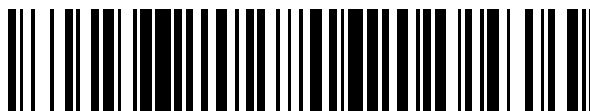


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 611 172**

51 Int. Cl.:

G01P 5/00 (2006.01)

G01P 5/26 (2006.01)

G03H 1/00 (2006.01)

G06T 3/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **23.10.2013** **PCT/EP2013/072186**

87 Fecha y número de publicación internacional: **01.05.2014** **WO14064159**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **23.10.2013** **E 13779888 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **07.09.2016** **EP 2912475**

54 Título: **Procedimiento de detección de condiciones de turbulencia utilizando la interacción de un haz láser con una película delgada fotocrómica y dispositivo que implementa dicho procedimiento**

30 Prioridad:

24.10.2012 FR 1260113

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

05.05.2017

73 Titular/es:

**CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE (33.3%)**

3, rue Michel-Ange

75016 Paris, FR;

UNIVERSITÉ D'ANGERS (33.3%) y

**WROCLAW UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
(33.3%)**

72 Inventor/es:

BARILLE, RÉGIS

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 611 172 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 detección de condiciones de turbulencia utilizando la interacción de un haz láser con una película delgada fotocromica y dispositivo que implementa dicho procedimiento

5 El campo de la invención es el de unos procedimientos que permiten detectar las turbulencias de un medio, aprovechando las perturbaciones generadas en la propagación de un haz láser y el de unos dispositivos compactos que implementan un procedimiento de ese tipo.

Este tipo de procedimiento puede aprovecharse también para medir unas tasas de turbulencia (más o menos fuerte en un entorno dado) así como para medir los efectos de la turbulencia en la propagación de un haz láser.

10 En efecto, el análisis de la turbulencia puede encontrar numerosas aplicaciones, a través de unos medios compactos y discretos principalmente en el campo del medio ambiente, de detección de elevaciones de temperatura, de movimientos de aire en una ciudad por ejemplo.

15 Puede ser muy interesante igualmente medir las modificaciones engendradas en la propagación de un haz láser debido a las turbulencias ambientales. La propagación del haz láser a través de un medio turbulento es particularmente de una gran importancia en unas aplicaciones tales como las comunicaciones ópticas en espacio libre (mar, campo de batalla,...), la detección de objetivos, la captura de imágenes y la detección a larga distancia. En muchas de estas aplicaciones, se utilizan los láseres con sus propiedades de coherencia del campo electromagnético.

20 Los campos coherentes que se propagan en los medios aleatorios tales como la turbulencia atmosférica, están sometidos a unas distorsiones y titilaciones espaciales y temporales aleatorias de las intensidades ópticas que pueden implicar una degradación considerable en el rendimiento del sistema. Estas titilaciones debidas a unos cambios rápidos y continuos de temperaturas y de presión en la proximidad a la superficie del suelo son más graves y más pronunciados e inducen unas distorsiones de la estructura de fase del campo de ondas por la turbulencia que arrastra a la onda a interferir consigo misma.

25 Estos cambios en los datos y parámetros del haz aportan unas limitaciones fundamentales en el desarrollo de los sistemas ópticos de comunicación en el espacio libre. Uno de los efectos significativos de la turbulencia atmosférica es la fluctuación de la dirección de propagación del frente de onda referenciado como la fluctuación del ángulo de llegada o la inclinación del frente de onda. Este ángulo se mide por diferentes procedimientos.

30 Uno de los procedimientos consiste en hacer simultáneamente unas medidas diferenciales de los ángulos de llegada y de las fluctuaciones de intensidad del haz láser a partir de una referencia utilizando una cámara CCD puesto que las medidas de fluctuaciones espaciales son muy sensibles a la longitud de onda del trayecto recorrido por el haz láser (A. Consortini et ál., Optics Communications, 216, 19-23, (2003)). Esta fluctuación depende únicamente de la longitud de la trayectoria óptica recorrida.

35 Otros procedimientos consisten en utilizar una estructuración del haz láser o bien con unas franjas de interferencia y analizando su visibilidad en el caso de un tipo de anemómetro láser Doppler (H. J. Pjeider et ál., J. Opt. Soc. Am., Vol. 70(2), 167-170, (1980)) o bien utilizando el desplazamiento de las franjas de Moiré (S. Rasouli et ál., Opt. Lett., 31 (22), 3276-3278, (2006)) resultante de la superposición, con el mismo paso, de una imagen de franjas de referencia y una imagen de franjas resultante de la turbulencia. Las estructuras de Moiré dan las fluctuaciones del ángulo de llegada.

