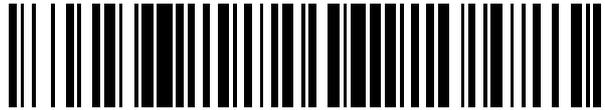


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 413 438**

51 Int. Cl.:

G01B 11/06 (2006.01)

G01B 11/08 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.09.2005 E 05798978 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **13.03.2013 EP 1787085**

54 Título: **Procedimiento de medición de objetos tridimensionales por ombroscopia óptica de una sola vista, utilizando las leyes ópticas de la propagación de la luz**

30 Prioridad:

10.09.2004 FR 0452018

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

16.07.2013

73 Titular/es:

**COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET
AUX ENERGIES ALTERNATIVES (100.0%)
BATIMENT "LE PONANT D" 25, RUE LEBLANC
75015 PARIS, FR**

72 Inventor/es:

**JEANNOT, LAURENT y
LAMY, FRANCIS**

74 Agente/Representante:

LINAGE GONZÁLEZ, Rafael

ES 2 413 438 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Procedimiento de medición de objetos tridimensionales por ombroscopia óptica de una sola vista, utilizando las leyes ópticas de la propagación de la luz

5 **Campo técnico**

10 La presente invención se refiere a un procedimiento de medición, o caracterización, sin contacto, de objetos tridimensionales, más en particular de objetos tridimensionales que son transparentes a una luz visible o al menos traslúcidos respecto de esta luz.

La invención se aplica en particular:

15 - a la medición sin contacto del espesor de un objeto esférico (más sencillamente denominado "esfera") hueco y transparente o de un objeto cilíndrico (más sencillamente denominado "cilindro") hueco y transparente,

- a la medición sin contacto del espesor de una capa transparente o de un depósito transparente, colocado(a) en el interior de tal esfera o de tal cilindro,

20 - a la medición sin contacto de la deformación o de la rugosidad de la superficie interna de tal esfera o de tal cilindro,

- a la medición sin contacto de la deformación o de la rugosidad de una capa transparente o de un depósito transparente, colocado(a) en el interior de tal esfera o tal cilindro, y

25 - a la medición del índice de refracción de un material constitutivo de tal esfera o de tal cilindro que se ha conformado.

Estado de la técnica anterior

30 Para medir sin contacto un objeto tridimensional, es conocida la utilización de la tomografía tridimensional.

Sin embargo, esta técnica necesita observar el objeto bajo varias incidencias, lo cual no es posible en caso de que el objeto esté colocado en una infraestructura compleja.

35 En caso de que el objeto sea tridimensional, es también conocida la utilización de una técnica denominada "tomografía de una sola vista".

Según esta última técnica, se forma una imagen mediante un código de cálculo basado en un modelo de objeto elegido a priori.

40 La imagen así capturada es comparada con una imagen radiográfica simulada y el modelo se deforma a continuación de manera iterativa hasta que la imagen simulada coincida con la imagen experimental.

La reconstrucción se apoya en una hipótesis de simetría de revolución del objeto.

45 Por tanto, la tomografía de una sola vista es una técnica compleja y difícil de aplicar.

Además, para medir espesores y diámetros de esferas huecas, es conocida la utilización de la interferometría y la radiografía X.

50 La interferometría es un procedimiento preciso, utilizable en una infraestructura compleja, pero es bastante delicada de aplicar.

55 En cuanto a la radiografía X, no se puede utilizar cuando el objeto que debe ser medido está colocado en una infraestructura compleja y no puede ser manipulado desde el exterior de esta infraestructura.

De este modo, la medición sin contacto de las dimensiones de un objeto tridimensional y transparente (o traslúcido) se encuentra con numerosas dificultades, en particular cuando se quiere medir una característica interna del objeto.

60 En efecto, un procedimiento de ombroscopia (en inglés "backlight shadowgraphy") se describe en el siguiente documento FR 2852389 (solicitud de patente francesa n.º 03 50045, presentada el 12 de marzo de 2003, invención de F. Lamy et al.).

65 Sin embargo, este procedimiento necesita la creación de una tabla de datos a partir de simulaciones efectuadas mediante un software apropiado y esta tabla debe cubrir toda la gama de las dimensiones de los objetos a observar. Los datos permiten realizar, por interpolación, una medición dimensional del objeto estudiado, pero, cuanto mayor es

la gama de las dimensiones que debe cubrir la tabla de datos, más larga es la creación de esta tabla si se quiere mantener un cierto valor de precisión.

5 En el documento US 4227806 A, se determina la relación de los índices de refracción de una preforma de fibra óptica utilizando una ecuación que está basada en leyes de Snell-Descartes y que asocia parámetros optogeométricos con el resultado de una observación efectuada directamente en una imagen del objeto. En el documento FR 2651312 A se determina el diámetro de un tubo utilizando una ecuación basada en leyes de Snell-Descartes que asocia parámetros optogeométricos con el resultado de una observación efectuada directamente en una imagen del objeto.

10 En el documento US4168907A se determina el radio de una discontinuidad de índice o un espesor de una capa de una fibra óptica utilizando una ecuación basada en leyes de Snell-Descartes que asocia parámetros optogeométricos con el resultado de una observación efectuada directamente en una imagen del objeto.

15 **Exposición de la invención**

La presente invención tiene por objeto remediar los inconvenientes anteriores.

20 Para este fin utiliza una técnica de medición por ombroscopia óptica, que se aplica a la caracterización de objetos observables bajo un solo ángulo de visión, especialmente en el caso donde es difícil acceder a estos objetos. Además, la invención utiliza preferiblemente un sistema de captura de imágenes que se centra en un plano del objeto estudiado.

25 Además, los objetos que se caracterizan mediante el procedimiento objeto de la invención son esencialmente esferas huecas o cilindros huecos. Ahora bien, el procedimiento de fabricación de la esfera o del cilindro puede implicar una modificación del índice óptico respecto del material macizo (en inglés "bulk") a partir del cual se ha fabricado esta esfera o este cilindro.

30 La presente invención permite también remediar este inconveniente: combinada con un medio apropiado, permite, como se verá, determinar el índice de refracción de un objeto de simetría esférica o cilíndrica.

35 El procedimiento objeto de la invención tiene la ventaja de utilizar las leyes ópticas de Snell-Descartes, relativas a la propagación de la luz. Por lo tanto, la observación ombroscópica se utiliza directamente con la ayuda de una fórmula sencilla que asocia las características ópticas (índice de refracción) y las dimensiones del objeto con la imagen ombroscópica de este último.

40 Este procedimiento presenta la ventaja de ser rápido y preciso, y permite medir dimensiones muy variadas de objetos, cualquiera que sea el tamaño de estos últimos, dentro del límite de resolución del aparato de medición utilizado.

