivindicaciones previas, que además comprende los pasos de:
- (i) capturar múltiples imágenes distorsionadas del patrón desde dicho objeto de fase y amplitud (2) a diversas distancias en dicho camino óptico con respecto a la retícula (3);
- 40 (ii) combinar dichas múltiples imágenes distorsionadas para obtener una imagen compuesta;
- (iii) calcular una transformada de Fourier de dicha imagen compuesta en un dominio de frecuencia espacial;
- (iv) seleccionar al menos un espectro de primer orden o superior de dicha transformada de Fourier de la imagen compuesta y desplazarlo en dicho dominio de frecuencia a fin de colocarlo sustancialmente en una frecuencia central de dicha transformada de Fourier; y
- 45 (v) llevar a cabo una transformada inversa de Fourier de dicho al menos un espectro de primer orden o superior desplazado de dicha transformada de Fourier de la imagen compuesta a fin de obtener una función compleja $g_M(x,y) = I_M(x,y)e^{i\varphi_M(x,y)}$ en donde $I_M(x,y)$ es una intensidad y $\varphi_M(x,y)$ una fase, e $I_M(x,y)$ está enlazada

con el nivel de contraste en la imagen compuesta.

5. El método de deflectometría según la reivindicación 4, en donde dicho patrón comprende dos conjuntos cruzados de franjas paralelas con diferentes frecuencias espaciales ($\mu_{0,A}$, $\nu_{0,A}$; $\mu_{0,B}$, $\nu_{0,B}$) y dichos pasos de calcular una transformada de Fourier de la imagen compuesta, seleccionar y desplazar dicho espectro de dicha transformada de Fourier de la imagen compuesta, y llevar a cabo una transformada inversa de Fourier de dicho espectro desplazado de la transformada de Fourier de la imagen compuesta se puede llevar a cabo primero con un desplazamiento cercano a $\mu_{0,A}$, $\nu_{0,A}$, y luego con un desplazamiento cercano a $\mu_{0,B}$, $\nu_{0,B}$ a fin de obtener dos mapas de amplitud, respectivamente $I_{MA}(x,y)$ e $I_{MB}(x,y)$.
6. El método de deflectometría según la reivindicación 5, que además comprende un paso de combinar dichos dos mapas de amplitud mediante superposición, suma, y/o multiplicación.
7. El método de deflectometría según cualquiera de las reivindicaciones previas, en donde dicho objeto de fase y amplitud (2) es un objeto refractivo, y dicha primera imagen es una imagen de dicho patrón a través de dicho objeto refractivo.
8. El método de deflectometría según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en donde dicho objeto de fase y amplitud (2) es un objeto reflexivo, y dicha primera imagen es una imagen de dicho patrón reflejado por el objeto reflexivo.
9. Un sistema de deflectometría (1) para la inspección óptica de un objeto de fase y amplitud (2), el sistema que comprende;
- una retícula (3) que forma un patrón periódico basado en contraste;
- un sistema de imágenes (4) que comprende un objetivo (5) y un sensor de imágenes (6) que comprende una pluralidad de elementos fotosensibles;
- medios para sostener dicho objeto (2) en un camino óptico entre dicha retícula (3) y el sistema de imágenes (4), a una distancia h de dicha retícula (3); y
- un sistema de procesamiento de datos (7) conectado a dicho sensor de imágenes (6), dicho sistema de procesamiento de imágenes (7) que está programado para llevar a cabo el método de deflectometría según cualquiera de las reivindicaciones precedentes;
- caracterizado porque el sistema además comprende medios para variar la distancia relativa entre dicho objeto de fase y amplitud (2) y dicha retícula (3).
10. El sistema de deflectometría según la reivindicación 9, en donde dicho objetivo (5) es un objetivo telecéntrico.
11. El sistema de deflectometría según la reivindicación 9 o 10, en donde dicho objeto de fase y amplitud (2) es un objeto reflexivo, el sistema de deflectometría que además comprende un divisor de haz (8) para reflejar dicho patrón hacia el objeto reflexivo (2) mientras que transmite su reflexión distorsionada hacia el sistema de imágenes (4).
12. El sistema de deflectometría según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 11, en donde dicho patrón comprende al menos un conjunto de franjas paralelas separadas por igual, preferiblemente en forma de un patrón Ronchi.
13. El sistema de deflectometría según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 12, en donde esas franjas paralelas separadas por igual de dichas frecuencias espaciales μ_0 , ν_0 son alrededor de 1/2 de las frecuencias de Nyquist respectivas de dicho sistema de imágenes (4) en dichos ejes x , y .
14. El sistema de deflectometría según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 13, en donde dicho patrón comprende dos conjuntos sustancialmente perpendiculares de franjas paralelas separadas por igual.
15. El sistema de deflectometría según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 14, en donde dicha retícula (3) está formada por un patrón de contraste, preferiblemente un patrón litográfico de metal, impreso en una placa de vidrio.
16. El sistema de deflectometría según cualquiera de las reivindicaciones 13 a 14, en donde dicha retícula (3) está formada por una pantalla de matriz activa, tal como, por ejemplo, una pantalla LCD.