40 En los dos casos los procedimientos son difíciles de implementar puesto que es necesario crear unas interferencias para la anemometría Doppler o bien instalar dos redes de amplitud y asegurarse de su estabilidad inicial para la técnica Moiré. La inclinación del frente de onda se analiza utilizando unas técnicas polinomiales a partir de un procedimiento de análisis de tipo Shark-Hartmann (A. V. Sergryev et ál., Appl. Opt., 50(20), 3519-3528, (2011)) y necesita un sistema complejo y costoso de análisis del frente de onda del láser. Las fluctuaciones del ángulo de llegada o la inclinación del frente de onda se utilizan para medir los parámetros característicos de la turbulencia atmosférica. El parámetro de estructura del índice de refracción o C_n^2 es una medida de la fuerza de la turbulencia óptica a lo largo de la trayectoria de propagación del haz láser. En la propagación láser en espacio libre la medida de las fluctuaciones del ángulo de llegada es una etapa de base en el estudio de la turbulencia atmosférica.

50 En este contexto, la presente solicitud tiene por objeto un procedimiento fácil de implementar, que abre la vía a unos dispositivos de evaluación de la turbulencia de un medio, pudiendo vincularse particularmente a unos fenómenos de calentamiento del aire ambiente, fáciles de implementar y que pueden desplegarse masivamente.

Más precisamente, la presente invención tiene por objeto un procedimiento de evaluación de parámetros de turbulencia del medio caracterizado por que comprende las siguientes etapas:

55 - la iluminación por un haz láser que se propaga en dicho medio, de una película de material orgánico fotocromico que puede comprender unas moléculas de azobenceno, o de espiropirano, o de estilbeno, o de cumarina, o de fulgida, creando dicha iluminación una red superficial en dicha película que incluye unas estrías cuyas

- deformaciones son función de los parámetros de turbulencia;
- una etapa de adquisición de imágenes que incluye unas zonas elementales de estructuraciones vinculadas a dichas estrías, más o menos reducidas y representativas de los parámetros de turbulencia de dicho medio;
- una etapa de tratamiento de dichas imágenes que permite evaluar los parámetros de turbulencia de dicho medio.

5 Según una variante de la invención, el procedimiento comprende una etapa de adquisición de imágenes de difracción del haz láser por la red de superficie creada, presentando dichas imágenes unos puntos de difracción cuyas características son dependientes de los parámetros de turbulencia.

Según una variante de la invención, la etapa de tratamiento de dichas imágenes comprende:

- 10 - una operación de transformada de Radon de dichas imágenes de manera que se generen unas imágenes derivadas por cálculo de las imágenes en una referencia en rotación que generan a partir de las zonas de difracción que pertenecen a dichas imágenes, un conjunto de picos que pertenecen a las imágenes derivadas,
- una comparación de dicho conjunto de picos con un conjunto de picos de referencia de condiciones de turbulencia, de manera que se estime el nivel de turbulencia de dicho medio.

Según una variante de la invención, el procedimiento comprende:

- 15 - una etapa de adquisición de imágenes realizada por microscopía AFM;
- una etapa de tratamiento de dichas imágenes que permite reconocer, cuantificar y analizar las zonas elementales formadas en la superficie dependientes de unos parámetros de turbulencia y que permiten obtener unas imágenes derivadas;
- 20 - una etapa de análisis de dichas imágenes derivadas por análisis fractal o multifractal, sobre el conjunto de dichas zonas elementales permitiendo definir unas propiedades de invarianza de escala y determinar las informaciones de turbulencia de dicho medio.

Según una variante de la invención, la etapa de tratamiento de dichas imágenes comprende las siguientes operaciones:

- 25 - la utilización de un filtro gaussiano, que promedia cada uno de los puntos de adquisición con unos puntos vecinos y que genera las imágenes filtradas;
- la construcción de un conjunto de imágenes producidas por tratamiento de dichas imágenes filtradas, pudiendo ser ejecutado por la transformación de dichas imágenes filtradas en imágenes filtradas binarias, posteriormente el marcado de las zonas exentas de estrías, de manera que se incremente el contraste entre dichas zonas elementales.

30 Según una variante de la invención, la etapa de análisis fractal o multifractal comprende las siguientes etapas:

- la división de dicha imagen según dos dimensiones x e y, en segmentos N/s, que definen una partición en cajas, siendo N una dimensión de la imagen y el cálculo de dos sumas acumulativas X(i) e Y(i) que definen una señal, tales que:

$$X(i) = \sum_{k=1}^i x_k - \langle x \rangle \quad \text{e} \quad Y(i) = \sum_{k=1}^i y_k - \langle y \rangle$$

- 35 correspondiendo $\langle x \rangle$ e $\langle y \rangle$ a las medias de la señal en x e y;
- la estimación en cada una de las cajas, de una superficie definida por dos funciones polinomiales ($p_v(i)$, $q_v(i)$) según las dos dimensiones x e y, que permiten aproximar dicha señal y que permiten definir:

- 40
 - o una tendencia en cada una de las cajas y
 - o las variaciones con relación a dicha tendencia de manera que se definen los parámetros $X_s(i) = X(i) - p_v(i)$ e $Y_s(i) = Y(i) - q_v(i)$