De manera precisa, la presente invención se refiere a un procedimiento de medición sin contacto de un objeto tridimensional, siendo este objeto tridimensional traslúcido o transparente respecto de una luz visible, estando este procedimiento caracterizado porque:

45 - con la ayuda de las leyes de Snell-Descartes relativas a la propagación de la luz visible a través del objeto, se establece una ecuación que asocia parámetros optogeométricos del objeto con el resultado de una observación efectuada directamente en una imagen del objeto, comprendiendo esta imagen un anillo luminoso y siendo capturada observando este objeto con la luz visible, por ombroscopia óptica de una sola vista, conteniendo la ecuación el radio del anillo luminoso,

50 - se captura esta imagen del objeto,

- se efectúa la observación, se determina el radio del anillo luminoso a partir de la imagen del objeto, y

55 - se determina al menos un parámetro geométrico u óptico del objeto con la ayuda de la ecuación, del radio del anillo luminoso y del resultado de la observación.

60 Preferiblemente, la imagen es capturada mediante un sistema de captura de imágenes con luz visible, centrándose este sistema de captura de imágenes en un plano de corte del objeto estudiado.

Se puede determinar, conforme a la invención, el parámetro geométrico u óptico de un objeto hueco a partir de la imagen de un corte plano del objeto.

65 Según un modo de realización particular del procedimiento de la invención, el objeto es una esfera hueca o un cilindro hueco, teniendo por tanto este objeto una pared, el parámetro geométrico del objeto es el espesor de esta pared, la imagen de la esfera hueca o del cilindro hueco comprende un anillo luminoso, siendo la ecuación:

$$\frac{\pi}{2} + \arcseno\left(\frac{R_a}{n_1 R_2}\right) - \arcseno\left(\frac{R_a}{n_1 R_1}\right) + \arcseno\left(\frac{R_a}{R_1}\right) - 2 \cdot \arcseno\left(\frac{R_a}{R_2}\right) = 0$$

5 donde n_1 , R_1 , R_2 y R_a representan respectivamente el índice de refracción, el radio (en inglés "radius") externo, el radio interno de la esfera o del cilindro y el radio del anillo luminoso, donde el radio externo de la esfera, o del cilindro, y el radio del anillo luminoso se determinan a partir de la imagen del objeto y, siendo n_1 conocido, el espesor R_1 - R_2 de la pared se determina en función del radio externo de la esfera o del cilindro y en función del radio del anillo luminoso, mediante la ecuación.

10 Según un modo de realización particular de la invención, el objeto es hueco y contiene una capa o un depósito de un material que es transparente o traslúcido, y se determina el espesor de este depósito o de esta capa.

15 En este caso, según otro modo de realización particular del procedimiento de la invención, el objeto es una esfera hueca o un cilindro hueco, el parámetro geométrico del objeto es el espesor de la capa o del depósito, la imagen de la esfera hueca o del cilindro hueco comprende un anillo luminoso, siendo la ecuación:

$$\frac{\pi}{2} - \arcseno\left(\frac{R_a}{R_1}\right) + \arcseno\left(\frac{R_a}{n_1 R_1}\right) - \arcseno\left(\frac{R_a}{n_1 R_2}\right) + \arcseno\left(\frac{R_a}{n_2 R_2}\right) - \arcseno\left(\frac{R_a}{n_2 R_3}\right) = 0$$

20 donde n_1 , n_2 , R_1 , R_2 , R_3 y R_a representan respectivamente el índice de refracción de la esfera o del cilindro, el índice de refracción de la capa o del depósito, el radio externo de la esfera o del cilindro, el radio interno de la esfera o del cilindro, el radio interno de la capa o del depósito y el radio del anillo luminoso, donde el radio externo de la esfera o del cilindro y el radio del anillo luminoso se determinan a partir de la imagen del objeto y, siendo n_1 , n_2 y R_2 conocidos, el espesor R_2 - R_3 de la capa o del depósito se determina en función del radio externo de la esfera o del cilindro y en función del radio del anillo luminoso, mediante la ecuación.

25 El radio externo puede determinarse con la ayuda del procedimiento de las derivadas direccionales.

30 Según otro modo de realización particular de la invención, el objeto es hueco y comprende una pared interna, y se determina la deformación o la rugosidad de esta pared interna.

Según otro modo de realización particular de la invención, el objeto es una esfera hueca o un cilindro hueco, el parámetro óptico del objeto es el índice de refracción de este objeto, la imagen de la esfera hueca o del cilindro hueco comprende un anillo luminoso, siendo la ecuación:

$$\frac{\pi}{2} + \arcseno\left(\frac{R_a}{n_1 R_2}\right) - \arcseno\left(\frac{R_a}{n_1 R_1}\right) + \arcseno\left(\frac{R_a}{R_1}\right) - 2 \cdot \arcseno\left(\frac{R_a}{R_2}\right) = 0$$

35 donde n_1 , R_1 , R_2 y R_a representan respectivamente el índice de refracción, el radio externo, el radio interno de la esfera o del cilindro y el radio del anillo luminoso, donde el radio del anillo luminoso se determina a partir de la imagen del objeto, se determinan R_1 y R_2 y se determina el índice de refracción n_1 a la longitud de onda de la luz visible, con la que se observa el objeto, mediante la ecuación.

R_1 y R_2 se pueden determinar por radiografía.

45 Según un modo de realización preferido de la invención, se utiliza un dispositivo de ombroscopia óptica que comprende una fuente de luz visible, medios de colimación de esta fuente y medios de captura de imágenes que comprenden una óptica y un sensor de imágenes, estando esta óptica colocada entre el objeto y el sensor de imágenes y permitiendo formar la imagen del plano de corte del objeto estudiado en el sensor de imágenes, y se ajusta la colimación de la fuente.

50 El sensor de imágenes puede comprender un dispositivo de transferencia de cargas.

El procedimiento objeto de la invención presenta ventajas: su coste de realización es reducido y el material necesario para esta realización es relativamente fácil de instalar en una estructura compleja ya que este material se limita a una fuente luminosa (dotada de medios de colimación), una óptica y una cámara.

