

19



OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 400 436**

21 Número de solicitud: 201100830

51 Int. Cl.:

G01B 11/30 (2006.01)

G01B 11/24 (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación:

21.07.2011

43 Fecha de publicación de la solicitud:

09.04.2013

56 Se remite a la solicitud internacional:

PCT/ES2012/000207

71 Solicitantes:

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
(100.0%)
AVDA. SENECA 2
28040 MADRID ES**

72 Inventor/es:

MARTINEZ ANTON, Juan Carlos

54 Título: **PERFILOMETRO TRIDIMENSIONAL POR ABSORCION OPTICA EN FLUIDOS**

57 Resumen:

Perfilómetro tridimensional por absorción óptica en fluidos.

El invento permite medir la topografía de superficies pertenecientes a un substrato (22) transparente o traslúcido que deja pasar luz a su través. Frente a la superficie de estudio (221) se acerca otra de referencia (241) de la que se conoce su topografía. El espacio intermedio se rellena con fluido ópticamente absorbente (23) y se ilumina el conjunto con una fuente extensa (15) de la que se pueden diferenciar al menos dos bandas espectrales con absorción diferente en el fluido (23). El cociente de radiancias integradas en esas bandas espectrales no depende del punto de la fuente ni de la dirección de observación. El registro de imágenes (32) de la luz transmitida en esas bandas espectrales y su análisis posterior permite obtener el perfil completo de la superficie de estudio (221).

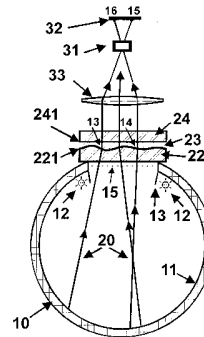


FIGURA 1

ES 2 400 436 A1

DESCRIPCIÓN

Perfilómetro tridimensional por absorción óptica en fluidos.

SECTOR DE LA TÉCNICA

La aplicación general de la invención es la medida de la topografía de cualquier superficie sobre substrato transparente o traslúcido, en especial
5 aplicada a todo tipo y forma de superficie óptica y dispositivos micro-ópticos, por complejos que sean en su forma y elevadas las pendientes que la conforman. Permite por tanto la perfilometría tridimensional de superficies.

ESTADO DE LA TÉCNICA

10 Las técnicas para medir la topografía de una superficie son muy variadas. En particular, la luz se usa de maneras diferentes para éste propósito desde antiguo y constantemente se van adaptando o mejorando las estrategias conocidas. Por ejemplo, a través de la medida de la interferencia de la luz que se refleja en una superficie al compararla con un haz de referencia. En este
15 caso la aparición de franjas de interferencia nos informa de la topografía a modo de curvas de nivel.

También se utiliza la luz mediante microscopía confocal y técnicas similares en las que un foco luminoso puntual actúa parecido a una sonda mecánica que barre la superficie, detectando variaciones en altura.

20 Las técnicas de imagen basadas en interferencia o en microscopía confocal requieren de un barrido o movimiento de elementos mecánicos para obtener la información. La necesidad de movimientos mecánicos o de barridos de sondas mecánicas o luminosas hace la técnica más propensa a errores y da lugar a un consumo de tiempo significativo.

25 Con niveles peores de resolución en altura, encontramos la proyección de luz estructurada y la triangulación o el *shadow-Moiré*, más típicamente utilizadas en superficies con reflexión difusa.

Todas las técnicas conocidas basadas en la reflexión de la luz sobre la superficie a explorar tienen limitaciones para abordar pendientes locales

moderadamente altas o ya en el extremo de superficies cuasi discontinuas, como por ejemplo en redes almenadas, lentes de Fresnel clásicas y matrices de microprismas.

5 Asimismo, en la mayoría de las propuestas conocidas, la resolución en altura depende proporcionalmente del campo de observación o extensión del área explorada, si se basa en el procesado de imágenes del área explorada. Si la técnica se basa en un barrido punto a punto la resolución en altura no depende de la extensión del barrido, pero sin embargo, la medida es extremadamente lenta en comparación.

10 Recientemente se han incorporado propuestas basadas en luz transmitida que utilizan la absorción óptica en un líquido para obtener información topográfica de una muestra. Por la conocida ley de Lambert-Beer se puede predecir la intensidad, o más propiamente la radiancia, de un haz luminoso conforme atraviesa un material óptico absorbente en función de la distancia recorrida t y del coeficiente de absorción α . En particular, la transmitancia
15 aplicable a ese haz es expresable como $T = \exp(-\alpha t)$.

Así, encontramos el trabajo de Steven R. Ogilvie et al (*Image Anal. Stereol.* 2002 y *Earth and Planetary Science Letters* 2001) que se describe a continuación. Por encima de la superficie a explorar se vierte absorbente
20 óptico en disolución acuosa hasta un cierto nivel de referencia, una fuente luminosa extensa arbitraria introduce luz por abajo y por encima se coloca una cámara digital que toma una imagen de la superficie de interés a través del líquido absorbente. Para poder tener un análisis correcto de la información hace falta tomar una segunda imagen de referencia, para ello Ogilvie y
25 colaboradores proponen el uso de agua pura (no absorbente) cubriendo la muestra al mismo nivel que el absorbente. Esto es necesario para poder calcular la transmitancia T punto a punto como el cociente de la imagen con absorbente respecto a la imagen con agua pura (cociente referido a valores de señal o niveles de gris punto por punto). Para ello es necesario vaciar y
30 rellenar los líquidos y con ello se debe mover la muestra y volverla a colocar en posición. Esta forma de proceder es inconveniente, por la dificultad de

obtener niveles de líquido precisos y por la necesidad de un estricto alineamiento y posicionado de la muestra entre imágenes, dando lugar a errores.

La técnica propuesta en la patente y publicaciones de Model (US2009/0027676A1 y en *Journal of Microscopy*, 2008), plantea una idea similar orientada a la observación de superficies con un microscopio. Las superficies son iluminadas y barridas por un haz luminoso focalizado en una zona pequeña, por ejemplo un haz láser. En este caso no se utiliza una imagen de referencia sino que se asume que la intensidad del haz luminoso incidente es constante sobre el campo de observación y en el tiempo, lo cual no es fácil de cumplir.

El esquema e hipótesis de Model tampoco es suficiente para explorar una superficie genérica, en particular con pendientes elevadas, ya que la luz transmitida en la dirección y apertura de observación no sólo depende de la absorción óptica en el líquido, sino que también depende de la propia topografía de la muestra. Es decir, a través de la desviación de la luz por refracción se produce el consiguiente viñeteado de los haces al no entrar total o parcialmente en la apertura de captación, es decir, en la pupila de entrada del sistema óptico de formación de imagen. Por ello, la atenuación observada de la luz no sólo depende de la absorción óptica en un líquido sino del diseño óptico, incluyendo en este la propia fuente de iluminación. Por todo ello, el planteamiento de Model es complicado para un análisis de los datos que permita extraer de manera fiable la topografía de una superficie arbitraria. En casos de pendientes elevadas puede ser incluso inviable por la pérdida total de los haces luminosos.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

La invención permite, por contraste con las técnicas del estado de la técnica, la metrología topográfica de superficies ópticas complejas, con pendientes máximas de hasta 90° y totalmente escalable en el área de exploración, desde micras a decenas de cm. No requiere de componentes móviles ni tampoco de estabilidad temporal en la fuente de iluminación.