- el cálculo de una función de fluctuación desprovista de dichas tendencias definida por la ecuación

$$F_q(s) = \sqrt[q]{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_s} (|X_s(i)| |Y_s(i)|)^q}$$

siendo q entero no nulo y en la que:

$$\sum_{i=1}^{N_s} (|X_s(i)| |Y_s(i)|)^q \approx s^{r(q)}$$

45 permitiendo definir:

- o una ley de potencia entre la función $F_q(s)$ y el tamaño (s) de las cajas y
- o el exponente de escala multifractal $r(q)$ y $\tau(q) = qh(q) - 1$;

- la determinación de una función de singularidad $\alpha(q) = d\tau(q) / dq$ y de un espectro multifractal: $f(\alpha) = q(\alpha) \cdot \alpha - s[q(\alpha)]$ que presenta un valor máximo $f(\alpha)_{\max}$;
- la comparación del valor $f(\alpha)_{\max}$ con una tabla de calibración que referencia unos valores $f(\alpha)_{\max}$ St con unos índices de refracción Cn y que permite vincular el índice de refracción Cn con un parámetro de turbulencia de referencia.

La invención tiene también por objeto un dispositivo de evaluación de los parámetros de turbulencia de un medio, caracterizado por que comprende:

- una unidad de medición que incluye:
 - o una película de material orgánico fotocrómico que puede comprender unas moléculas de azobenceno, o de espiropirano, o de estilbeno, o de cumarina, o de fulgida;
 - o una fuente láser que emite un haz láser que se propaga en el dicho medio y que interactúa con dicha película de manera que crea una red de superficie que incluye unas estrías cuyas deformaciones son función de los parámetros de turbulencia;
 - o un detector que permite la adquisición de imágenes que incluyen unas zonas elementales de estructuraciones vinculadas a dichas estrías, más o menos reducidas y representativas de los parámetros de turbulencia de dicho medio y que generan unas señales relativas a dichas imágenes;
- un dispositivo de recepción y de tratamiento de dichas señales que proporciona unas informaciones de evaluación de los parámetros de turbulencia de dicho medio.

Según una variante de la invención, el dispositivo de evaluación de los parámetros de turbulencia de un medio comprende un conjunto de unidades de medición, estando en relación dichas unidades de medida con dicho dispositivo de recepción y de tratamiento.

La invención tiene también por objeto la utilización del dispositivo de evaluación de los parámetros de turbulencia del medio ambiente según una de la invención, para realizar unas mediciones de movimientos de aire, por ejemplo en medio urbano.

La invención se comprenderá mejor y surgirán otras ventajas con la lectura de la descripción que sigue a continuación dada a título no limitativo y gracias a las figuras adjuntas entre las que:

- la figura 1 ilustra un ejemplo de dispositivo que permite validar el concepto de la presente invención;
- las figuras 2a y 2b ilustran unas redes inscritas en una película de material fotocrómico y las diferentes imágenes correspondientes de difracción tomadas con una cámara CCD;
- la figura 3 ilustra el principio de la transformada de Radon de una imagen de una red de difracción inscrita en una película de material fotocrómico;
- las figuras 4a y 4b ilustran las imágenes resultantes de la transformada de Radon de dos ejemplos de imágenes ilustradas en la figura 2a;
- las figuras 5a y 5b ilustran los picos de intensidad resultado del tratamiento de las imágenes ilustradas en las figuras 4a y 4b y representativos del grado de turbulencia del medio analizado;
- las figuras 6a, 6b y 6c ilustran respectivamente unas imágenes tomadas por microscopía AFM de una red superficial inscrita en una película de material fotocrómico, las mismas imágenes filtradas que presentan unas zonas definidas mediante unos contornos, posteriormente las mismas imágenes que incluyen estas zonas, después del marcado de los interiores de dichas zonas;
- la figura 7 ilustra la evolución del exponente de multifractalidad en función del parámetro q para diferentes condiciones de turbulencia;
- la figura 8 ilustra el espectro de multifractalidad $f(\alpha)_{\max}$ llamado espectro de singularidades para diferentes condiciones de turbulencia;
- la figura 9 ilustra la evolución de las posiciones maximales $f(\alpha)_{\max}$ en función del índice de refracción Cn;
- la figura 10 ilustra la evolución de la función de lagunaridad para diferentes condiciones de turbulencia;
- la figura 11 ilustra un primer ejemplo de dispositivo que utiliza el procedimiento de la invención;
- la figura 12 ilustra un segundo ejemplo de dispositivo que utiliza el procedimiento de la invención.

La invención se va a describir en el marco de una película de azobenceno, pero puede utilizar también otros tipos de materiales orgánicos fotocrómicos. El efecto utilizado en la presente invención, corresponde a un registro holográfico en el que las franjas se construyen a sí mismas durante el proceso de auto-organización molecular e imprimen una media estadística a largo plazo del efecto del medio turbulento sobre la propagación láser. Los materiales holográficos orgánicos tienen la ventaja con relación a sus equivalentes inorgánicos de ser estructuralmente polivalentes, fácilmente aplicables y poco costosos.