55

Breve descripción de los dibujos

La presente invención se entenderá mejor con la siguiente descripción de ejemplos de realización ofrecidos a modo puramente indicativo y en modo alguno limitativo, haciendo referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

- 5 - las figuras 1A y 1B muestran respectivamente una imagen real y una imagen simulada de una esfera hueca,
- la figura 1C muestra el perfil de una semilínea de la imagen simulada de la figura 1B,
- la figura 2A ilustra esquemáticamente la trayectoria preferida de propagación de los rayos luminosos (en inglés "light rays") a través de la esfera hueca, rayos que están en el origen de la formación del anillo luminoso presente en las imágenes de las figuras 1A y 1B,
- 10 - la figura 2B ilustra esquemáticamente la geometría utilizada para el cálculo de la relación entre diversos parámetros R_a , R_1 , R_2 y n_1 , los cuales se definirán a continuación, en el caso de una esfera hueca,
- 15 - la figura 2C ilustra esquemáticamente la geometría utilizada para el cálculo de la relación entre R_a , R_1 , R_2 , R_3 , n_1 , n_2 en el caso de una esfera hueca, revestida por una capa interna,
- la figura 3 muestra un perfil radial de una imagen a tratar,
- 20 - la figura 4 es una vista esquemática de un dispositivo que permite aplicar un procedimiento conforme a la invención,
- la figura 5A muestra la imagen ombroscópica de un cilindro hueco, y
- 25 - la figura 5B muestra el perfil de la imagen de la figura 5A.

Exposición detallada de modos de realización particulares

30 El principio de medición utilizado en la invención para la medición de un objeto está basado en la observación del objeto por ombroscopia en luz visible, en asociación con un modelo óptico de propagación de la luz.

Este principio de medición tiene en cuenta los fenómenos físicos de propagación de la luz en los diferentes materiales traslúcidos o transparentes que comprende el objeto, en especial las diferentes interfaces del objeto, y
 35 permite asociar la medición directamente efectuada en la imagen de ombroscopia con las magnitudes dimensionales físicas internas del objeto estudiado.

En efecto, para estudiar un objeto plano, la ombroscopia es un procedimiento de medición poco costoso y sencillo de utilizar. Para una medición directa sobre la imagen del objeto, es posible conocer, por ejemplo, el tamaño del objeto.
 40

Sin embargo, para el estudio de un objeto en tres dimensiones mediante ombroscopia, el análisis directo de la imagen no proporciona suficiente información ya que la imagen observada de un corte del objeto no es solamente la imagen del corte a través del objetivo del dispositivo de ombroscopia utilizado, sino también la imagen del corte a través del objetivo y el propio objeto.
 45

Es posible encontrar las características del corte estudiado si se conoce la influencia del objeto en la propagación del haz luminoso incidente. Esta influencia puede ser descrita mediante las ecuaciones de la óptica geométrica, que traducen las leyes de Snell-Descartes.

50 Cabe señalar que la tomografía, que se utiliza habitualmente para estudiar un objeto tridimensional, requiere la observación de este objeto bajo varias incidencias, lo cual no es posible en caso de que el objeto esté colocado en una infraestructura compleja.

Los autores de la presente invención han llevado a cabo especialmente un estudio sobre esferas huecas. Es difícil conocer el espesor mediante una medición directa en sus imágenes ombroscópicas, ya que los rayos luminosos son refractados y reflejados en las diferentes interfaces internas y externas de tales esferas.

En las imágenes ombroscópicas de una esfera hueca aparece un anillo luminoso que procede de una trayectoria de propagación particular de la luz en la esfera. Este anillo luminoso es el elemento principal sobre el cual está basado un procedimiento de medición conforme a la invención.
 60

Los autores de la presente invención han desarrollado el estudio para esferas compuestas por varias capas y han mostrado que se puede medir el espesor de la capa más interna mediante ombroscopia, siempre que se conozcan las otras características dimensionales.
 65

En lo que sigue, se describe un ejemplo de la invención y se empieza destacando una banda blanca sobre la imagen de una esfera hueca, que se obtiene mediante ombroscopia óptica de una sola vista.

5 La figura 1A representa esquemáticamente una imagen 2 de una esfera hueca real. El radio externo de esta esfera vale $578 \mu\text{m}$ y su espesor vale $6,6 \mu\text{m}$.

Se puede formar además una imagen simulada 3 de tal esfera hueca (figura 1B). En el ejemplo considerado, el radio externo de la esfera simulada vale $1000 \mu\text{m}$ y su espesor vale $100 \mu\text{m}$.

10 En la figura 1A, se observa la presencia de un anillo luminoso 4 y de una zona negra 6 (teniendo los elementos correspondientes de la figura 1B las mismas referencias). Se ha constatado que:

- el radio del anillo blanco está asociado al espesor de la esfera hueca,

15 - la anchura de la zona negra depende de la abertura numérica ("numerical aperture") del sistema de captura de imágenes que comprende el dispositivo de ombroscopia utilizado.

20 Para apreciar mejor la posición de la banda blanca (o anillo luminoso), se puede formar un perfil de la imagen simulada, teniendo este perfil por origen el centro C de la imagen simulada y como punto de llegada un punto M en el exterior de la esfera, como muestra la flecha F de la figura 1B. En el ejemplo considerado, la distancia CM vale $1,25 \text{ mm}$.

25 La figura 1C muestra el perfil de una semilínea de la imagen simulada, estando los números de los píxeles (Pix) en las abscisas y las amplitudes (niveles de gris) en las ordenadas (Ampl).

En esta figura 1C, se ha localizado el anillo luminoso 4 así como la zona negra 6.

Se considera ahora la utilización de las relaciones de la óptica geométrica en la presente invención.

30 Los anillos luminosos generados por el paso de un haz luminoso colimado en el interior de una esfera hueca transparente (o traslúcida) pueden tener trayectorias muy complejas. Al igual que el arcoíris, cada anillo caracteriza un modo de propagación a través de las dioptrías encontradas, con reparticiones de energía que varían en función del número de refracciones y de reflexiones que han tenido lugar.

35 Como el objetivo de observación utilizado se centra en el plano del ecuador de la esfera hueca, basta con volver, por construcción geométrica, al punto de impacto entre los rayos luminosos salientes y este ecuador para encontrar la posición del anillo luminoso observado para una trayectoria de propagación dada.

40 Se considera en primer lugar el caso de una esfera hueca "monocapa", es decir, de una sola esfera hueca que no incluye ninguna capa interna.

45 Mediante simulación se ha mostrado que la trayectoria de propagación de los rayos luminosos a través de la esfera hueca, estando estos rayos en el origen de la formación del anillo luminoso que está presente en las imágenes de las figuras 1A y 1B, es preferiblemente la que está representada en la figura 2A.

En esta figura se ve una fuente luminosa colimada 8, la esfera hueca transparente estudiada 9 y una lente de focalización 10. La esfera está colocada entre la fuente y esta lente. Se forma la imagen de la esfera en una pantalla 11 mediante la lente.

50 Se ha representado esquemáticamente un trazado de rayos (en inglés "ray tracing") para una configuración de observación a una distancia $2f$ de la lente, siendo f la distancia focal de esta lente.