En esencia, la invención utiliza la luz transmitida y la medida de la atenuación óptica al interponer un fluido absorbente entre la superficie de estudio y una superficie de referencia. Para resolver las dificultades mencionadas en el estado de la técnica se introducen dos novedades relativas a propiedades específicas de la fuente de iluminación y descritas por:

1) el uso de una fuente luminosa extensa que emite (para todo punto y dirección) en al menos dos bandas espectrales estrechas y que sea posible diferenciarlas, bien porque se emitan así en origen o porque se diferencian a posteriori por medio de filtros de paso-banda antes de la detección. Una banda espectral actuará como luz sensora y la otra banda espectral como luz de referencia, y

2) la fuente luminosa debe cumplir la propiedad de que el cociente de radiancias entre bandas espectrales no depende ni de la posición de la fuente observada, ni de la dirección de observación (en un semiespacio). Las radiancias pueden variar su magnitud con la posición y dirección de observación, pero no el cociente de las mismas. La radiancia debe entenderse como la radiancia integrada en la banda espectral correspondiente.

Estas condiciones de la fuente luminosa garantizan el poder realizar una medida topográfica fiable, rápida y sin partes móviles de ninguna clase. En la figura 1 se muestra un esquema completo de configuración del invento en una realización preferente. La superficie a medir (221) y una superficie de referencia (241) se acercan la una a la otra con un fluido interpuesto (23), líquido o gas, capaz de absorber luz en alguna región espectral (41) (figura 4), en particular lo debe hacer de manera diferente en cada banda espectral diferenciada de la fuente (42) (43) (figura 4). El líquido absorbente (23) rellena toda la distancia entre ambas superficies (221) y (241).

La superficie de estudio (221) pertenece a un substrato (22) que debe ser transparente o translúcido a las bandas espectrales en consideración (figuras 2 y 3). El vidrio o substrato de referencia (24) debe ser transparente a esas bandas espectrales y está definido por la superficie (242) y la superficie (241)

que hace de superficie de referencia o comparación con la que es objeto de estudio (221). El substrato de referencia (24) debe permitir observar a su través y directamente la superficie a estudiar (221) y por medio de un sistema de captación de imagen ((31), (32) y (33)).

- 5 El conjunto de muestra, líquido absorbente y substrato de referencia ((22), (23) y (24)) se ilumina con una fuente luminosa extensa, cuya superficie de emisión (real o aparente) (15) tiene las propiedades descritas anteriormente. Preferentemente, se ilumina por el lado de la muestra. Al otro lado se sitúa un sistema de captación de imagen ((31), (33)) cuya única condición es que
10 debe formar una imagen lo más nítida posible de la superficie a topografiar (221) sobre un sensor de captación de imagen (32). La relación de aumento lateral puede ser arbitraria. De cada punto de la superficie a medir (221), representados por los puntos (13) y (14) en la figura 1, se forma una imagen en el sensor de imagen, representados por los puntos (15) y (16)
15 respectivamente (figura 1).

La señal detectada en cada punto o píxel de la imagen (E) es proporcional a la radiancia (L) de cada punto de la superficie observada (221) propagada a través de los diferentes medios. A cada punto del objeto o superficie a explorar le corresponde por tanto una radiancia que depende de los medios
20 fijos: fuente de luz, substratos, lentes,... y que también depende de la transmitancia interna del fluido interpuesto. A su vez, la transmitancia del fluido depende de la distancia t (231) entre la superficie a medir (221) y la superficie de referencia (241) (figuras 2 y 3), medida a través de la trayectoria del haz principal de captación de imagen (25).

- 25 La transmitancia interna del fluido T se comporta con la ley de Lambert-Beer, es decir según la expresión $T=\exp(-\alpha t)$, donde α es el coeficiente de absorción para el fluido absorbente. Para una banda espectral finita y suficientemente estrecha, esta ley se cumple de manera exacta. Para saber cuanto de estrecha debe ser esta banda espectral de detección, la clave es
30 considerar que la curva de absorción espectral del fluido interpuesto varíe muy poco en ese rango o anchura espectral de banda. En la práctica es

posible relajar esta condición y es sencillamente posible calibrar la respuesta del dispositivo mediante una tabla de correspondencias.

La fuente luminosa extensa debe permitir iluminar la muestra desde todas las direcciones de incidencia (20) y en dos bandas espectrales diferenciadas 1 y 2, con longitudes de onda media λ_1 y λ_2 y donde los coeficientes de absorción del fluido - α_1, α_2 - son diferentes.

El sistema óptico y electrónico para la adquisición de imagen, toma imágenes de la muestra para cada banda espectral, de forma simultánea o secuencial. Para cada imagen, se tiene una distribución de irradiancia en el plano sensor de imagen dado por E_1 y E_2 . Cada una de estas señales se puede expresar como:

$$E_1 = L_1 \tau_1 C \cdot \exp(-\alpha_1 t) \quad \text{y} \quad \text{(i)}$$

$$E_2 = L_2 \tau_2 C \cdot \exp(-\alpha_2 t), \quad \text{(ii)}$$

dónde L_1 y L_2 son las radiancias de la fuente extensa para cada banda espectral (identificadas por λ_1 y λ_2), τ_1 y τ_2 son los factores de transmisión o transmitancia (para cada banda espectral) de todo el sistema óptico desde la fuente hasta la imagen sin contar con la transmitancia del fluido absorbente que es expresada con el término exponencial. Finalmente, C es una constante geométrica que depende fundamentalmente de la apertura del haz usado en la captación de imagen (25) y no depende de la banda espectral.

El cociente de las irradiancias de las dos imágenes punto a punto, que denotamos como M ($M = E_2/E_1$) nos permite llegar a la siguiente expresión

$$M = (L_2 \tau_2 / L_1 \tau_1) \cdot \exp[-(\alpha_2 - \alpha_1) \cdot t] \quad \text{(iii)}$$

y que a su vez podemos expresar como

$$t - t_0 = -\ln(M) \cdot t_s, \quad \text{(iv)}$$

dónde t es la distancia (231) entre la superficie a medir (221) y la superficie de referencia (241) medida en la trayectoria del haz de observación (25) de cada punto considerado. t_s se define por $t_s = 1/(\alpha_2 - \alpha_1) = 1/(\alpha_s)$ y representa la altura a la cual la luz se atenúa en un 36.8% en términos relativos al

comparar λ_1 y λ_2 . t_s proporciona una forma adecuada de caracterizar las propiedades de absorción del fluido. t_0 es una altura de base residual definida por $\alpha_s t_0 = \ln(L_2 \tau_2 / L_1 \tau_1)$.

La ecuación (iv) es la fórmula inicial para calcular el perfil topográfico de la superficie de estudio (221) punto a punto en base a la información cuantitativa que proveen las imágenes en niveles de gris o cualquier otra cuantificación de la señal imagen.

Cuando el cociente $L_2 \tau_2 / L_1 \tau_1$ no depende de la posición y dirección de observación tenemos que el parámetro t_0 es una constante espacial y por tanto, no es relevante en la medida de la topografía de la superficie de interés (ver expresión (iv)). Para ello debemos disponer de una fuente extensa que tenga ésta propiedad, es decir, que el cociente de radiancias sea constante (L_2 / L_1) para la posición y dirección de observación como hemos indicado al principio.

A su vez, debe cumplirse que el resto del sistema óptico tenga un cociente de transmitancias (τ_2 / τ_1) constante u homogéneo. La homogeneidad es técnicamente mucho más fácil de cumplir para el cociente de magnitudes que para los valores absolutos de las mismas, punto a punto, y esto es una de las ventajas principales de la invención, pues simplifica notablemente el análisis.

En la práctica, la inmensa mayoría de las muestras de interés para su caracterización en el campo de la óptica son homogéneas y por tanto cumplen esta propiedad para el cociente τ_2 / τ_1 . Para una muestra no homogénea es aún posible la caracterización, pero necesita de la captación de imágenes con un líquido no absorbente para poder extraer información extra sobre ese cociente relativo a los medios ópticos que no son el fluido absorbente.