Este tipo de material fotocrómico, tal como un material azopolimérico, es capaz de auto-organizarse en la superficie bajo el efecto de la luz de un láser para producir una estructuración bajo la forma de una red de difracción, que permite medir simultáneamente varias características de dicha turbulencia.

Las moléculas de azobenceno se estudian desde hace más de medio siglo por sus particulares propiedades ópticas e, incluso hoy en día, se descubren unos fenómenos novedosos vinculados a su fotoisomerización. Entre estos fenómenos, la deformación de la materia foto-inducida de los materiales fotocrómicos que contienen estas moléculas es sin duda uno de los más notables. Unos ciclos sucesivos de isomerización de la molécula, pueden dar como resultado un desplazamiento de materia, en unas distancias de varios centenares de nanómetros. Las moléculas de la familia de los azobencenos se caracterizan por dos ciclos bencénicos enlazados mediante un doble enlace entre dos átomos de nitrógeno. Pueden existir en dos formas isómeras: la forma *trans* (o *E*) y la forma *cis* (o *Z*). La transición de la forma *trans* hacia la forma *cis* se excita por absorción de un fotón y la transición inversa de la forma *cis* hacia la forma *trans* puede ser o bien excitada ópticamente o bien activada térmicamente.

Se ha demostrado por otro lado que las moléculas de nitrógeno del material se fotoisomerizan al repetir unas isomerizaciones *trans-cis-trans* inducidas por la absorción de la luz, de la orientación molecular consecutiva que se realiza perpendicularmente a la dirección de la polarización de la luz.

Este efecto puede observarse sobre una película delgada de polímero que contenga unos azobencenos capaces de fabricar una red topográfica sobre la superficie de la película tras la exposición por una estructura de interferencias creada por dos haces láser.

Sin embargo el presente Solicitante parte del principio de que esta estructuración en la superficie puede realizarse también con un único haz láser mediante auto-organización de las moléculas de nitrógeno en donde la dirección del vector de onda de la red depende de la polarización del haz láser.

Las redes de superficie pueden borrarse a continuación mediante la utilización de un haz láser con una polarización circular o mediante tratamiento térmico.

El presente Solicitante ha validado el concepto de la presente invención realizando unas condiciones de turbulencias en el medio ambiente y registrando las imágenes de la red de superficie creada por un haz láser después de la propagación de dicho haz en el medio ambiente perturbado por las turbulencias creadas, y con el fin de poner en evidencia la correlación entre las turbulencias y las modificaciones de estructuraciones realizadas en la superficie de la película de material orgánico fotocrómico.

Se evaluaron inicialmente los parámetros del medio turbulento necesarios en la evaluación de la presente invención. La turbulencia producida es representativa de una turbulencia atmosférica en condiciones reales. El montaje experimental ilustrado en la figura 1, consiste en un haz láser de un láser 1, (de estado sólido bombeado por diodos) a $\lambda = 473$ nm con una potencia de 5 mW que se propaga a través de un medio turbulento de longitud $L = 1$ m producido por al menos una placa calefactora eléctrica (se representan en la figura 1 dos placas P_1 y P_2) a la temperatura de 98 °C y que generan un flujo de aire caliente a la temperatura de 42 °C.

El flujo de aire generado presenta unas velocidades v modificadas por una rejilla que tiene unos pasos de anchuras diferentes, estando comprendidas dichas velocidades entre 12,5 m/s y 7,6 m/s.

Las intensidades y los ángulos de llegada del haz F_1 se evaluaron en dos etapas sucesivas.

Se utiliza para ello una cámara CCD 3, para medir la intensidad total de la distribución de luz detectada y las coordenadas x e y del centro del haz, después del paso en transmisión de la película de material fotocrómico 2. La superficie del detector es de 8,4 mm x 6,2 mm. Las imágenes pueden registrarse y tratarse por medio de una unidad 4.

1) Los ángulos de llegada se obtienen midiendo los desplazamientos laterales del haz sobre la cámara por comparación con un haz de referencia sin turbulencia. Los ángulos se cuentan entre un diafragma y una posición del haz sobre la cámara. La distancia entre el diafragma y la cámara es una zona de propagación no turbulenta y es suficiente para una buena resolución de la medición de desplazamiento. Los valores de los ángulos de llegada vienen dados por:

$$\alpha_x = \delta x / d \quad y \quad \alpha_y = \delta y / d$$

El presente Solicitante ha medido el ángulo de llegada para diferentes condiciones de turbulencia. Se sitúa en el límite de aproximación de la óptica geométrica para $L l_o^2 / \lambda$ donde l_o es la escala interior de la turbulencia y λ la longitud de onda del haz láser. El valor eficaz de las fluctuaciones del ángulo de llegada viene dado por:

$$\langle \alpha_x^2 \rangle = \langle \alpha_y^2 \rangle = 3,28 C_n^2 L l_o^{-\frac{1}{3}}$$

en la que C_n es la constante del índice de refracción del medio (L. C. Andrews, 'Field guide to Atmospheric Optics', SPIE press book, (2004)).