55 Se ha representado asimismo una vista delantera de la pantalla 11, en la que la imagen de la esfera tiene la referencia 12. El anillo luminoso que se observa en esta imagen tiene la referencia 13. El radio de este anillo lleva la indicación R_a . Este radio se cuenta a partir del eje óptico X de la lente que constituye asimismo el eje de emisión de la fuente 8. La pantalla 11 es perpendicular a este eje. El plano ecuatorial de la esfera 9, que es perpendicular al eje X, lleva la indicación Eq.

60 Si se toma como rayo luminoso particular el que sale sin desviación respecto del eje de emisión de la fuente, los cálculos para determinar analíticamente la relación entre el radio del anillo luminoso R_a , el radio externo de la esfera R_1 , su radio interno R_2 y su índice de refracción n_1 se simplifican debido a la simetría.

65 Mediante simulación con un software de trazado de rayos, se aprecia que el trazado de rayos de la figura 2A es característico del anillo luminoso más intenso observado.

Basta con considerar que el radio del anillo luminoso es igual a la altura del rayo luminoso procedente de la fuente

colimada que encuentra la superficie interior de la esfera al nivel de su ecuador.

La figura 2B representa un esquema que se utiliza para el cálculo de la relación entre el radio del anillo R_a , el radio externo R_1 de la esfera hueca 9, el radio interno R_2 de la misma y el índice de refracción n_1 del material del que está hecha esta esfera.

El cálculo del radio del anillo en función de R_1 , R_2 y n_1 se realiza entonces de la manera expuesta a continuación.

Se aplican las leyes de la refracción de Snell-Descartes al nivel de cada dioptría encontrada por el rayo luminoso incidente.

La relación entre R_1 , R_2 , n_1 y R_a se obtiene escribiendo que la suma de los ángulos i , θ_1 y θ_2 de la figura 2B es igual a 90° . En este caso, el rayo luminoso que es paralelo a la dirección de observación se refleja en la dioptría en el interior de la esfera, exactamente en el ecuador de la misma.

De ello resulta fácilmente la siguiente ecuación:

$$\frac{\pi}{2} + \arcseno\left(\frac{R_a}{n_1 \cdot R_2}\right) - \arcseno\left(\frac{R_a}{n_1 \cdot R_1}\right) + \arcseno\left(\frac{R_a}{R_1}\right) - 2 \cdot \arcseno\left(\frac{R_a}{R_2}\right) = 0 \quad (1)$$

Una resolución numérica de la ecuación (1) permite determinar el valor del espesor R_1-R_2 cuando se mide R_a y R_1 mediante ombroscopia, sabiendo que se conoce n_1 siempre que se conozca la naturaleza del material constitutivo de la esfera y la longitud de onda de la luz emitida por la fuente 8.

Consideremos ahora el caso de una esfera hueca "bicapa". Un ejemplo de tal esfera está representado esquemáticamente en la figura 2C. Se trata de una esfera hueca transparente o traslúcida 14, que es del tipo de la esfera 9 de la figura 2A pero cuya pared interna está, además, revestida por una capa traslúcida o transparente 16.

En el caso de tal esfera bicapa, la trayectoria de propagación de los rayos luminosos a través de la esfera, rayos que están en el origen de la formación del anillo luminoso, es preferiblemente la que está representada en la figura 2C y que tiene la referencia CP2.

Esta figura 2C ilustra esquemáticamente la geometría utilizada para el cálculo de la relación entre R_a , R_1 , R_2 , R_3 , n_1 y n_2 en el caso de la esfera hueca bicapa, definiéndose a continuación todos estos parámetros.

De la misma manera que antes, se obtiene la siguiente relación entre el radio externo R_1 de la esfera 14, el radio interno R_2 de esta esfera, el radio interno R_3 de la capa 16, el radio R_a del anillo luminoso, el índice de refracción n_1 de la esfera y el índice de refracción n_2 de la capa:

$$\frac{\pi}{2} - \arcseno\left(\frac{R_a}{R_1}\right) + \arcseno\left(\frac{R_a}{n_1 \cdot R_1}\right) - \arcseno\left(\frac{R_a}{n_1 \cdot R_2}\right) + \arcseno\left(\frac{R_a}{n_2 \cdot R_2}\right) - \arcseno\left(\frac{R_a}{n_2 \cdot R_3}\right) = 0$$

(2)

Una resolución numérica de la ecuación (2) permite determinar el valor del espesor R_2-R_3 cuando se mide R_a y R_1 mediante ombroscopia, sabiendo que se conoce n_1 y n_2 siempre que se conozcan los materiales que constituyen respectivamente la esfera 14 y la capa 16, la longitud de onda de la luz emitida por la fuente utilizada para la ombroscopia y el radio R_2 .

Este último puede determinarse, por ejemplo, con la ayuda de la ecuación (1), aplicando a una esfera idéntica a la esfera 14, pero sin la capa 16, el procedimiento que se ha aplicado a la esfera 9.

Se considera ahora un algoritmo de tratamiento de imágenes, que se utiliza para la aplicación de un procedimiento conforme a la invención.

En las imágenes obtenidas por ombroscopia de una sola vista para una esfera hueca (imagen inicial e imagen después de igualación de histograma) se puede detectar el radio externo de la esfera y, a continuación, la posición de la banda blanca.

Para determinar el radio externo, se utiliza preferiblemente el procedimiento de las derivadas direccionales. En este sentido, se consultará el siguiente documento:

R. M. Haralick, "Digital Step Edges from Zero Crossing of Second Directional Derivatives", IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, vol. PAMI-6, N°1, enero de 1984, páginas 58 a 68.

5 Este procedimiento se basa en la anulación del gradiente de la imagen y en la maximización de la derivada segunda.

De este modo, se obtiene un centro y un radio que corresponden a la superficie externa de la esfera. A partir del centro, se trazan perfiles radiales en todos los niveles.

10 La figura 3 representa uno de estos perfiles. Los números de los píxeles (Pix) se encuentran en las abscisas y las amplitudes (niveles de gris) se encuentran en las ordenadas (Ampl).

En cada perfil se busca el punto que representa la posición de la superficie externa (punto A) y la posición de la banda blanca (punto B).

15 El punto A se obtiene por anulación de la derivada segunda. El punto B se obtiene reduciendo la zona de estudio del perfil (en la zona delimitada por el círculo C en el ejemplo representado) y buscando el máximo local. Para tener una coordenada de subpixel, el perfil se ajusta localmente a una ley gaussiana.