45

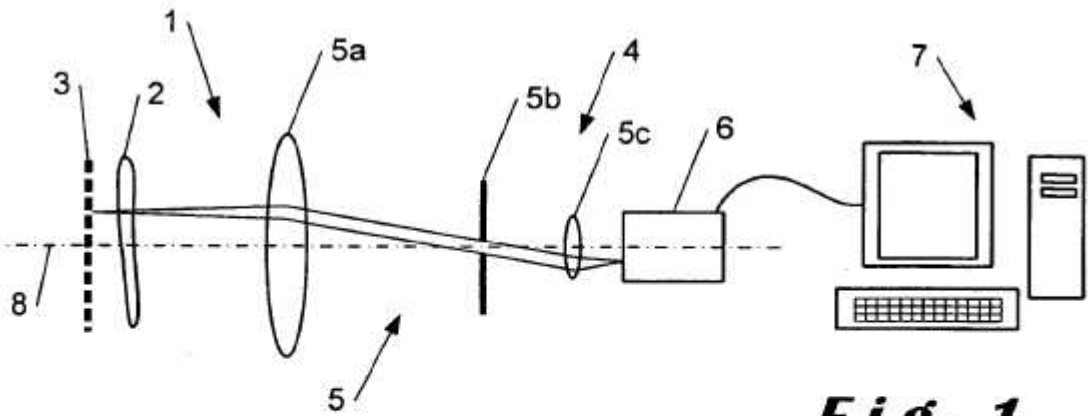


Fig. 1

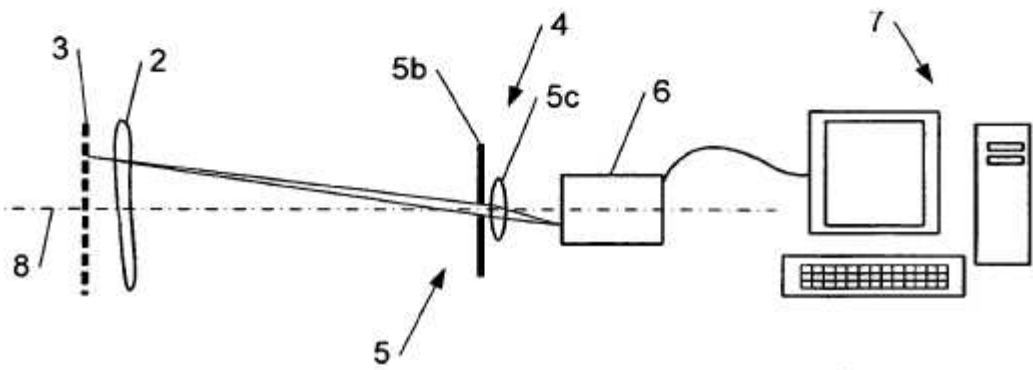


Fig. 2