2) Las fluctuaciones de intensidad del haz se miden en el transcurso del tiempo con un fotodiodo y se definen mediante:

$$\sigma_l^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} = 12,8 C_n^2 L^3 \ell_o^{-\frac{1}{3}} = 1,23 C_n^2 k^{\frac{7}{6}} L^{\frac{11}{6}}$$

en la que L es el trayecto del haz láser. Se puede por tanto calcular la escala interior de la turbulencia mediante:

$$\ell_o = 1,97 \sqrt{\frac{\langle \alpha_x^2 \rangle}{\sigma_l^2}}$$

- 5 Las muestras de las películas de polímero se realizan a partir de una síntesis de un nuevo monómero cromofórico derivado del azobenceno que contiene unos compuestos de sulfonamida heterocíclica. El monómero de tipo metacrilato contiene unos separadores alifáticos de diferentes longitudes entre los grupos metacíclicos y cromofóricos. Los monómeros en cuestión se polimerizan para obtener unos homopolímeros y copolímeros con 2-metilacrilato y 2-etilhexilo acrilato para obtener unos copolímeros que contienen varios porcentajes de unidades cromofóricas.
- 10 Las películas delgadas se preparan por depósito en placa giratoria partir de una solución diluida con THF y una concentración de 50 mg/ml. El grosor de la película medida con un perfilador dektak-6M es de 1 µm.
- La absorbancia máxima a $\lambda = 488$ nm es de 1,9. La absorbancia a la longitud de onda de experiencia $\lambda = 476$ nm es de 1,6.
- 15 El haz láser se hace inicialmente paralelo mediante un sistema afocal de dos lentillas (Kepler). El diámetro del haz es de 5,1 mm. Un diafragma permite elegir la zona central del frente de onda y generar una onda cuasi plana de 3,1 mm de diámetro. El diámetro del diafragma se elige para seleccionar una zona del haz láser como el mejor compromiso entre una zona del frente de onda plana y una señal de intensidad que permite un valor razonable de la relación señal a ruido.
- 20 El haz láser pasa en el medio turbulento a una distancia de 1 m y se envía sobre la película delgada de azopolímero 2, de la presente invención con una potencia entre 100 y 300 mW/cm².
- Un sistema óptico permite recoger la intensidad del orden de difracción y controlar el tiempo el desarrollo de la inscripción holográfica. Cuando la intensidad de difracción llega a la saturación, el haz láser se corta y la superficie de la película delgada sobre la que se inscribe el proceso es caracterizada mediante tratamiento de imágenes, pudiendo emplearse varios tipos de tratamiento de imágenes.
- 25 Las experiencias han sido llevadas por cuatro ejemplos de condiciones de turbulencia creciente T1, T2, T3 y T4, que generan unas topografías de superficie diferentes, pero en las que la superficie se auto-organiza bajo el efecto del láser para crear una red de difracción.

Primer modo de análisis mediante análisis semi-fino:

- 30 Se observa con una cámara de tipo CCD, la difracción de la estructura auto-organizada creada en la superficie y obtenida por el haz en sí mismo. Permite seguir en el curso del tiempo la construcción de la estructura en la superficie. Para un haz que se propaga sin turbulencia la red forma una alineación regular de las estrías en la superficie con un paso de red $A = 2\lambda / \sin \theta$ en la que $\theta = 90^\circ$ para una incidencia del haz de 90° .
- Las figuras 2a y 2b se refieren respectivamente a las redes inscritas en la película de material fotocromico y a las imágenes de difracción tomadas por la cámara CCD y que incluyen unos puntos dados por el orden de difracción, para las cuatro condiciones de turbulencia T1, T2, T3 y T4.
- 35 La separación de los puntos da la frecuencia espacial de la red auto-organizada presente en la superficie de la muestra. La evolución de esta figura de difracción sigue una ley de potencia en el tiempo hasta una saturación del fenómeno y depende de la potencia del haz láser. El cambio de las condiciones de propagación del haz láser induce unas frecuencias espaciales adicionales que perturban la regularidad del paso del haz. Estas frecuencias adicionales se observan por la aparición de intensidades fuera de los dos puntos. La información espacial sobre la dirección de los vectores de onda de las frecuencias espaciales adicionales viene dada por sus coordenadas X e Y con relación a los dos puntos y por la superficie de las intensidades. Una superficie grande caracteriza una difusión grande de las frecuencias espaciales y por tanto una turbulencia mayor.
- 40 Con la modificación del medio de propagación se crean unas frecuencias adicionales en el centro y separadas de los dos puntos que corresponden a la red auto-organizada de referencia. Estas frecuencias espaciales son más bajas implicando una variación de la superficie en la distancia y correspondiendo a la creación de grandes estructuras. La aparición de frecuencias en el perfil de las intensidades de difracción fuera de los dos puntos implica la creación de subredes a frecuencias mayores que la red principal.
- 45 La figura 2a muestra particularmente que la turbulencia crea unas sub-estructuras con unos pasos de sub-redes A_s de 400 ± 30 nm.
- 50

Supervisando la difracción creada, se puede seguir la evolución de las sub-redes creadas así como unas zonas no uniformes que aparecen.