20 Una vez terminadas estas operaciones, el espesor de la esfera, para este radio, se obtiene utilizando la ecuación del modelo. Las superficies interna y externa de la esfera son reconstruidas y entonces es posible conocer el espesor medio de la esfera en el ecuador de la misma.

25 En lo relativo al procedimiento objeto de la invención, se considera tener una incertidumbre del orden de ± 3 píxeles para la detección del radio externo, y del orden de $\pm 0,5$ píxel para la determinación de la posición de la banda blanca.

El procedimiento de ombroscopia de medición del espesor de una esfera hueca según la invención tiene la ventaja de ser poco costoso y de poder aplicarse con mucha facilidad y de manera muy rápida.

30 El uso de este procedimiento necesita una elección juiciosa de la abertura numérica del sistema de captura de imágenes, que comprende el dispositivo de ombroscopia utilizado, y del diagrama de emisión de la fuente luminosa que comprende este dispositivo, para obtener las condiciones óptimas para visualizar correctamente la banda blanca o anillo luminoso.

35 La incertidumbre de la medición depende esencialmente de la resolución espacial de la imagen. En los ejemplos considerados de la invención, se observa el centro de la esfera para poder trazar los perfiles radiales. De este modo, cuanto más importante sea el radio de una esfera, mayor será el coeficiente de conversión de micrómetro por píxel, y por lo tanto la incertidumbre de medición es mayor. Esta incertidumbre de medición depende por lo tanto del radio de la esfera estudiada.

40 El equipo utilizado para la ombroscopia es clásico. Comprende una fuente luminosa colimada, que emite una luz visible y que está asociada a un sistema de captura de imágenes que está destinado a centrarse en un plano del objeto estudiado.

45 La figura 4 es una vista esquemática de un dispositivo de ombroscopia para la aplicación del procedimiento objeto de la invención.

50 Este dispositivo comprende una fuente de luz visible 18, medios de colimación 20 regulables de esta fuente y medios de captura de imágenes, que comprenden una óptica 22 que está dotada de medios de variación 24 de la abertura numérica de esta óptica (o que posee la apertura numérica adecuada).

Esta última va seguida de un sensor CCD 26 que está dotado de medios de procesamiento de imágenes 28, a los que está asociado un dispositivo de visualización 30.

55 Una esfera hueca 32, que se quiere estudiar, está colocada entre la fuente 18 y la óptica 22. Esta óptica 22 permite formar la imagen de un plano de corte de la esfera hueca 32 en el sensor CCD 26.

La invención se refiere esencialmente al procedimiento utilizado para determinar el espesor de la esfera hueca, a saber:

60 - determinación de las condiciones experimentales propicias para una fácil detección del radio del anillo luminoso (abertura numérica del sistema de captura de imágenes, colimación de la fuente luminosa),

65 - elaboración de la ecuación matemática que se basa en las características del objeto estudiado y en el fenómeno observado en la imagen (radio externo, espesor de la esfera, radio del anillo luminoso e índice de refracción del objeto), y

- procesamiento de imagen asociado para determinar los parámetros iniciales (radio del anillo luminoso y radio externo de la esfera) para determinar la dimensión deseada del objeto (espesor de la esfera hueca, en el ejemplo considerado).

5 El mismo procedimiento puede ser aplicado para la caracterización del espesor de un cilindro hueco. Para esta aplicación, se puede utilizar también el dispositivo de la figura 4 (misma fuente luminosa y mismo dispositivo de captura de imágenes), colocando el cilindro en el lugar de la esfera 32.

10 En la imagen ombroscópica obtenida aparece una banda blanca que está ligada al espesor y al radio externo del cilindro.

La ecuación (1) se aplica asimismo a un cilindro hueco. De la misma manera, la ecuación (2) se aplica a un cilindro hueco, cuya pared interna está revestida por una capa (o un depósito) traslúcida o transparente.

15 La figura 5A muestra la imagen ombroscópica 34 de un cilindro hueco 36 de 1000 μm de radio externo y de 300 μm de espesor. El perfil de esta imagen está representado en la figura 5B. Este perfil está trazado según la línea X de la figura 5A.

20 Se observa una banda blanca B en la figura 5A. Esta banda blanca corresponde a la zona C en la figura 5B. En esta última, el borde del cilindro está indicado por la flecha D. La posición de la banda blanca está ligada al radio externo y al espesor del cilindro hueco.

25 El conocimiento de la distancia entre el centro del anillo luminoso y cada punto de este último permite determinar el estado de superficie de la pared interna del cilindro hueco, en términos de deformación y de rugosidad, según un ecuador o dos generatrices del cilindro, en el plano de observación (que es perpendicular al eje óptico de observación).

30 En el caso de un objeto bicapa, es decir, de un objeto hueco en cuya pared interna está formada una capa, denominada capa interna, el procedimiento objeto de la invención permite medir el espesor de la capa interna a expensas de conocer el espesor de la pared del objeto, denominada capa externa, que se mide entonces con anterioridad. También puede medirse la rugosidad y la deformación de la superficie interna del objeto bicapa.

35 Lo que antecede se aplica tanto a los cilindros como a las esferas.

El procedimiento objeto de la invención puede utilizarse cualquiera que sea el diámetro de la esfera o del cilindro. En efecto, la utilización de una cadena óptica con un coeficiente de ampliación adaptado permite observar el conjunto de un objeto en un sensor CCD de 6,6 mm por 8,8 mm. Es incluso posible observar una sola parte del objeto, siempre que se disponga de un sistema óptico apropiado.

40 La única restricción que se plantea para la medición del espesor de una esfera hueca es que sea suficientemente gruesa para una fácil distinción de la banda blanca, dada la resolución del sistema óptico.

45 Durante la medición del espesor de un objeto hueco, por ejemplo de una esfera hueca, según la invención, se debe tener en cuenta la resolución del sistema óptico utilizado para esta medición: para una resolución dada, la esfera debe ser suficientemente gruesa para que se pueda distinguir con facilidad la banda blanca.

50 La presente invención se refiere además a la caracterización del índice de refracción de objetos transparentes o traslúcidos, más en particular de tales objetos que son, además, esféricos o cilíndricos.

Utilizando la relación (1), se puede determinar, mediante ombroscopia y de manera no destructiva, el índice de refracción de una esfera o de un cilindro del o de la que se han caracterizado las dimensiones mediante otro sistema de medición, preferiblemente un sistema de radiografía.

55 Este índice de refracción se proporciona entonces a la longitud de onda de la fuente luminosa utilizada para realizar la medición ombroscópica.

60 En general, la medición de índice se realiza mediante elipsometría, pero solo se refiere a objetos planos. La presente invención permite remediar este inconveniente ya que se aplica a objetos tridimensionales.