La luz captada por el dispositivo de imagen (25) puede provenir en origen de zonas diferentes de la fuente extensa (20), en función de la propia topografía de la muestra (figuras 1, 2 y 3). En especial, para pendientes pronunciadas el efecto es notable debido a la refracción. Es por ello importante que, en general, la fuente extensa provea de luz en un máximo de direcciones

posibles de incidencia sobre la propia superficie a medir (221), es decir internamente. En este sentido, según la figura 3, es conveniente en algunos casos colocar un difusor (21) acoplado ópticamente al substrato (22) por la cara opuesta (222) a la que se quiere topografiar (221). Este difusor
5 complementario (21) puede ser necesario cuando el índice de refracción del substrato de la muestra es elevado y/o cuando las pendientes de la superficie a topografiar son también muy elevadas. Alternativamente y con carácter general, un fluido absorbente con un índice de refracción de valor próximo al de la muestra, tiene como consecuencia una reducida refracción y, por tanto,
10 la desviación de los rayos luminosos son pequeñas (fluido-substrato). De esta manera es posible también acceder a pendientes elevadas (figura 2) aunque la apertura numérica de iluminación no sea máxima.

Con esta configuración de invención, el dispositivo de captura de imagen siempre tiene un haz no viñeteado disponible, independiente de la pendiente
15 de la superficie a medir y sobre el que la comparación entre haces de distinta banda espectral es fiable según la ecuación (iv) y sólo depende de la absorción en el fluido interpuesto entre la superficie a perfilar y la superficie de referencia.

La superficie de referencia (241) puede tener una forma arbitraria pero debe
20 ser conocida para que sirva de referencia. Idealmente, la superficie de referencia debe tener un perfil que se parezca a perfil promedio de la superficie a estudiar. Por ejemplo, para analizar superficies básicamente cóncavas o convexas, puede ser muy adecuado el que la superficie de referencia sea una esfera con la curvatura próxima a la superficie a estudiar.
25 Esto permite tener medidas con mayor resolución en el perfil.

Algunos absorbentes en disolución acuosa alcanzan valores mínimos de t_s del orden de la micra o inferior. Es posible demostrar que la resolución es proporcional a t_s , de entre 10^{-2} y 10^{-5} veces esa distancia nominal dependiendo de la relación señal-ruido en la imagen. Por tanto, es posible
30 alcanzar resoluciones por debajo del nanómetro, comparables a lo que se obtiene con las mejores técnicas interferenciales de medida.

El rango dinámico del perfil en altura se sitúa en torno a dos-cuatro veces el valor de t_s , por ello, en función de la expectativa de variación máxima del perfil (pico-valle) se debe ajustar el absorbente y la superficie de referencia para obtener el rango y la resolución en altura deseados.

- 5 Es también posible aplicar la invención sin necesidad de conocer las propiedades de absorción del fluido empleado (es decir t_s). Para ello se puede disponer de una superficie de referencia (241) en la que estén grabados diferentes escalones o pozos de altura conocida. La observación de estas discontinuidades en la imagen procesada M nos permite establecer una
- 10 relación entre los saltos en la magnitud M y el salto de altura conocido asociado a cada escalón o discontinuidad. De esta forma se puede auto-calibrar la imagen para obtener el perfil deseado.

El uso de escalones de calibración en la superficie de referencia no tiene porqué afectar a la medida de la superficie problema en su conjunto, ya que

15 se puede asumir que, en la justa inmediatez espacial al escalón, la muestra tiene una superficie continua en general, y por tanto, en el límite de proximidad al escalón, el único salto de perfil o discontinuidad esperable es el del propio escalón de referencia.

Alternativamente, la propia muestra puede tener tallados escalones de

20 autocalibración o puede haber detalles de su estructura de los que se conozca con precisión el salto de altura topográfico (pico-valle) o incluso la topografía completa para ese detalle de la estructura superficial.

Así mismo, el uso de varias bandas espectrales diferenciadas (más de dos) puede ayudar a compensar posibles efectos de aberración o dispersión

25 cromática en los medios ópticos en los que la luz se refracta. También permite extender el rango dinámico (pico-valle) de utilización para un fluido absorbente en particular. Es decir, al seleccionar diferentes pares de bandas espectrales se tienen diferentes t_s y por tanto diferentes rangos y/o resoluciones sin mover o cambiar el sistema.

30 Por último, la aplicación de un tratamiento antirreflejante en las superficies del sistema óptico considerado puede reducir reflexiones espurias que de no

tratarse o estimarse, pueden contribuir a errores sistemáticos en la estimación del perfil si no se tienen en cuenta de forma explícita en el procesado de las imágenes. Por ejemplo, en la figura 2, la reflexión que se da en la última cara del substrato de referencia devuelve una fracción de luz hacia el interior (5 (~4%) que al reflejarse de nuevo en la cara más inferior se junta con la luz directa que se quiere captar. De no corregirse este efecto (mediante el tratamiento de datos o a través de capas antirreflejantes) la aplicación directa de la fórmula (iv) nos lleva a un cierto error en la estimación de t . En la mayoría de situaciones previstas este error no supera el 0.1% del valor de t .
10 Por ello, en un gran número de casos, no será necesario considerar este efecto ni tratarlo.

De forma natural, los fluidos absorbentes líquidos tendrán valores de índice de refracción próximos a los substratos de la muestra y de referencia. Esto permite que las reflexiones espurias entre superficies tengan en general un
15 efecto despreciable aunque es recomendable acercar al máximo esos valores de índice. Por otro lado, en el caso de tener pendientes elevadas en la muestra (próximas a 90°) si ocurre que en la propagación de la luz hacia la imagen, la superficie a explorar va primero y después el fluido, es conveniente tener un índice de refracción del fluido inferior al de la muestra, y
20 a la inversa en caso contrario. Esto evita que se mezclen en la observación otros haces luminosos que pudieran provenir de otras zonas de la superficie a explorar mediante el mecanismo de reflexión total.

DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

- 25 Figura 1
Esquema básico de funcionamiento del perfilómetro en una realización preferente.
- Figura 2
30 Detalle de la muestra de la figura 1 y trazado de rayos explicativo. La muestra (22) tiene la cara inferior lisa (222) y la luz le llega de todas las direcciones

(20) desde la superficie emisora de la fuente (15) (figura 1). La cara superior es la superficie a topografiar (221). A continuación la luz atraviesa un fluido absorbente (23) para después salir por el substrato (24) que permite una referencia de comparación (superficie (241)) y la observación directa
5 mediante un sistema de captación de imagen posterior.

Figura 3

Sobre la situación de la figura 2 se añade un difusor (21) acoplado ópticamente a la muestra en (222) para asistir en la generación de luz para
10 todo ángulo de incidencia sobre la superficie de estudio (221).

Figura 4

Ejemplo de emisores y absorbentes. Curvas normalizadas de emisión espectral de emisores LEDs utilizables (cyan (42) y rojo (43)) y absorbancia
15 de un fluido absorbente (mercromina al 2% soluble en agua (41)).

Figura 5

Medida de una matriz de micro prismas usados en óptica oftálmica (periodo de 1.4 mm, altura pico-valle de 57 μm). En (51) se muestra la medida de la
20 magnitud M (cociente de imágenes). En (52) se muestra un perfil lineal extraído de la imagen procesada a través de la ecuación (iv) y en (53) se muestra una representación tridimensional de la topografía calculada según la ecuación (iv)

25 Figura 6

Ejemplo de medida aplicado a matrices de lentes cilíndricas. En (61) se muestra una representación tridimensional y en (62) un perfil lineal parcial obtenido en dirección perpendicular al eje de la matriz de lentes.

MODO DE REALIZACIÓN DE LA INVENCION

Un modo de realizar y aplicar la invención se explica a continuación. Una forma de disponer de una fuente luminosa extensa con las propiedades requeridas es por medio de una esfera integradora recubierta interiormente
5 (11) de sulfato de bario u otro material altamente reflectante y difusor.