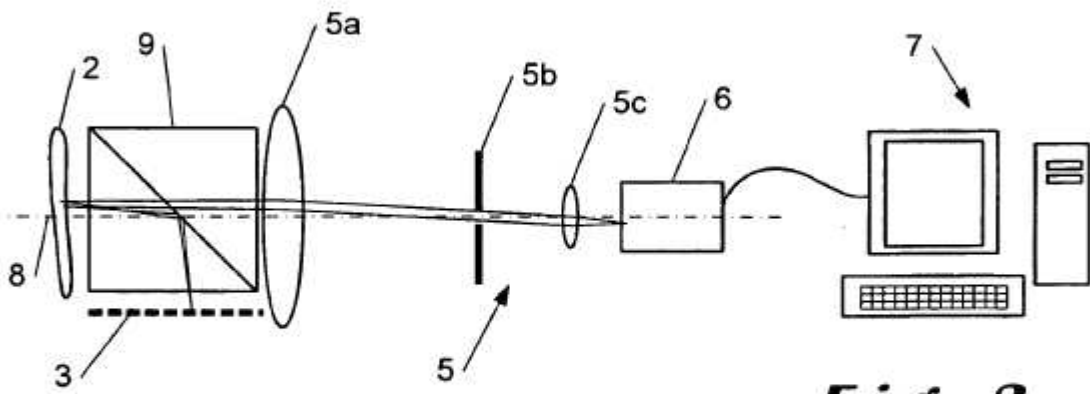


Fig. 3

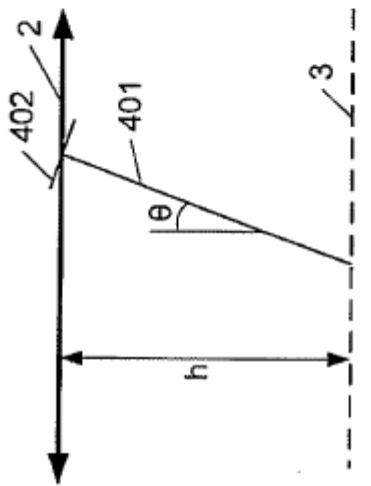


Fig. 4