Además, las tensiones mecánicas generadas durante la fabricación de objetos, más en particular de objetos esféricos o cilíndricos, pueden implicar una modificación del índice de refracción de tales objetos. La invención permite de manera ventajosa conocer el nuevo índice de refracción.

REIVINDICACIONES

1.- Procedimiento de medición sin contacto de un objeto tridimensional (9, 14, 32), siendo este objeto tridimensional traslúcido o transparente respecto de una luz visible, estando este procedimiento caracterizado porque:

con la ayuda de las leyes de Snell-Descartes relativas a la propagación de la luz visible a través del objeto, se establece una ecuación que asocia parámetros optogeométricos del objeto con el resultado de una observación efectuada directamente en una imagen del objeto, comprendiendo esta imagen un anillo luminoso y siendo capturada observando este objeto con la luz visible, por ombroscopia óptica de una sola vista, conteniendo la ecuación el radio del anillo luminoso,

se captura esta imagen del objeto,

se efectúa la observación, se determina el radio del anillo luminoso a partir de la imagen del objeto, y

se determina al menos un parámetro geométrico u óptico del objeto con la ayuda de la ecuación, del radio del anillo luminoso y del resultado de la observación.

2.- Procedimiento según la reivindicación 1, en el que la imagen es capturada mediante un sistema de captura de imágenes con luz visible, centrándose este sistema de captura de imágenes en un plano de corte del objeto estudiado.

3.- Procedimiento según la reivindicación 2, en el que el objeto (9, 14, 32) es hueco y se determina el parámetro geométrico u óptico de este objeto hueco a partir de la imagen de un corte plano del objeto.

4.- Procedimiento según la reivindicación 3, en el que el objeto (9, 14) es una esfera hueca o un cilindro hueco, teniendo por tanto este objeto una pared, el parámetro geométrico del objeto es el espesor de esta pared, la imagen de la esfera hueca o del cilindro hueco comprende un anillo luminoso (13), siendo la ecuación:

$$\frac{\pi}{2} + \arcseno\left(\frac{R_a}{n_1 \cdot R_2}\right) - \arcseno\left(\frac{R_a}{n_1 \cdot R_1}\right) + \arcseno\left(\frac{R_a}{R_1}\right) - 2 \cdot \arcseno\left(\frac{R_a}{R_2}\right) = 0$$

donde n_1 , R_1 , R_2 y R_a representan respectivamente el índice de refracción, el radio externo, el radio interno de la esfera o del cilindro y el radio del anillo luminoso, donde el radio externo de la esfera o del cilindro y el radio del anillo luminoso se determinan a partir de la imagen del objeto y, siendo n_1 conocido, el espesor R_1-R_2 de la pared se determina en función del radio externo de la esfera o del cilindro y en función del radio del anillo luminoso, mediante la ecuación.

5.- Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 2 a 4, en el que el objeto (14) es hueco y contiene una capa (16) o un depósito de un material que es transparente o traslúcido, y se determina el espesor de este depósito o de esta capa.

6.- Procedimiento según la reivindicación 5, en el que el objeto (14) es una esfera hueca o un cilindro hueco, el parámetro geométrico del objeto es el espesor de la capa (16) o del depósito, la imagen de la esfera hueca o del cilindro hueco comprende un anillo luminoso, siendo la ecuación:

$$\frac{\pi}{2} - \arcseno\left(\frac{R_a}{R_1}\right) + \arcseno\left(\frac{R_a}{n_1 \cdot R_1}\right) - \arcseno\left(\frac{R_a}{n_1 \cdot R_2}\right) + \arcseno\left(\frac{R_a}{n_2 \cdot R_2}\right) - \arcseno\left(\frac{R_a}{n_2 \cdot R_3}\right) = 0$$

donde n_1 , n_2 , R_1 , R_2 , R_3 y R_a representan respectivamente el índice de refracción de la esfera o del cilindro, el índice de refracción de la capa o del depósito, el radio externo de la esfera o del cilindro, el radio interno de la esfera o del cilindro, el radio interno de la capa o del depósito y el radio del anillo luminoso, donde el radio externo de la esfera o del cilindro y el radio del anillo luminoso se determinan a partir de la imagen del objeto y, siendo n_1 , n_2 y R_2 conocidos, el espesor R_2-R_3 de la capa o del depósito se determina en función del radio externo de la esfera o del cilindro y en función del radio del anillo luminoso, mediante la ecuación.

7.- Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 4 y 6, en el que el radio externo (R_1) se determina con la ayuda del procedimiento de las derivadas direccionales.

8.- Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 2 a 7, en el que el objeto es hueco y comprende una pared interna, y se determina la deformación o la rugosidad de esta pared interna.

9.- Procedimiento según la reivindicación 3, en el que el objeto (9, 14) es una esfera hueca o un cilindro hueco, el parámetro óptico del objeto es el índice de refracción de este objeto, la imagen de la esfera hueca o del cilindro hueco comprende un anillo luminoso (14), siendo la ecuación:

$$\frac{\pi}{2} + \arccos\left(\frac{R_a}{n_1 R_2}\right) - \arccos\left(\frac{R_a}{n_1 R_1}\right) + \arccos\left(\frac{R_a}{R_1}\right) - 2 \cdot \arccos\left(\frac{R_a}{R_2}\right) = 0$$

5 donde n_1 , R_1 , R_2 y R_a representan respectivamente el índice de refracción, el radio externo, el radio interno de la esfera o del cilindro y el radio del anillo luminoso, donde el radio del anillo luminoso se determina a partir de la imagen del objeto, se determinan R_1 y R_2 y se determina el índice de refracción n_1 a la longitud de onda de la luz visible con la que se observa el objeto, mediante la ecuación.

10 10.- Procedimiento según la reivindicación 9, en el que R_1 y R_2 se determinan por radiografía.

15 11.- Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 2 a 10, en el que se utiliza un dispositivo de ombroscopia óptica que incluye una fuente de luz visible, medios de colimación (20) de esta fuente y medios de captura de imágenes (22, 24, 26) que comprenden una óptica (22) y un sensor de imágenes (26), estando esta óptica colocada entre el objeto y el sensor de imágenes y permitiendo formar la imagen del plano de corte del objeto estudiado en el sensor de imágenes, y se ajusta la colimación de la fuente.

20 12.- Procedimiento según la reivindicación 11, en el que el sensor de imágenes incluye un dispositivo de transferencia de cargas.