Como emisores luminosos primarios se pueden disponer de al menos 2 emisores LED (*Light Emitting Diodes*) (12). Por ejemplo, un primer LED rojo centrado en la longitud de onda $\lambda_2=627$ nm y semianchura espectral de 10-25 nm (anchura de banda espectral a mitad de valor del pico de emisión) (43) y
10 un segundo LED cyan centrado en la longitud de onda $\lambda_1=515$ nm y semianchura espectral de 20-50 nm (42) (ver figura 4). Los emisores primarios u otros utilizables, debieran tener, preferiblemente, una emisión angular próxima a la distribución lambertiana (es decir de radiancia constante con el ángulo). El emisor o los emisores primarios deben situarse en el
15 interior de la esfera muy próximos entre sí (~pegados) y próximos a la abertura de salida de la esfera integradora. Los emisores pueden apuntar hacia el centro de la esfera aproximadamente pero es mejor que su luz esté apantallada (13) para que no haya iluminación directa hacia la muestra (22) en primer orden, y en segundo orden tampoco hacia las superficies que
20 después envían luz directa hacia la muestra (20). Con estas prescripciones se consigue que la luz que sale por el puerto (o abertura) de salida de la esfera integradora cumpla con las propiedades buscadas de manera muy aproximada, es decir, que independientemente del punto de la abertura o de la dirección de observación, el cociente entre las radiancias de las bandas
25 espectrales diferenciadas (LEDs rojo y cyan en el ejemplo) medidas en un punto y/o dirección arbitrarios, da como resultado un valor constante o muy aproximadamente constante. El valor concreto de ese cociente no es importante.

La mezcla previa de la luz emitida por estos emisores primarios en una esfera
30 integradora secundaria más pequeña, acoplada a la principal y satélite de la misma puede ser una solución incluso más satisfactoria para conseguir la

constancia en el cociente de radiancias de las bandas espectrales diferenciadas. Alternativamente, esta propiedad puede conseguirse aún con mayor simplicidad si se coloca a la salida de la esfera integradora principal y previo a la muestra, un difusor de la luz de naturaleza arbitraria, por ejemplo, un vidrio opal.

En la literatura se puede encontrar abundante información de cómo disponer los emisores primarios dentro de una esfera integradora u otro dispositivo óptico para conseguir maximizar el grado de uniformidad. Otras posibilidades de homogenización y mezcla de los flujos luminosos son también viables. Por ejemplo, se puede recurrir a una cavidad de forma arbitraria pero funcionando de manera similar a una esfera integradora, o a una fuente luminosa arbitraria a la que, a continuación, se coloca una colección de filtros difusores y otros elementos ópticos para conseguir las propiedades buscadas en la fuente. Estos modos alternativos de configurar la fuente son de interés, por ejemplo, si se requiere la disminución del volumen que ocupa la fuente luminosa y, siempre en compromiso con el grado de incertidumbre que se desea para la respuesta del aparato en función de las propiedades de la fuente.

A continuación se dispone la muestra (22) en un modo de realización preferente, tal que, la cara de la muestra de la que no se desea obtener el perfil (222), se enfrenta a la fuente luminosa extensa ya mencionada. Esta cara (222) es la primera que recibe la luz. La segunda cara que recibe la luz es la que se desea medir (221). La luz entre caras dentro del substrato de la muestra puede propagarse de manera directa o difusa y finalmente incide sobre la cara a medir con un gran abanico de ángulos de incidencia o ángulo sólido de haz. Idealmente, debe cubrir un semiespacio (2π estereorradianes), especialmente en caso de tener superficies (221) con pendientes abruptas (próximas a 90°).

Para asegurarse el máximo de ángulo sólido de incidencia sobre cada punto de la superficie (221) se puede acoplar ópticamente un difusor (21) (figura 3) por medio de un líquido de índice interpuesto que permita el acoplo óptico entre el difusor (21) y el substrato de la muestra (22). El líquido de índice

debe tener un valor de índice de refracción próximo al del substrato de la muestra (22) y al del material del propio difusor (21).

Por encima de la superficie a estudiar se coloca un fluido absorbente arbitrario (líquido o gas) pero que debe tener propiedades de absorción diferente para cada banda espectral diferenciada (λ_1 y λ_2) de la fuente luminosa y finalmente detectadas. Por ejemplo, es práctico usar un absorbente soluble en agua y que pueda ser limpiado a posteriori. Como ejemplo, podemos usar mercromina (mercurocromo) (41) en concentración adecuada y que absorbe fuertemente la luz del LED cyan (42) y deja pasar la luz del LED rojo (43) antes mencionados. En la figura 4 se muestra la absorbancia espectral de la mercromina normalizada (41). Concentraciones de disolución diferentes nos dan diferentes propiedades de absorción. Esta propiedad de absorción específica del fluido absorbente asociada al sistema óptico de la invención se expresa a través del parámetro t_s de la expresión (iv) y que es propio de cada fluido absorbente y de su concentración en caso de usar una disolución en combinación con las bandas espectrales diferenciadas de la fuente. La diferente absorción del fluido elegido nos permite modular tanto la sensibilidad como el rango de perfil medible para cada muestra en particular. Por ejemplo, podemos variar la concentración del absorbente en una disolución dadas dos bandas espectrales concretas, o también, elegir diferentes bandas espectrales para un mismo fluido.

A continuación, se coloca una superficie de referencia (241) y que por tanto, su topografía debe ser conocida. El caso más sencillo de tratar será una superficie plana. Así por ejemplo, podemos situar una placa de vidrio transparente de caras plano-paralelas (24) y de fácil disponibilidad. Lo ideal es presionar dicha placa con un líquido absorbente entre medias de la superficie muestra (221) y la superficie de referencia (241). Debe procurarse mantener la mínima distancia entre las superficies que encierran al líquido absorbente. También es deseable evitar la formación de burbujas y la presencia de partículas en suspensión que dejarían zonas de la superficie ciegas o inválidas para el análisis de datos posterior.

La superficie de referencia no tiene por que ser plana. De hecho puede ser curva y parecerse a la superficie a explorar a modo de patrón de comparación. Esta situación es conveniente en el estudio de superficies ópticas esféricas o de perfil más complejo como por ejemplo en lentes progresivas. También en la medida de superficies ópticas semi-terminadas (aún no pulidas ópticamente) al comparar la superficie semi-acabada con el objetivo final (a modo de patrón de referencia). Con ello se puede aumentar la resolución considerablemente en todo el campo de observación, independientemente de su extensión.

También es posible ordenar la muestra y el medio óptico de referencia en orden inverso al planteado anteriormente, es decir, primero el substrato de referencia y después la muestra. Pero en este caso el resultado no es tan directo y el procesado de la información es más complicado en general, al tener que tener en cuenta la refracción de los haces luminosos en la superficie de estudio.

A continuación, se coloca un dispositivo de captura de imagen, por ejemplo una cámara con una matriz CCD o CMOS para el registro digital de la imagen o cualquier otra tecnología de detección que permita un registro cuantitativo. La imagen la proporciona un sistema óptico enfocado a la superficie de estudio. Este sistema óptico puede variar desde una lente objetivo de fotografía para captar campos de visión grandes (31) a, en el otro extremo, un objetivo de microscopía para captar campos pequeños en el objeto, pero con gran resolución lateral. La imagen debe estar enfocada al plano promedio de la superficie a explorar (221) y la observación debe hacerse más o menos en perpendicular a dicho plano promedio. El sistema óptico simplemente debe proyectar una imagen de la superficie de estudio sobre el sensor de imagen (32) para su captura y registro digital. Puede ser cualquier tipo de sistema óptico que cumpla esa función, independientemente del aumento lateral y distancias implicadas. En particular, un sistema telecéntrico como el ilustrado en la figura 1 simplifica el tratamiento geométrico de datos si, además, el substrato de referencia es una placa de caras plano-paralelas, pues la geometría de los haces que portan la información es muy sencilla. Sin

embargo, no siempre es adecuado un sistema telecéntrico por sus limitaciones de coste y resolución lateral. En base a los elementos adquiribles comercialmente no es tan recomendable, para campos lineales en el objeto por encima de unos 4 cm y por debajo de 0.5 cm aproximadamente.