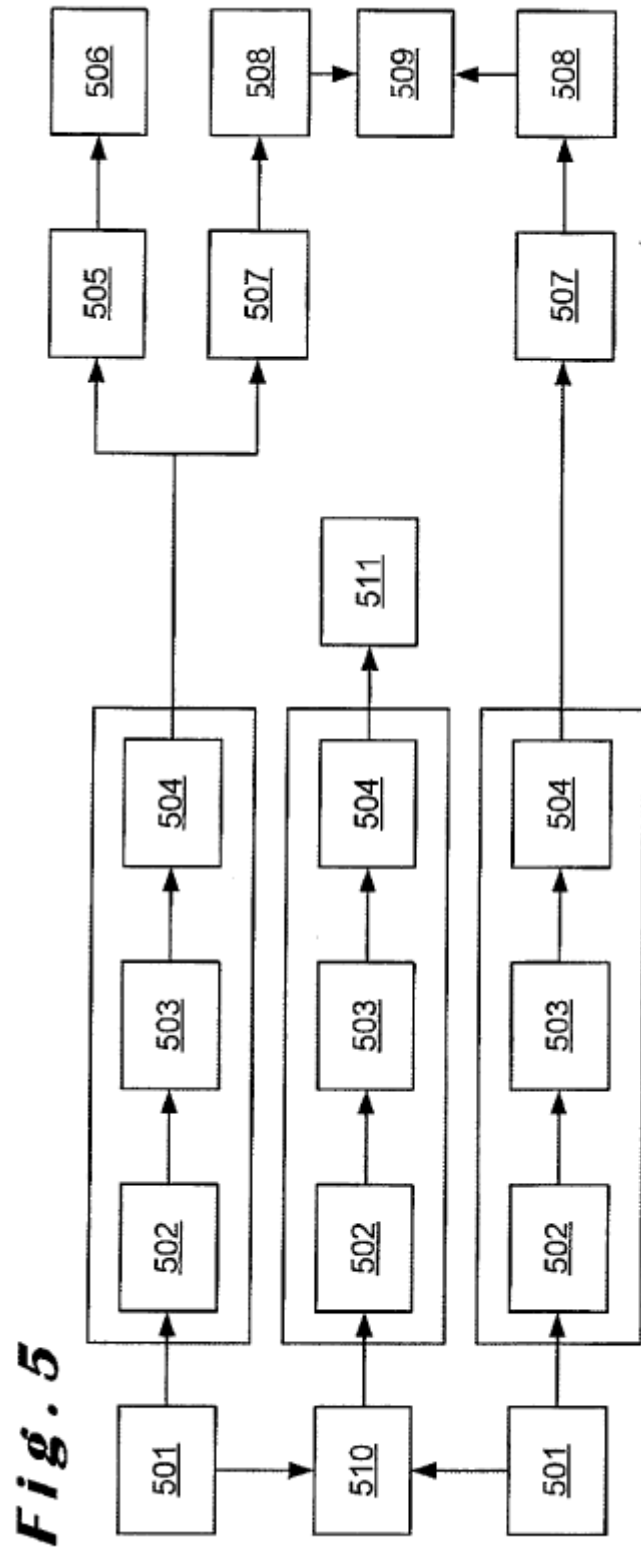


Fig. 5

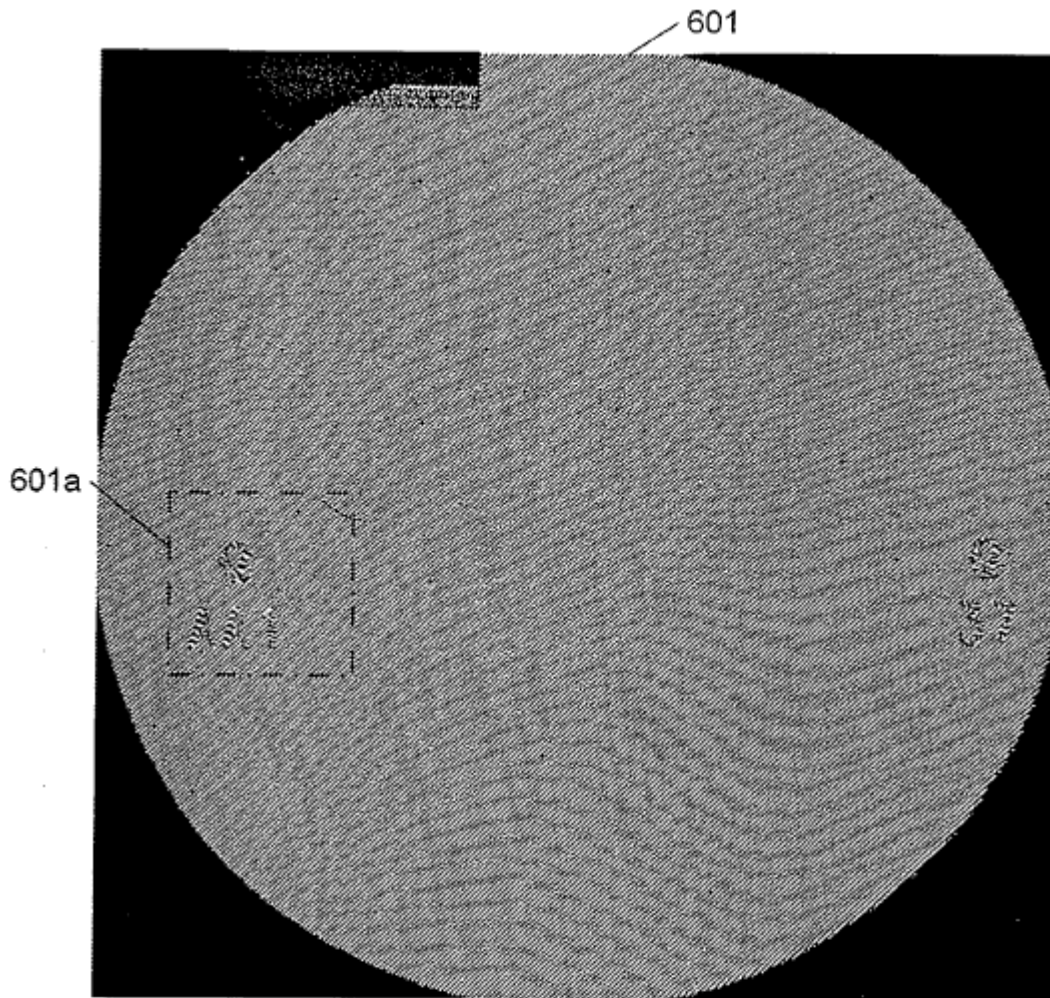


Fig. 6