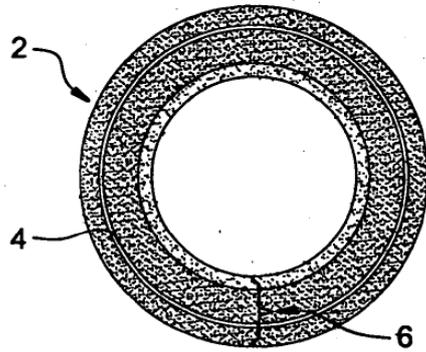


FIG. 1A

FIG. 1B

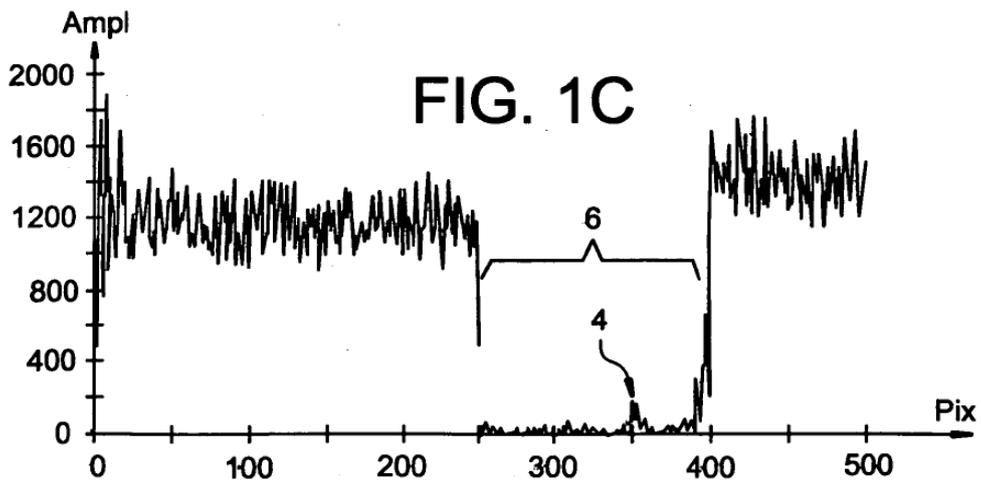
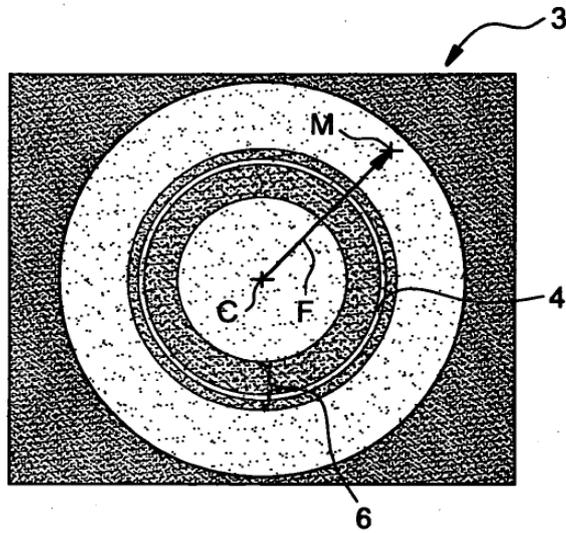