- 5 No obstante, cualquier sistema óptico de formación de imagen requerirá de una calibración precisa de las coordenadas espaciales, para asignar correctamente los valores de topografía, tal cual derivan de la expresión (iv) a valores topográficos tridimensionales (en coordenadas xyz).

El procedimiento de operación puede ser el siguiente. Se enciende uno de los
 10 emisores de banda espectral estrecha, o bien, se activa el modo de diferenciar dicha banda (por ejemplo con un filtro paso banda). En el caso del ejemplo expuesto, consideraremos el encendido del emisor LED cyan (λ_1). Se registra entonces una imagen (I_1) con la máxima relación señal ruido sin que haya zonas de saturación en el sensor de imagen. Para conseguirlo podemos
 15 actuar sobre los parámetros de la cámara (tiempo de integración preferentemente) o la alimentación eléctrica del emisor luminoso para variar el flujo luminoso emitido. A continuación, se apaga el primer emisor y se enciende el segundo emisor de manera independiente (o correspondientemente, se activa algún mecanismo para diferenciar en la
 20 detección esa segunda banda espectral). En el ejemplo propuesto se enciende el emisor LED rojo (λ_2), y se toma una segunda imagen (I_2) de manera similar al primer caso, es decir optimizando la relación de señal ruido. Por último, se apagan todos los emisores y se toma una tercera imagen (I_F) para capturar la luz de fondo y señal de oscuridad del propio registro
 25 electrónico en las condiciones de tiempo de integración de las capturas previas. La imagen de fondo se resta a las dos imágenes previas y se hace el cociente de las imágenes resultantes, es decir, $E_2/E_1=(I_2-I_F)/(I_1-I_F)$. Esta operación coincide por tanto con la expresión (iii) y da directamente la magnitud cociente M buscada.

- 30 A la magnitud experimental M o imagen cociente le podemos aplicar la ecuación (iv) para calcular el perfil o distancia desde la superficie de

referencia a la superficie de estudio, más una cierta distancia t_0 desconocida (a veces se refiere en la literatura como término pistón), pero que es irrelevante para el conocimiento de la topografía si se cumplen las condiciones exigidas a la fuente luminosa, ya que t_0 es constante en ese caso y actúa simplemente como referencia residual.

La distancia t , extraída de esta forma de proceder, es la distancia entre puntos de la superficie de referencia y puntos de la superficie de estudio a través de las líneas definidas por los rayos principales. Los rayos principales son los rayos promedio de los haces luminosos usados en la captura de imagen (25) por cada punto considerado. La apertura del haz luminoso está determinada por el sistema óptico de formación de la imagen a través de su pupila de entrada. Es por tanto importante conocer la configuración del sistema óptico en su conjunto, en particular la orientación de esos rayos principales desde la pupila de entrada del sistema óptico de captación de imagen. Esta información geométrica nos permite poder transformar la variable topográfica experimental t a un perfil expresado en coordenadas cartesianas (xyz) o cualesquiera otras coordenadas de representación espacial que sean de utilidad y que cualquier experto en la materia sabría calcular, conociendo como se propagan los haces a través de los diferentes medios en base a la ley de la refracción.

El factor de escala t_s en la expresión (iv), que se corresponde con las propiedades de absorción del líquido utilizado, debe ser conocido previamente en una realización preferente. Este parámetro se puede obtener, por ejemplo, a través de una calibración del líquido realizada con dos superficies de topografía conocida y midiendo como se ha referido anteriormente. El ejemplo más sencillo puede ser disponer del líquido a calibrar entre una superficie esférica de radio conocido (p.e. una lente) y una superficie plana. Del ajuste de los datos siguiendo el procedimiento anterior se puede extraer t_s conociendo la topografía de las superficies y las propiedades de formación de imagen y geométricas específicas del experimento.

Otra posibilidad más directa de realización de la invención es la auto-calibración, sin necesidad de conocer a priori las propiedades del fluido absorbente como ya se ha mencionado en la descripción de la invención. Por ejemplo, si la superficie de referencia tiene grabados escalones o pozos de profundidad de salto conocido, esta información puede ser usada directamente para codificar el resto de la imagen final M para una muestra arbitraria. Al menos hace falta un escalón para poder extrapolar los datos para otras alturas o distancias de perfil.

El uso de escalones de calibración en la superficie de referencia no tiene porqué afectar a la medida de la superficie problema en su conjunto, ya que se puede asumir que, en la justa inmediatez espacial al escalón, la muestra tiene una superficie continua en general, y por tanto, en el límite de proximidad al escalón, el único salto de perfil o discontinuidad esperable es el del propio escalón de referencia. Es recomendable, por tanto, integrar la información a lo largo de la discontinuidad del escalón, por ambos lados del mismo. El salto en M entre ambas líneas virtuales pegadas al escalón debiera ser constante y conforme al salto de perfil conocido, estableciendo un par de calibración $(t-t_0, M)$. Este dato, usado en la ecuación (iv), permite averiguar el parámetro de escala o absorción t_s . El uso de más escalones o pares de calibración permitiría corregir errores, por ejemplo las no linealidades esperables si las bandas espectrales diferenciadas no son suficientemente estrechas en relación a las curvas de absorción del fluido.

Alternativamente, la propia muestra puede tener tallados escalones de autocalibración o puede haber detalles de su estructura de la que se conozca con precisión el salto de altura topográfico (pico-valle) o incluso conocer la topografía completa para un detalle de la superficie y actuar de manera similar a la descrita en el párrafo anterior.

En rigor, la expresión (iv) sólo vale si las bandas espectrales de los emisores son muy estrechas en comparación con la variación espectral de la curva de absorción del fluido utilizado. En un caso general, para poder usar emisores y absorbentes de tipo arbitrario, es posible una calibración que establezca a modo de tabla, una relación entre valores de perfil t y valores de la magnitud

medida M y que no se corresponda necesariamente con la curva de calibración descrita por la ecuación (iv). La calibración de esta tabla de valores o curva t - M puede ser como se ha mencionado en los párrafos anteriores, es decir, a través de una relación perfilométrica conocida entre dos superficies, actuando las dos como superficies de referencia. Si se desea resolver la ambigüedad en t_0 es aconsejable que las dos superficies se toquen en algún punto y ahí sea posible establecer una distancia de separación nula en ese punto particular y de esta manera averiguar el valor de t_0 para el resto de la medida.

10 Como ejemplo práctico de uso de la invención se han obtenido imágenes de diferentes dispositivos micro-ópticos y macro-ópticos por el procedimiento descrito y de los que se muestran los resultados perfilométricos mostrados en las figuras 5 y 6, validando la técnica. Para los casos experimentales mostrados en las figuras 5 y 6 se usan concentraciones de mercromina del 15 0.2% y del 2% en agua respectivamente ($t_s \sim 8\mu\text{m}$ y $t_s \sim 80\mu\text{m}$).

En un modo de realización preferente, se usan dos imágenes tomadas en bandas espectrales diferentes provenientes de la fuente extensa, pero alternativamente se puede usar una fuente policromática como fuente emisora primaria y la ayuda de filtros ópticos situados en alguna parte del dispositivo, preferentemente en el sistema de captación de imagen. O también, el uso de dos bandas de emisión espectral estrechas en la fuente y la captura de una imagen en un dispositivo de tipo multicanal o RGB (*Red, Green, Blue*) en la que al menos dos canales (el rojo y el azul por ejemplo) se usan para el procesamiento de la información. Estas soluciones no son preferentes pues plantean ciertos problemas de alineamiento fino y con ello cierta complicación en la fiabilidad o procesamiento de la información.