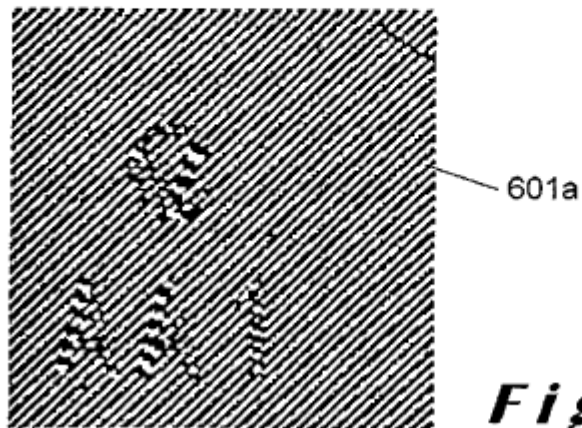


Fig. 6A

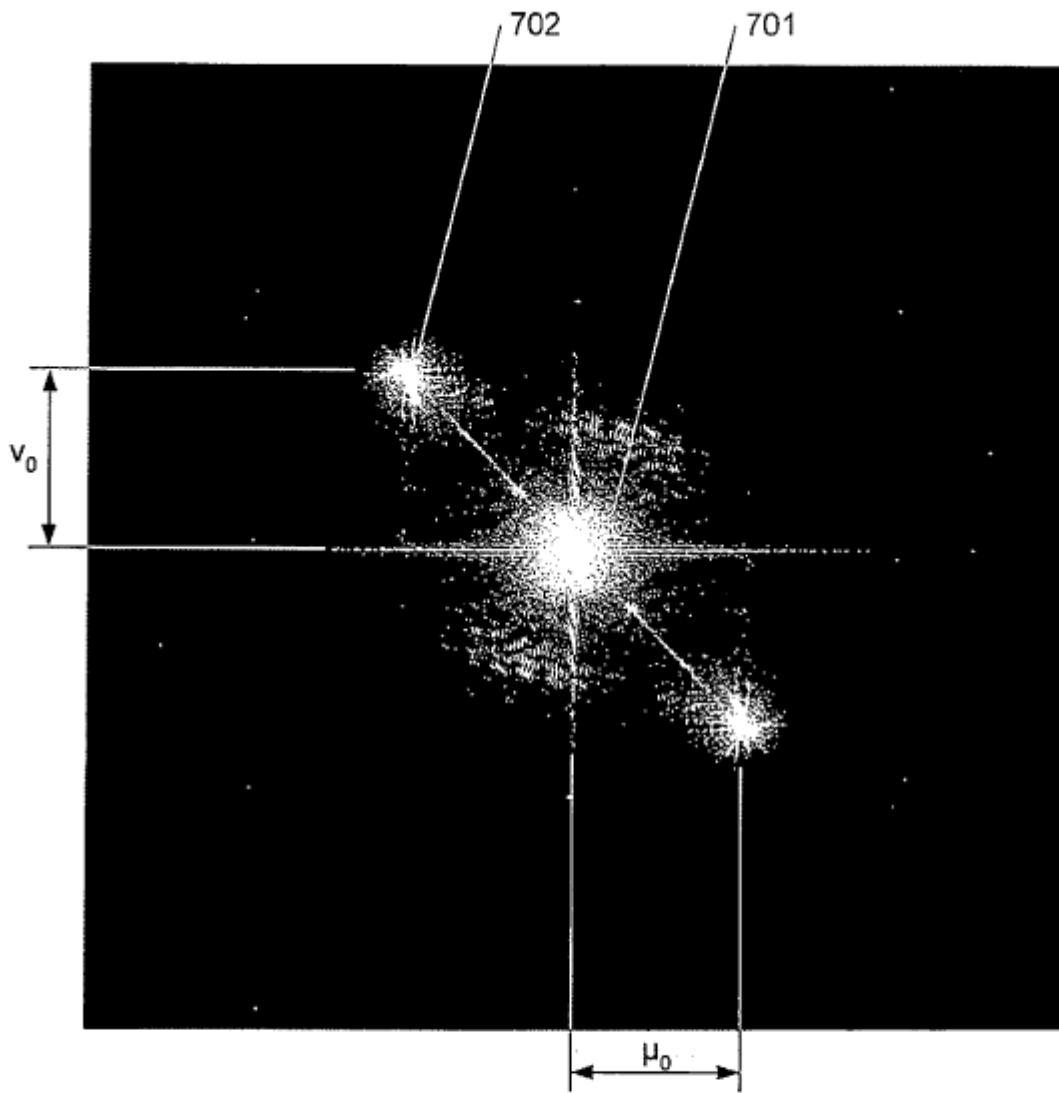


Fig. 7