La variación de polarización inducida por la turbulencia se mide por la dirección horizontal de los dos puntos de difracción. El haz láser tiene una polarización lineal y horizontal representada por los dos puntos de difracción en un plano horizontal.

Por ejemplo, la componente lineal de polarización cambia en un ángulo $\theta = 7,1^\circ$ para el ejemplo de la turbulencia T4.

Ventajosamente, las imágenes de difracción pueden analizarse mediante la transformada de Radon, implicando numéricamente el cálculo efectivo de la transformada de Radon unas interpolaciones de la imagen a tratar, con el fin de estimarla en una referencia en rotación, como se ha ilustrado en la figura 3.

Para ello, se calcula la proyección de la imagen a lo largo de ángulos dados. El resultado es la suma de las intensidades de los píxeles en cada dirección, es decir la integral de cada una de las líneas. Se obtiene una nueva imagen $R(\rho, \theta)$ y se realiza un corte para $t = 0^\circ$. Se obtienen por ejemplo las imágenes derivadas de las figuras 4a y 4b correspondientes a una turbulencia media y una gran turbulencia.

Las representaciones de la intensidad en función del ángulo θ tales como las ilustradas en las figuras 5a y 5b muestran la presencia de un pico central que representa la proyección de los 2 puntos dados por la difracción del haz en la red sin turbulencia. Los picos fuera del pico central representan las contribuciones de las frecuencias espaciales adicionales aportadas por el movimiento del haz láser perturbado por la turbulencia. Comparando los picos que se forman de un lado y otro del pico central se puede conocer cualitativamente de modo instantáneo con la cámara el grado de turbulencia inducido durante la trayectoria del haz láser.

2) Segundo modo de análisis fino por tratamiento de imágenes AFM:

2.1: Etapa de tratamiento de imágenes:

Se caracteriza la red inscrita por microscopía de fuerza atómica en modo contacto. La figura 6a da la topografía de la superficie de la película tras la inscripción por el láser para los cuatro ejemplos de condiciones de turbulencia T1, T2, T3 y T4. La superficie se auto-organiza bajo el efecto del láser para crear una red de difracción.

Para una condición de turbulencia reducida, la superficie presenta una red auto-organizada cuyo paso de red $A = 800 \pm 30$ nm se perturba por las fluctuaciones aleatorias del ángulo de llegada del haz. El paso de la red dado por la teoría de la difracción del segundo orden corresponde a la condición de ángulo del haz incidente $A = 2\lambda / \sin \theta$.

Se remarca que ciertas zonas de la estructura en la superficie tienen una estructuración reducida. Se considera las topografías obtenidas para diferentes condiciones de turbulencia como unas superficies gaussianas aleatorias.

Las estructuraciones observadas se tratan inicialmente mediante un algoritmo de la presente invención para reconocer, cuantificar y analizar las subzonas en la superficie modificadas por la turbulencia.

Se aplican a continuación unas técnicas de análisis fractales y multifractales para encontrar las propiedades de invarianza de escalas en el conjunto de las subzonas perturbadas aplicables a la medición del efecto de turbulencia en un haz láser.

Estas técnicas permiten tener una descripción precisa de la complejidad de las sub-zonas desorganizadas.

Más precisamente, la imagen se integra en primer lugar. Se utiliza para ello un filtro paso bajo gaussiano que tiene por objetivo atenuar las altas frecuencias espaciales. El filtro promedia cada uno de los puntos con sus vecinos. Tiene como efecto suprimir las altas frecuencias e incrementar la señal de baja frecuencia. En el caso presente, el filtro permite reducir el contraste de las zonas en donde hay ausencia de red y permite marcar las zonas en donde la red ha desaparecido a causa de la perturbación sobre el láser que crea la red por la turbulencia.

Esta operación vuelve a diseñar los contornos de estas superficies gaussianas limitando la altura de la topografía con una separación fija Δ entre la altura de los contornos sucesivos para obtener que las subzonas no contienen reestructuraciones periódicas, como se ha ilustrado en la figura 6b. El umbral se determina por el valor empírico

$I_{med} / \sqrt{6}$ en la que I_{med} es el valor medio de la rugosidad de la superficie. Los diseños de los contornos consisten en líneas que no intersectan cerradas en el plano que conectan los puntos de iguales alturas. De esta manera, para cada configuración de las superficies aleatorias dadas por los diferentes medios turbulentos, se asigna una configuración de un conjunto de contornos.