APLICACIÓN INDUSTRIAL

La aplicación general de la invención es la medida de la topografía de cualquier superficie sobre sustrato transparente, en especial aplicada a todo tipo y forma de superficie óptica y dispositivos micro-ópticos, por complejos

que sean en su forma y elevadas las pendientes que la conforman. Completamente escalable, puede abordar desde dispositivos micro-ópticos, con resolución lateral del orden de la micra, hasta ópticas convencionales, con tamaños de exploración en el rango de decenas o centenares de cm. La
5 resolución en altura alcanzable se sitúa por debajo del nanómetro (10^{-6} mm) según se deriva de resultados experimentales y analíticos. Estos valores son perfectamente comparables a los mejores sistemas de mayor resolución conocidos basados en interferencia de haces luminosos o en microscopía confocal, pero que tienen otras limitaciones ya mencionadas en el estado de
10 la técnica.

Su aplicación tiene sentido en el control de calidad y caracterización de todo tipo de óptica, por su grado de precisión y adaptabilidad. En especial, resulta de especial ayuda con respecto a las técnicas conocidas a la hora de abordar superficies complejas, como las denominadas de superficie libre ("*free-form*"),
15 las lentes asféricas, las matrices de lentes y todo tipo de dispositivos micro-ópticos, dónde las técnicas de caracterización conocidas tienen severas limitaciones. Por ejemplo, el tiempo consumido cuando se basan en un barrido de una sonda mecánica u óptica punto a punto, y sobre todo la limitación del ángulo o pendiente máxima que puede tener una superficie para
20 poder ser medida con el estado de la técnica. Es por ello de especial relevancia su aplicación a dispositivos micro-ópticos como micro-prismas y lentes de Fresnel.

REIVINDICACIONES

1. Un dispositivo para medir la topografía de superficies sobre substrato transparente por transmisión de la luz que comprende:

5 una fuente luminosa extensa cuya superficie (real o aparente) provee de radiación luminosa difusa en al menos dos bandas espectrales diferenciadas, y en la que el cociente de radiancias de dichas bandas espectrales ha de ser constante o muy aproximadamente constante con la posición o punto observado y con la dirección de observación,

10 una superficie a medir que conforma una cara de un substrato o medio material que es transparente o traslúcido a las dichas bandas espectrales,

una superficie de referencia contra la que comparar y que conforma una cara de una ventana, una lente, un medio óptico o en general, un substrato transparente y homogéneo, y del que se conoce su topografía en conjunto y que permite la observación a través del mismo de la superficie a medir y permite por tanto obtener una imagen de la dicha superficie a medir,

15 un fluido ópticamente absorbente interpuesto o que rellena totalmente el espacio entre la superficie de referencia y la superficie de la que se desea medir la topografía o figura perfilométrica. El fluido debe tener propiedades de absorción diferentes para al menos dos de las bandas espectrales diferenciadas de la fuente luminosa mencionada,

20 un sistema de captación de imágenes sensible a la luz emitida por dicha fuente y que pueda registrar imágenes de la superficie a medir a través de los medios ópticos interpuestos,

25 unos medios físicos y computacionales que permitan un posterior tratamiento cuantitativo de las imágenes.

2. Un dispositivo para medir topografía de superficies según la reivindicación 1 **caracterizado** porque se conocen las propiedades de absorción del fluido (líquido o gas).

30

3. Un dispositivo para medir topografía de superficies según la reivindicación 1 **caracterizado** porque el vidrio o substrato de referencia tiene escalones tallados de salto conocido lo que permite auto-calibrar la medida sin necesidad de conocer la absorción del fluido.

5

4. Un dispositivo para medir topografía de superficies según la reivindicación 1 **caracterizado** porque el vidrio de referencia y el dispositivo de captación de imagen tienen una configuración que permite una observación telecéntrica de la superficie a medir.

10

5. Un dispositivo para medir topografía de superficies según la reivindicación 1 **caracterizado** porque la superficie de referencia es plana.

6. Un dispositivo para medir topografía de superficies según la reivindicación 1 **caracterizado** porque la superficie de referencia es curvada, típicamente esférica (cóncava o convexa).

7. Un dispositivo para medir topografía de superficies según la reivindicación 1 **caracterizado** porque la fuente extensa es una esfera integradora en la que se ilumina interiormente con al menos dos fuentes de banda estrecha, típicamente LEDs, pero pueden ser láseres o fuentes policromáticas con filtros ópticos paso-banda.

8. Un dispositivo para medir topografía de superficies según la reivindicación 1 **caracterizado** porque las imágenes se adquieren a través de filtros espectrales paso-banda interpuestos en el recorrido de la luz, en alguna posición desde los emisores luminosos primarios hasta el propio sensor de imagen.

9. Un dispositivo para medir topografía de superficies según la reivindicación 1 **caracterizado** porque en el substrato de referencia, la superficie opuesta a

la de referencia tiene un tratamiento antirreflejante en las bandas espectrales de exploración.

5 10. Un dispositivo para medir topografía de superficies según la reivindicación 1 **caracterizado** porque la luz incide primero en la superficie a medir y después en la de referencia.

10 11. Un dispositivo para medir topografía de superficies según la reivindicación 1 **caracterizado** porque la luz incide primero en la superficie de referencia y después en la que se quiere medir,

15 12. Un dispositivo para medir topografía de superficies según la reivindicación 10 **caracterizado** porque el fluido absorbente tiene un índice de refracción menor o igual que el material del sustrato de la superficie a muestrear.

13. Un dispositivo para medir topografía de superficies según la reivindicación 11 **caracterizado** porque el fluido absorbente tiene un índice de refracción mayor o igual que el material del sustrato de la superficie a muestrear.

20 14. Un dispositivo para medir topografía de superficies según la reivindicación 1 **caracterizado** porque el fluido absorbente tiene un índice de refracción intermedio entre el sustrato de muestra y el sustrato de referencia.

25 15. Un dispositivo para medir topografía de superficies según la reivindicación 1 **caracterizado** porque el fluido absorbente es una disolución acuosa de cualquier absorbente material (líquido o sólido).

30 16. Un dispositivo para medir topografía de superficies según la reivindicación 14 **caracterizado** porque se sitúa un difusor de luz cercano (o en contacto óptico) al sustrato de la muestra a medir por el lado o cara opuesta a la superficie a topografiar.

17. Un dispositivo para medir topografía de superficies según la reivindicación 15 **caracterizado** porque se sitúa un difusor de luz cercano (o en contacto óptico) al substrato de la referencia por el lado o cara opuesta a la superficie de referencia.

5

18. El uso del dispositivo según la reivindicación 1 para la medida de topografía de todo tipo de superficies ópticas y no ópticas que permitan el paso de la luz a su través.

10 19. El uso de un objeto estructurado que permita la calibración de las coordenadas espaciales de un dispositivo según la reivindicación 1.

15 20. Un procedimiento de tratamiento de las imágenes obtenidas por el dispositivo de la reivindicación 1 para obtener un perfil topográfico que comprende:

la adquisición de una primera imagen I_1 , tomada con iluminación en una banda espectral donde el fluido empleado tiene coeficiente de absorción $\alpha_{1,}$

20 la adquisición de una segunda imagen I_2 , tomada con iluminación en una banda espectral donde el fluido empleado tiene coeficiente de absorción $\alpha_{2,}$

la adquisición de una imagen con la fuente luminosa apagada que mide una imagen de fondo I_F ,

25 la estimación de una imagen de transmitancia bi-banda M por medio de la fórmula $M=(I_2-I_F)/(I_1-I_F)$ que toma la señal de las imágenes mencionadas punto a punto,

30 finalmente, la estimación punto a punto del perfil topográfico de la muestra respecto a la superficie de referencia, Δt , a través de la fórmula $\Delta t=-\ln(M) \cdot t_S$, donde t_S es el parámetro de absorción del fluido que se relaciona con los coeficientes de absorción del fluido empleado como $t_S=1/(\alpha_2-\alpha_1)$.