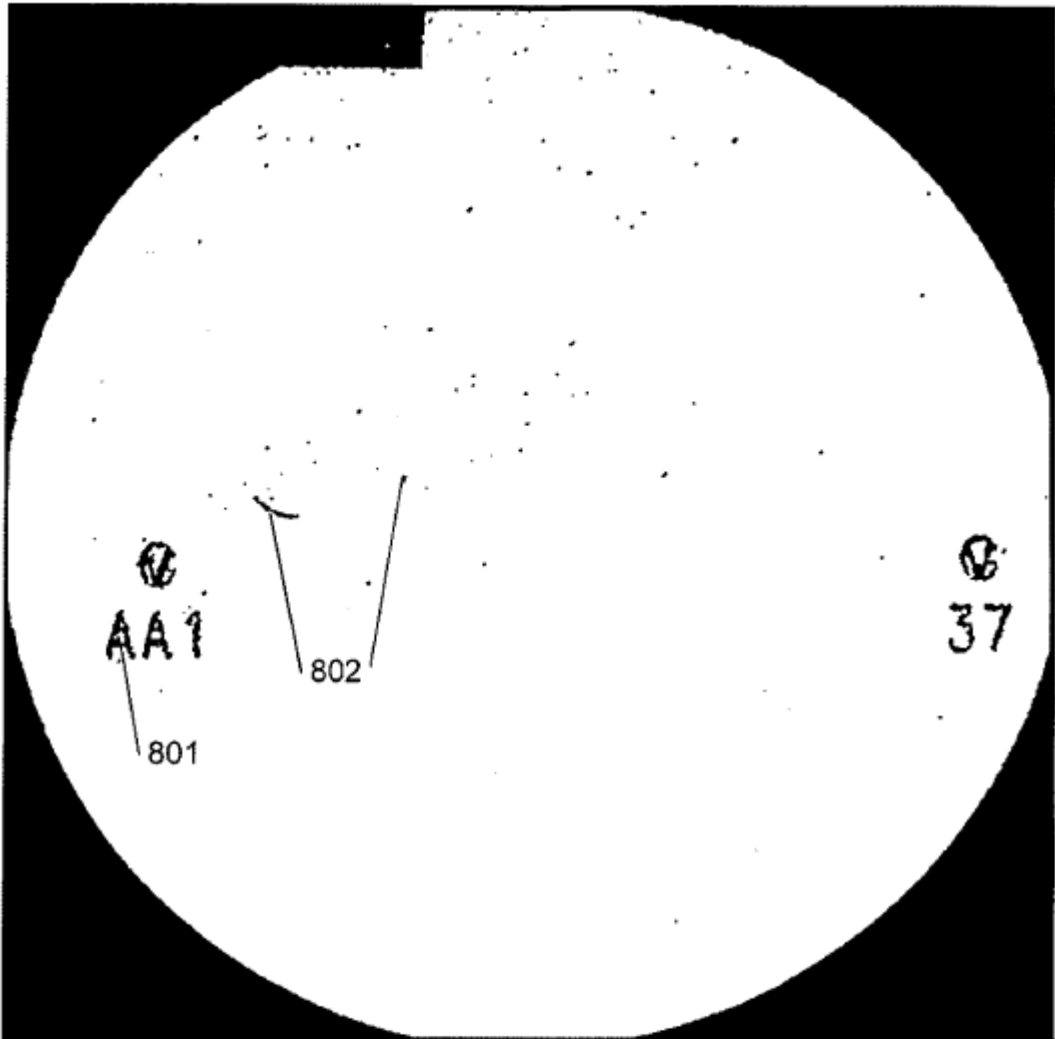


Fig. 8

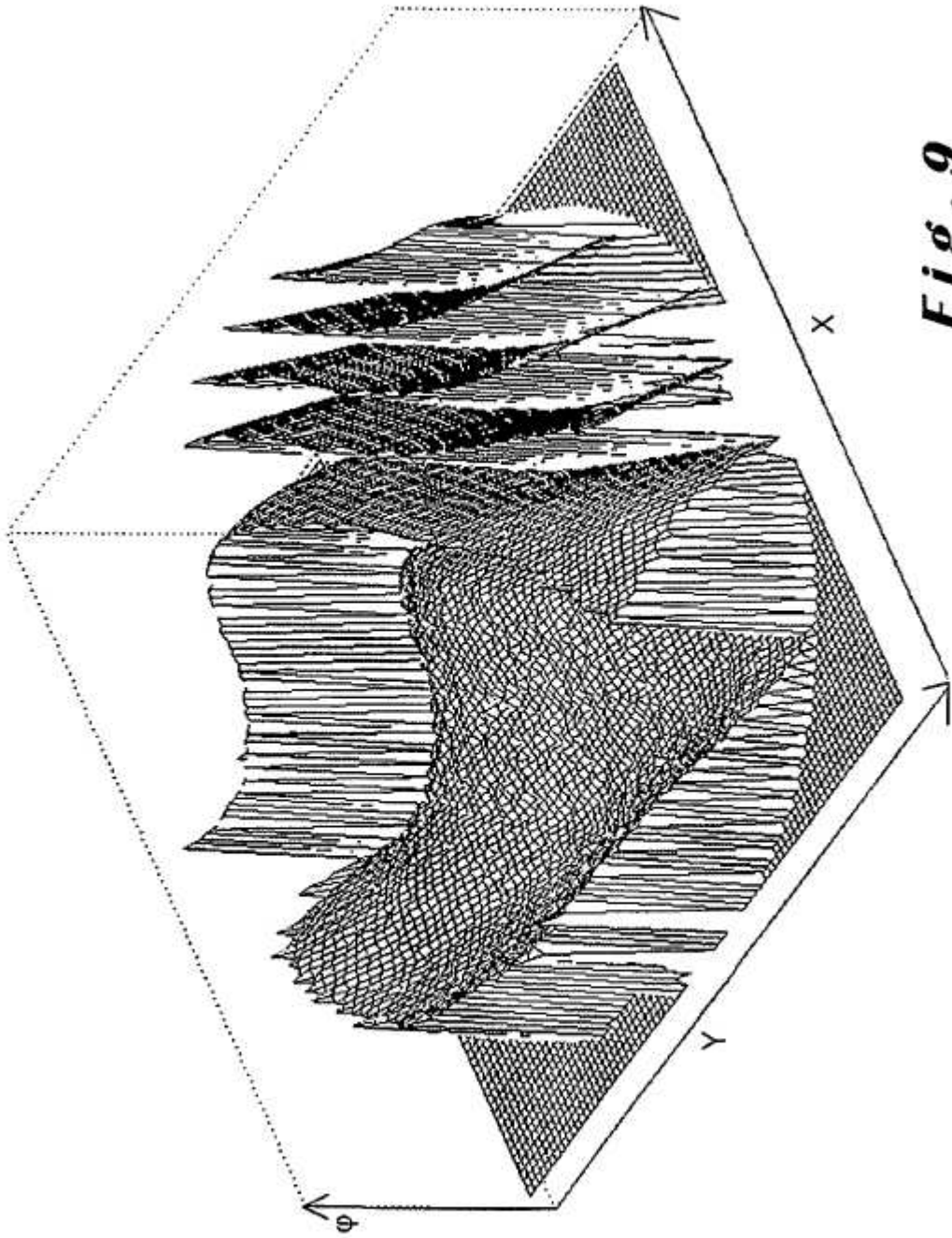


Fig. 9