Estos contornos se rellenan a continuación, como se ha ilustrado en la figura 6c.

2.2: Etapa de cálculo en las imágenes:

A partir de la imagen que incluye unas zonas definidas por unos contornos (tales como los ilustrados en la figura 6c), que contienen unas manchas más o menos grandes según la turbulencia, se tratan estas imágenes mediante

análisis multifractal. Se busca poner en evidencia los procesos de auto-similitudes en las imágenes tratadas para tener las zonas en las que la red de superficie obtenida por auto-organización molecular ha desaparecido.

2.2.1: Primera etapa:

5 La imagen se divide en cajas de iguales longitudes s . En cada una de estas cajas de longitud s , se utiliza una línea de mínimos cuadrados para ajustar la caja a los datos (que representa la tendencia en la caja).

Se calculan las coordenadas x e y de los segmentos de líneas.

Las tendencias de las fluctuaciones se suprimen de la imagen restando la tendencia local.

Se calcula entonces el valor eficaz de las fluctuaciones de la imagen. El cálculo se repite para todas las longitudes de cajas para caracterizar las fluctuaciones locales en función del tamaño de las cajas.

10 Más precisamente, la primera etapa consiste en dividir los perfiles en x e y de la imagen en $N_s = [N/s]$ segmentos disjuntos respectivamente y calcular la suma acumulativa $X(i)$ e $Y(i)$ tal que:

$$X(i) = \sum_{k=1}^i x_k - \langle x \rangle \quad \text{e} \quad Y(i) = \sum_{k=1}^i y_k - \langle y \rangle$$

en cada segmento de dimensiones s , se aproximan ("fit") las series de la señal integrada utilizando una función polinomial $p_v(i)$ para $\{x_i\}$ y $q_v(i)$ para $\{y_i\}$.

15 2.2.2: Segunda etapa:

Se calcula la función de fluctuación desprovista de las tendencias restando la tendencia local en cada caja y se calcula la fluctuación del momento de la raíz q -ésima.

$$F_q(s) = \sqrt[q]{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_s} (|X_s(i)| |Y_s(i)|)^q}$$

en la que:

$$20 \quad \sum_{i=1}^{N_s} (|X_s(i)| |Y_s(i)|)^q \approx s^{\tau(q)}$$

siendo $X_s(i) = X(i) - p_v(i)$, $Y_s(i) = Y(i) - q_v(i)$ y q entero no nulo.

2.2.3: Tercera etapa:

25 Una relación de ley de potencia entre la función $F_q(s)$ y el tamaño de la caja s indica la presencia de escala. Se obtienen de esta manera las exponentes de Hurst generalizadas: $\tau(q)$. Están ligadas a los diferentes niveles de amplificación de las pequeñas fluctuaciones en los datos.

La dependencia de $\tau(q)$ es una función monótona decreciente de q para una señal estacionaria y refleja de manera simple el hecho de que las fluctuaciones reducidas subsisten más frecuentemente en la señal que las más fuertes.

$$\text{con } \tau(q) = qh(q) - 1$$

30 La figura 7 ilustra la evolución del coeficiente $\tau(q)$ en función del número q para las diferentes turbulencias T1, T2, T3 y T4. Las curvas que no son lineales reflejan un comportamiento multifractal.

Para las variaciones positivas de q , $h(q)$ describe el comportamiento de escala de las cajas con las grandes fluctuaciones.

35 Para una turbulencia fuerte la presente invención permite constatar un exponente de escala grande para las grandes fluctuaciones. Por el contrario para los valores de q negativos, $h(q)$ describe el comportamiento de escala de los segmentos con pequeñas fluctuaciones.

Se ve que la turbulencia T1 induce poco comportamiento de escala para las fluctuaciones reducidas. La tendencia se invierte para las otras condiciones de turbulencia.

Se remarca que reduciendo la turbulencia (turbulencia T4), la señal se hace cada vez más monofractal.

2.2.4: Cuarta etapa:

40 Se puede utilizar la función de las singularidades obtenida mediante una transformada de Legendre:

$$\alpha(q) = d\tau(q) / dq$$

Se puede utilizar también un espectro de multifractalidad:

$$f(\alpha) = q(\alpha) \alpha - s(q(\alpha))$$

Este último enfoque da una representación útil de la multifractalidad.

- 5 La anchura de los espectros $f(\alpha)$ mide el nivel de multifractalidad de la señal. Cuanto mayor sea la anchura más multifractal es la señal. La figura 8 ilustra estos espectros para las diferentes turbulencias T1, T2, T3 y T4.

El máximo de la función $f(\alpha)$ en función de α se traza en la figura 8. Se observan dos zonas de evolución lineal del máximo en función de la fuerza de la turbulencia.

El valor de C_n puede evaluarse en función del máximo de $f(\alpha)$.