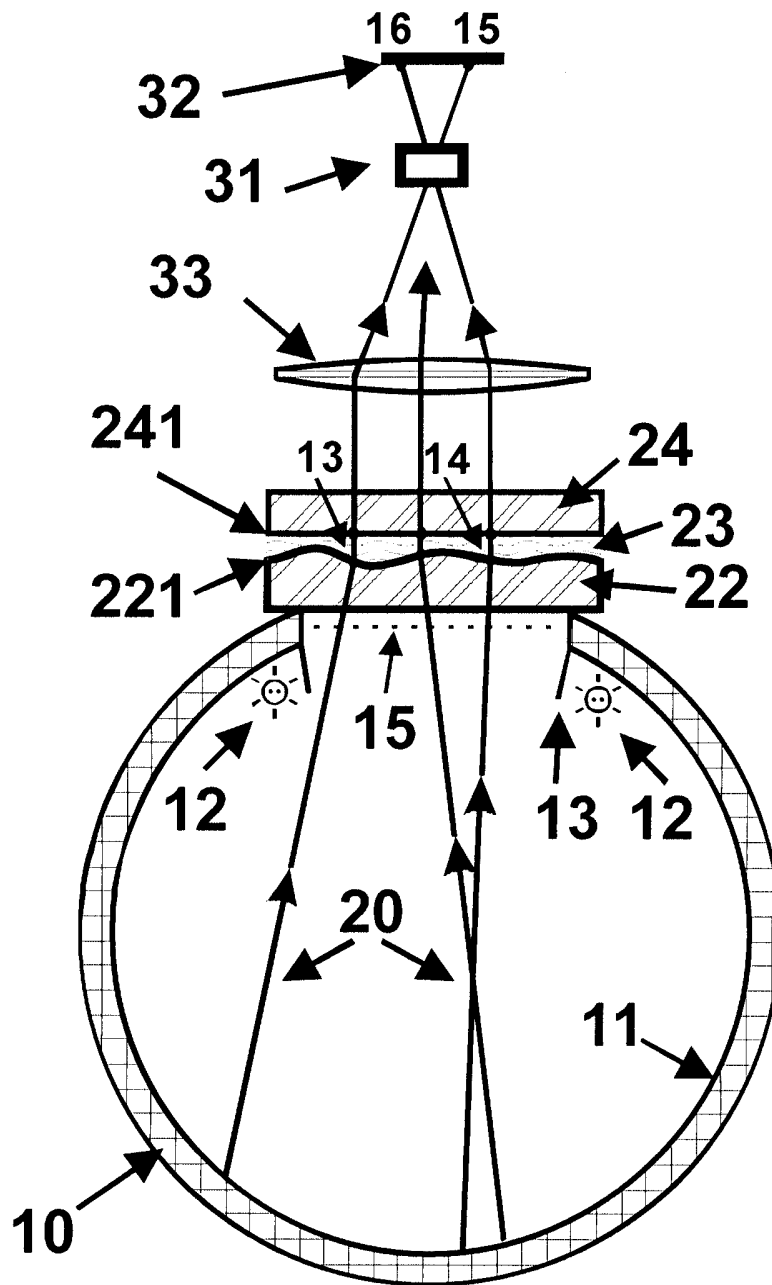


FIGURA 1

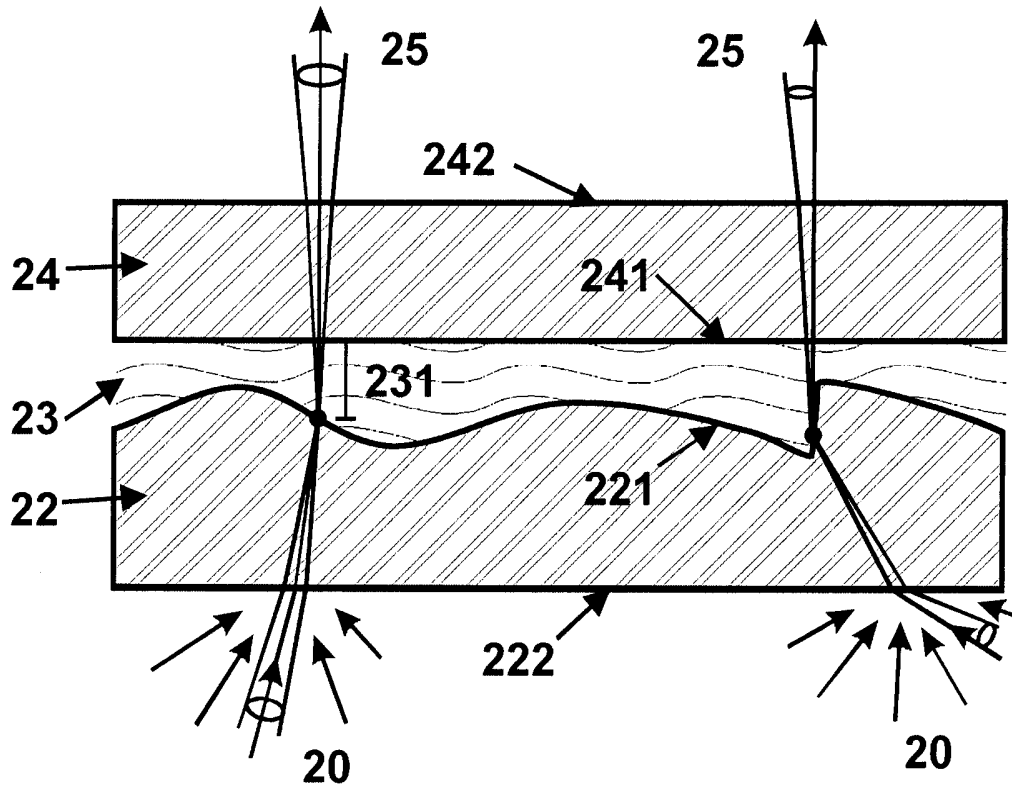


FIGURA 2

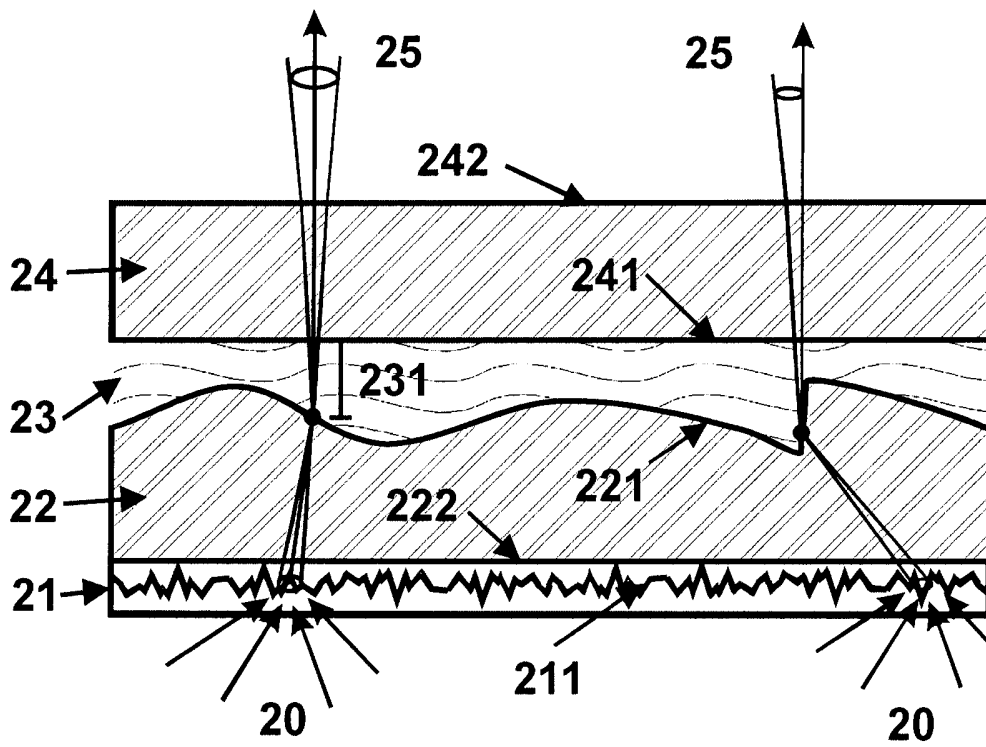


FIGURA 3