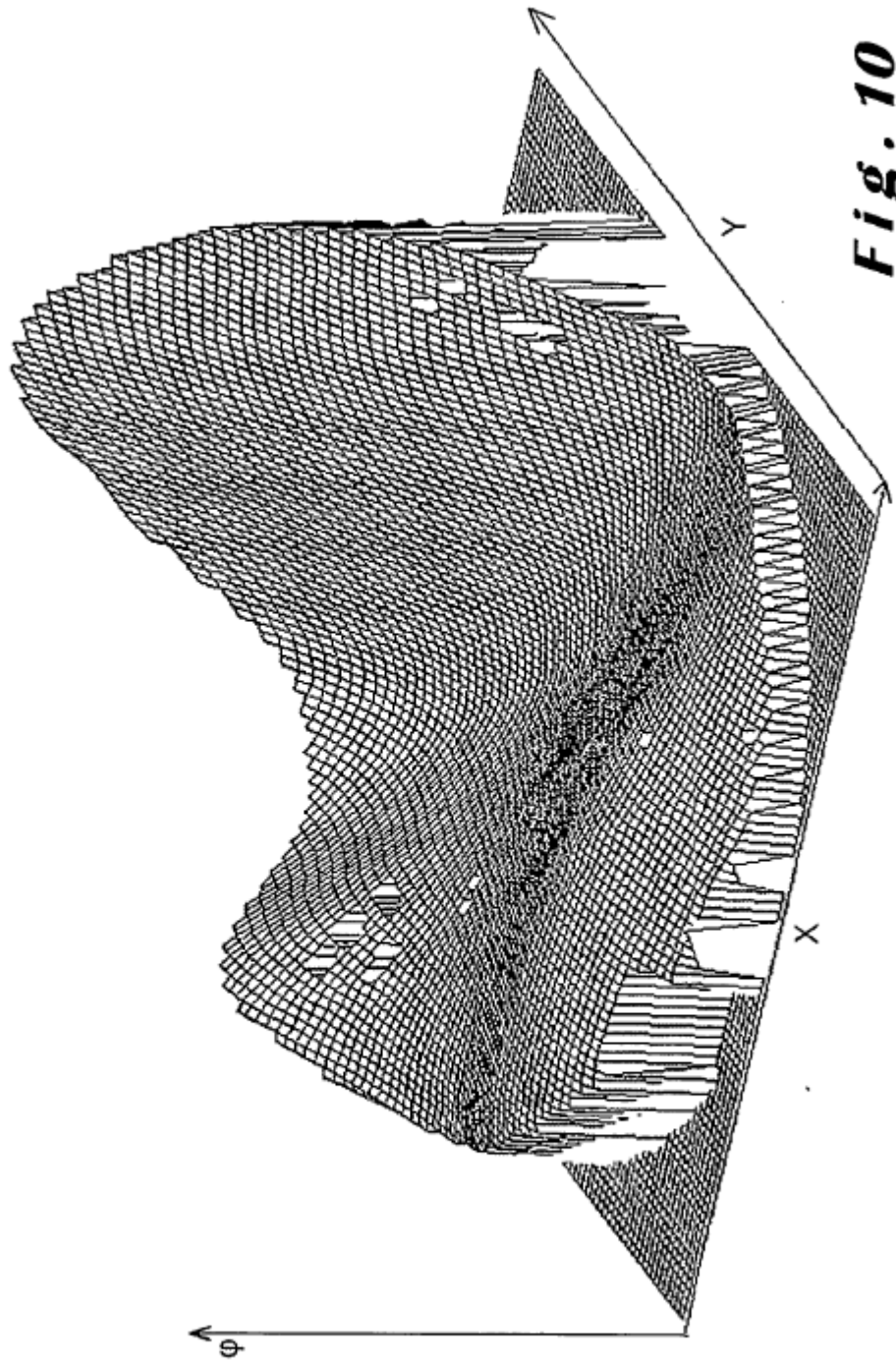


Fig. 10

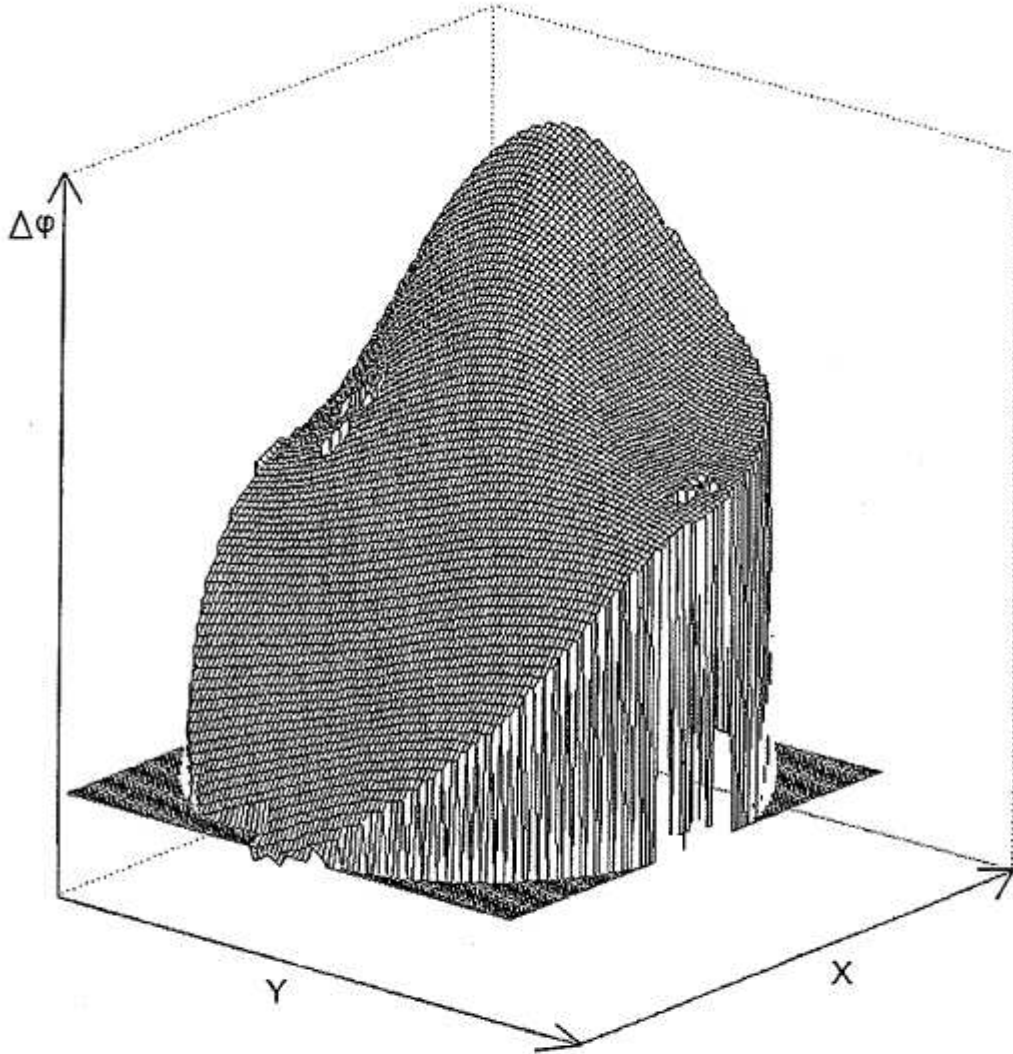


Fig. 11