FIG. 1C

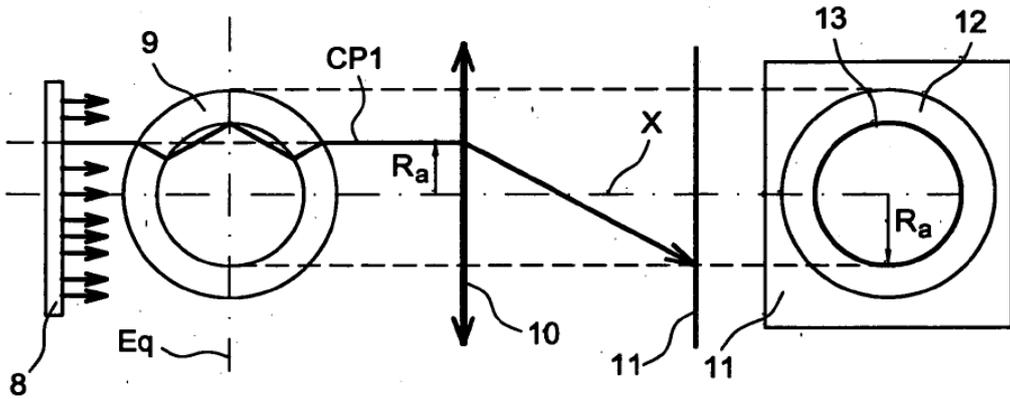


FIG. 2A

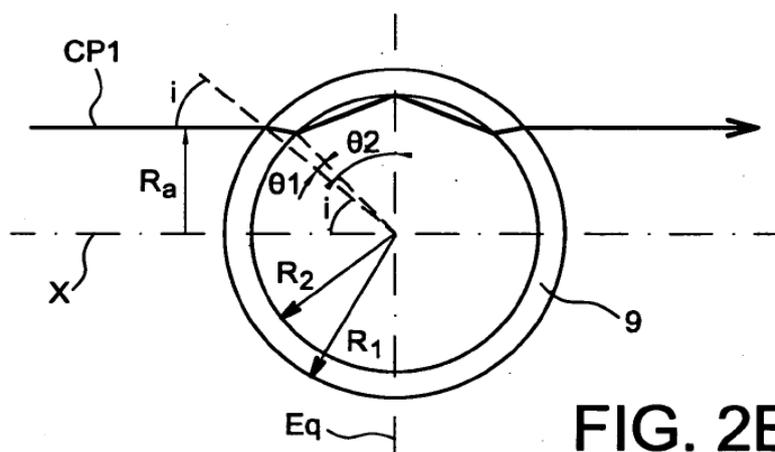


FIG. 2B

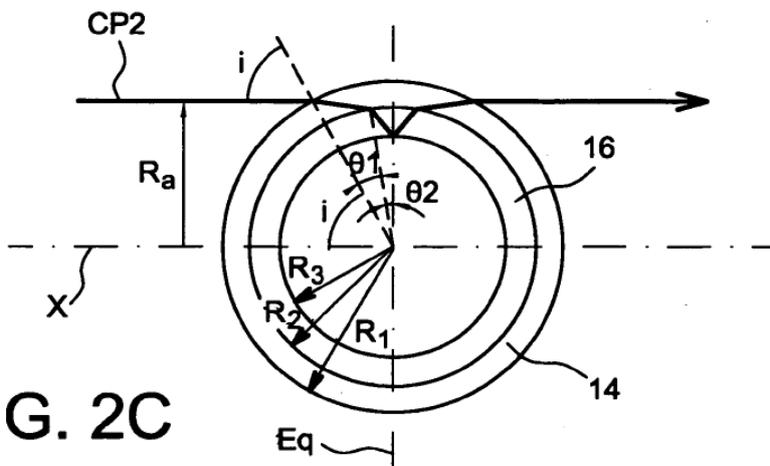


FIG. 2C

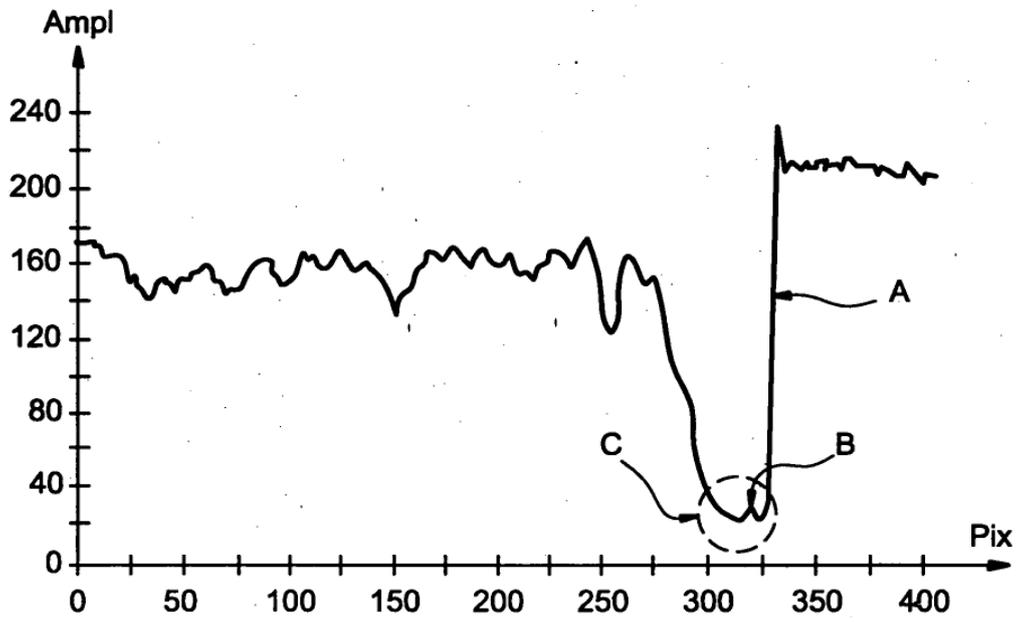


FIG. 3

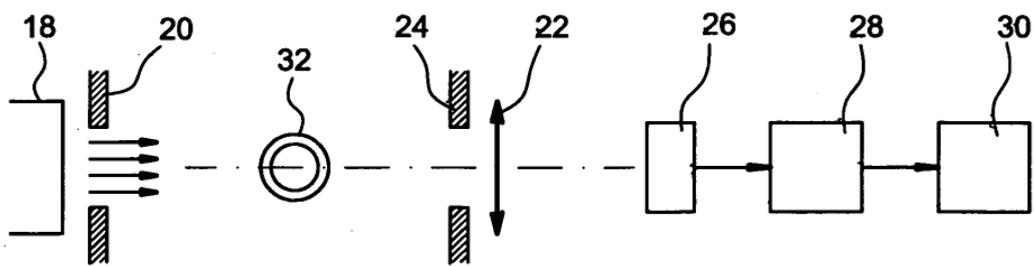


FIG. 4

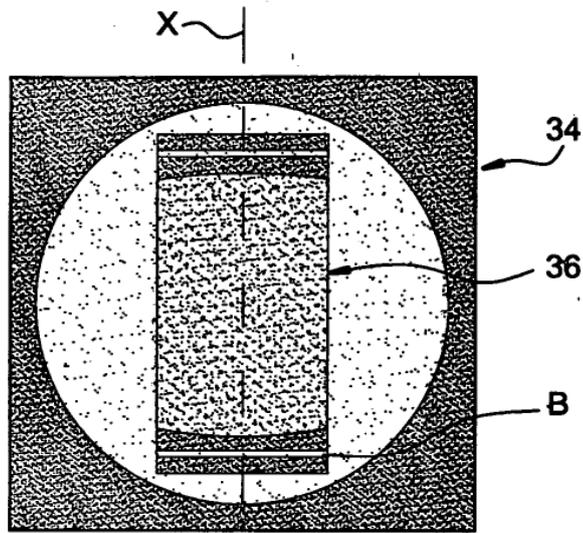


FIG. 5A

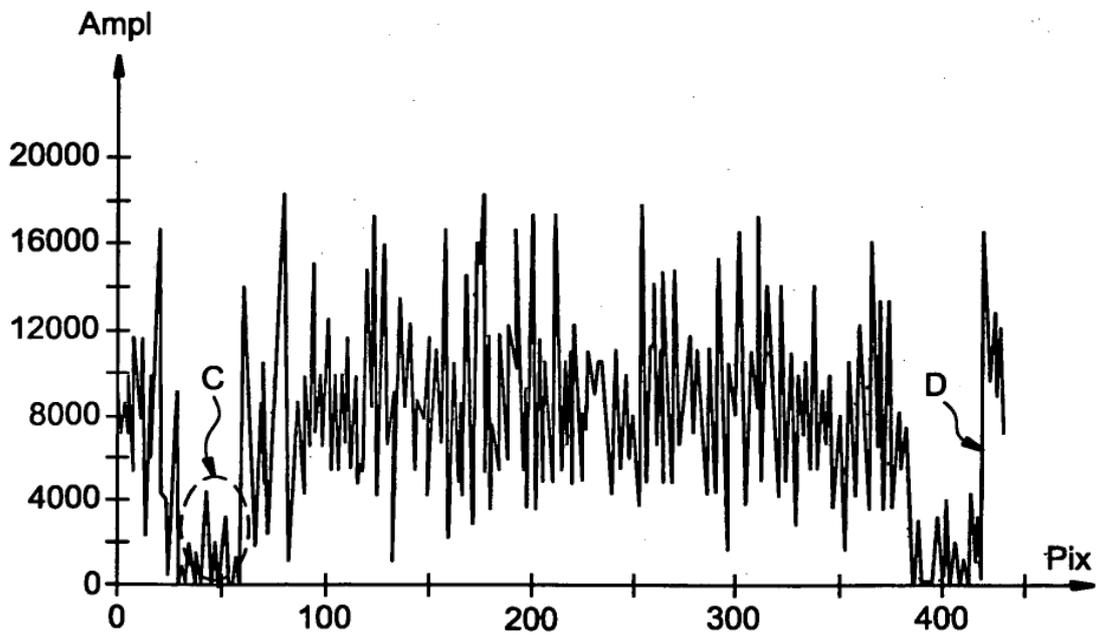


FIG. 5B