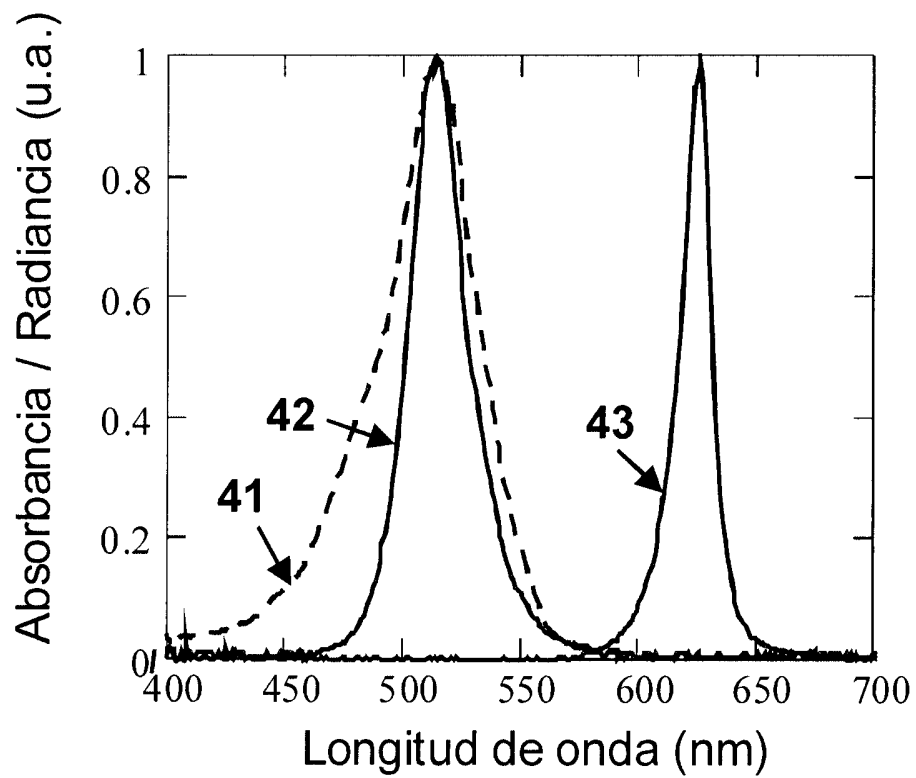


FIGURA 4

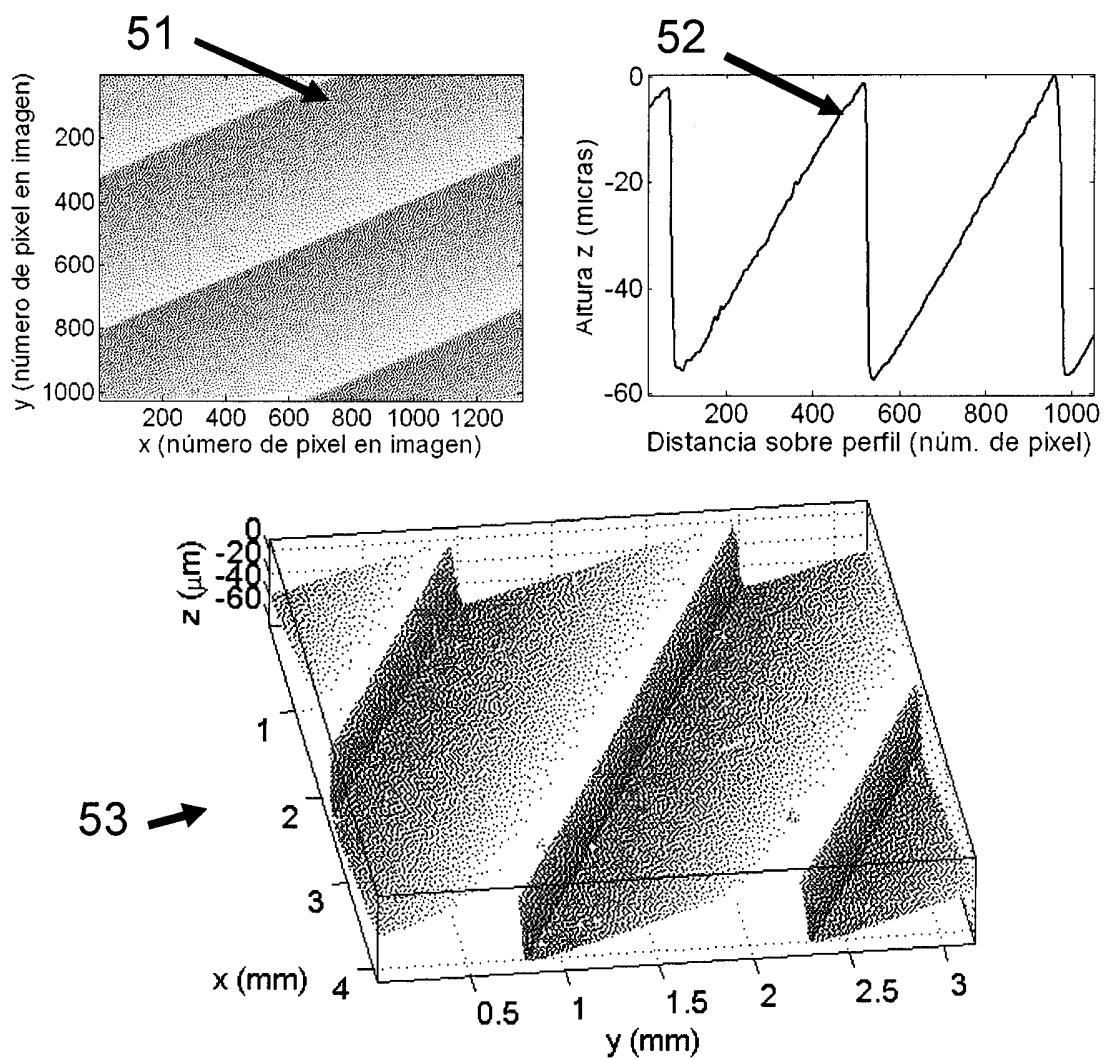


FIGURA 5

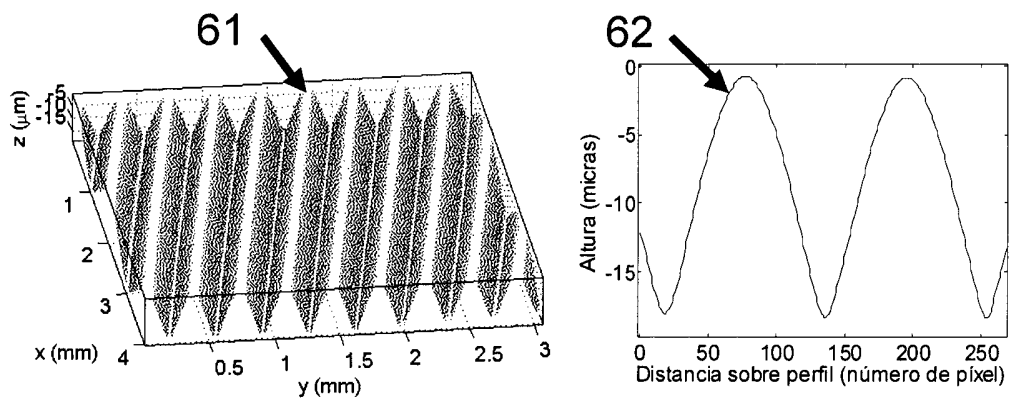


FIGURA 6