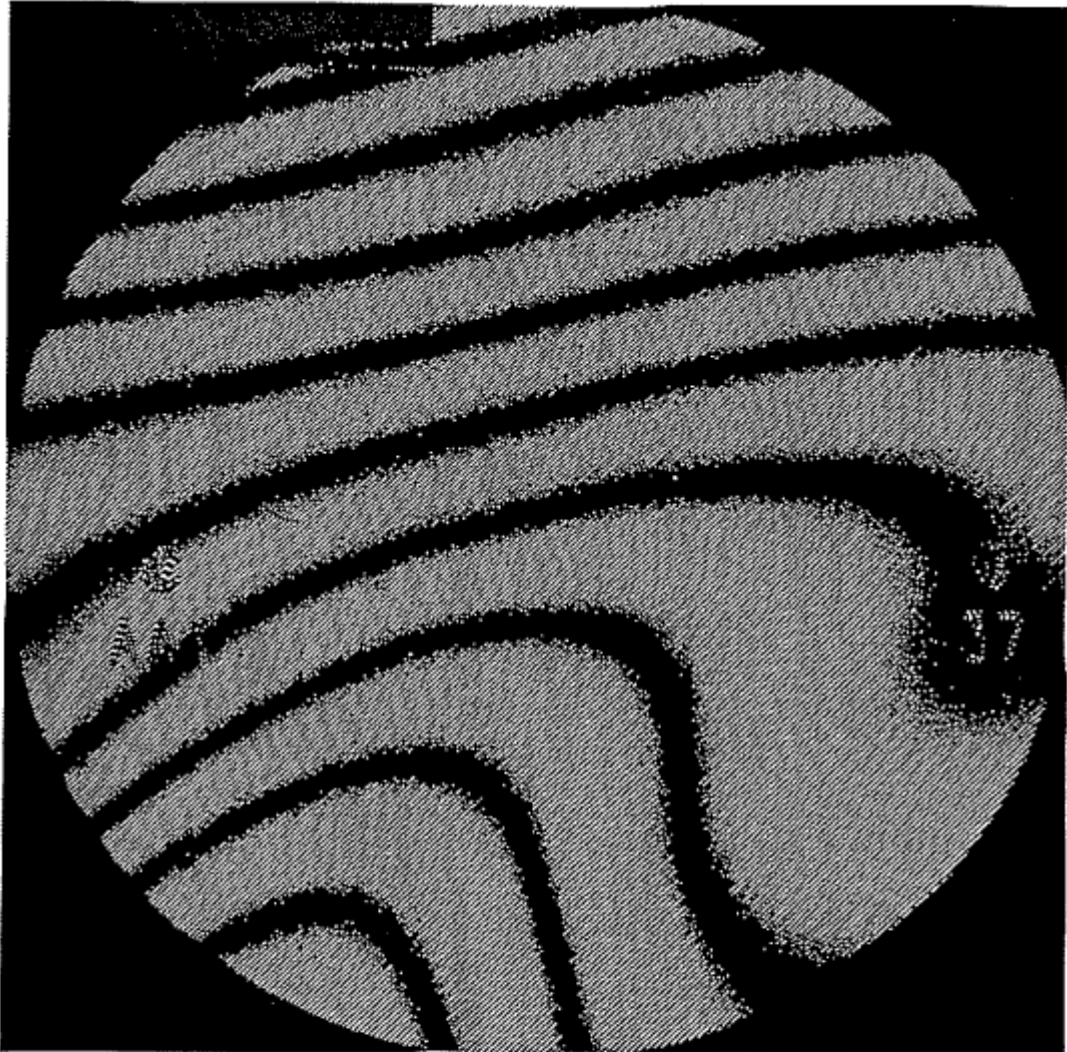


Fig. 12

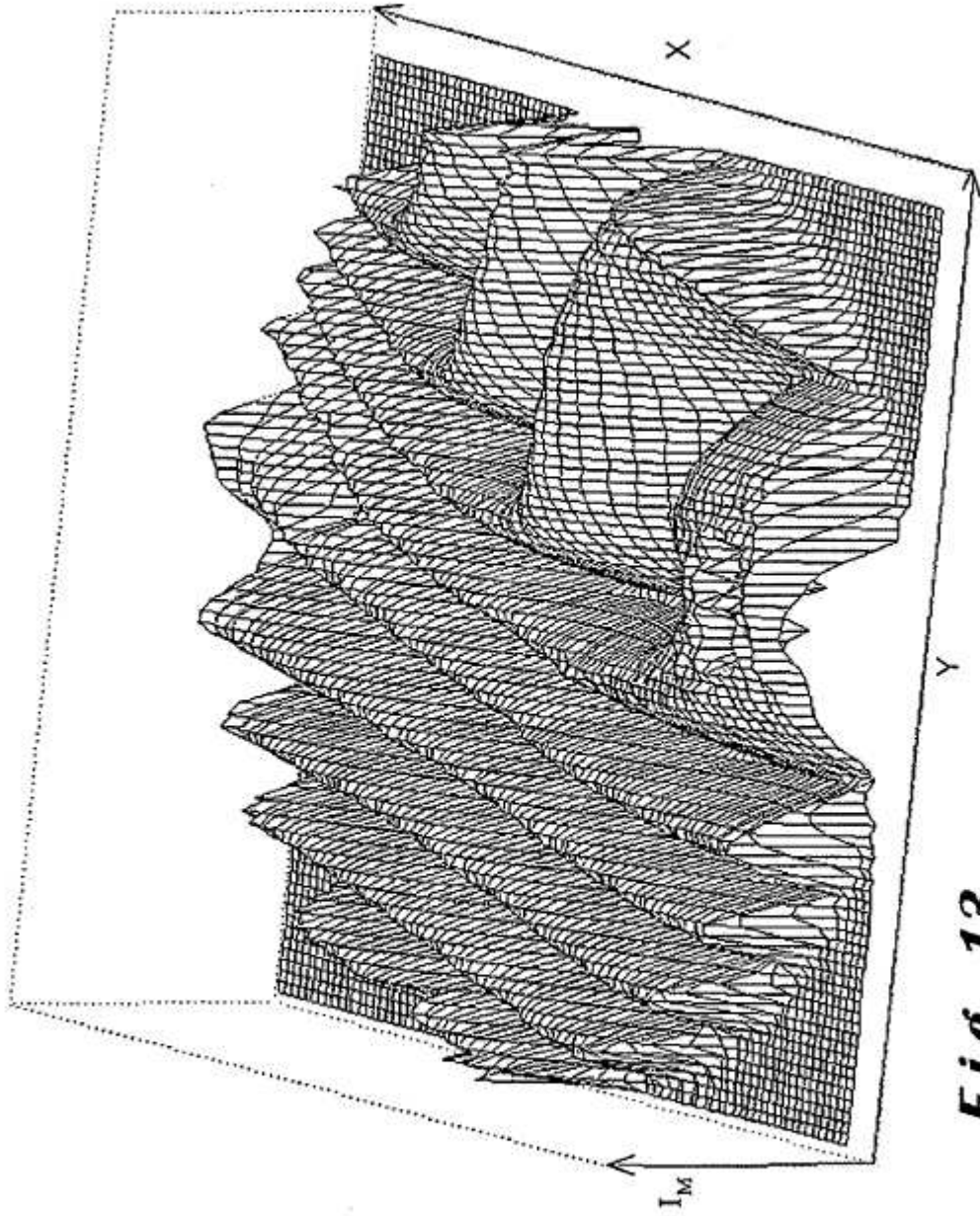


Fig. 13



Fig. 14