- 10 La anchura de $f(\alpha)$ a $f = 0,9$, caracteriza el número de singularidades multifractales es decir que la señal tiene múltiples leyes de escalas y está fuertemente perturbada. Las amplitudes son muy diferentes en función de la turbulencia y permiten ver que con una turbulencia elevada la señal contiene más fluctuaciones multifractales.

Esta última medida caracteriza la evolución de las sub-estructuras en la superficie del azopolímero que se convierte en menos regular con el incremento de la turbulencia. El valor de $f(\alpha)$ está ligado a C_n por la relación

- 15 $\text{máxHdff} = -0,8 \cdot C_n + 0,8$ para una turbulencia reducida y
 $\text{máxHdff} = -0,23 \cdot C_n + 0,26$ para una fuerte turbulencia.
 Siendo $f(\alpha)_{\text{máx}} = \text{máxHdff}$.

La figura 9 ilustra así el caso de una reducida turbulencia y el caso de una fuerte turbulencia.

- 20 El procedimiento de la presente invención permite igualmente calcular la lagunaridad que evalúa la homogeneidad del reparto de las intensidades luminosas y por tanto saber cómo rellena el espacio el objeto.

El estudio de la lagunaridad permite medir la distribución de los orificios en la imagen: si esta incluye grandes contrastes (a escala), entonces la lagunaridad de la imagen será elevada. A la inversa, si la imagen es homogénea, entonces la lagunaridad será reducida.

La lagunaridad se mide utilizando un algoritmo de caja deslizante.

- 25 El algoritmo utiliza una caja de tamaño $s \times s$ siendo s su ancho colocada en la esquina superior izquierda de la imagen. Se cuenta el número de píxeles de la señal en la caja.

La caja se desliza en un píxel a la derecha y el número de píxeles en la caja se cuenta de ese modo continuamente. El proceso se repite hasta que la caja alcance la esquina inferior derecha de la imagen.

- 30 Si λ es el tamaño de la imagen el número de cajas de ancho s es $N(s) = (\lambda - s + 1)^2$. El ancho s de la caja se elige de tal manera que el valor numérico es igual a 2, 4, 8, ..., λ .

Para cada caja de ancho s , se miden las dos cantidades siguientes: la suma del número de píxeles de la señal en cada caja $Q_1 = \sum_i p(i, s)$ y la suma cuadrática $Q_2 = \sum_i p(i, s)^2$.

La lagunaridad $L(s)$ para un tamaño de caja se define por:
 $N(s) \cdot Q_2 / Q_1^2$

- 35 $p(i, \lambda)$ es el número de píxeles de la señal en la i -ésima caja e i está comprendido entre 1 y $N(s)$.

La función de lagunaridad se evalúa a partir de las medidas de la figura 10 aproximada ("fitted") con una función hiperbólica:

$$L(s) = b/sa + c, \text{ en la que } b \text{ se refiere a la concavidad de la hipérbola.}$$

- 40 Un valor reducido de b da una hipérbola con una gran concavidad (fuerte concavidad). Un valor reducido de b describe un objeto con una fuerte distribución de intersticios huecos.

La figura 10 muestra el cálculo de las lagunaridades calculadas a partir de las imágenes contrastadas en donde los contornos corresponden al umbral de las imágenes contorneadas (figura 6c). El cálculo muestra los diferentes texturados de las imágenes para diferentes condiciones de turbulencia. Los valores obtenidos en los ejemplos de estructuración mostrados en la figura 6a da para el valor del coeficiente de la parábola b en función de C_n :

b	Cn
2,61	$9,41 \cdot 10^{-13}$
8,62	$1,47 \cdot 10^{-12}$
10,94	$3,77 \cdot 10^{-12}$
19,11	$4,12 \cdot 10^{-12}$

5 La cobertura de la hipérbola se convierte cada vez más fuerte a medida que la turbulencia disminuye implicando un espacio mayor entre las zonas oscuras de las imágenes de la figura 6c. Con la turbulencia, el haz fluctúa espacialmente y pierde su coherencia reduciendo las zonas estructuradas sobre la película de azopolímero. Estas zonas estructuradas representan la integración en el tiempo de todas las fluctuaciones espaciales.

En un primer ejemplo de disposición representado en la figura 11, el procedimiento de la presente invención puede implementarse en una unidad 10 que comprende una fuente láser 20, un soporte 30 recubierto con una película de material fotocrómico 31 y un detector 40 de tipo cámara CCD. Esta unidad se une a un dispositivo de tratamiento 50.

10 Según un segundo ejemplo de la invención, el dispositivo puede comprender un conjunto de unidades 10, 11,..., 1N unidas a un dispositivo 60 de tratamiento central y que permite recoger diferentes informaciones de turbulencias en diferentes lugares a través del centro 60 de tratamiento.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de evaluación de parámetros de turbulencia de un medio que comprende las siguientes etapas:

- la iluminación por un haz láser que se propaga en dicho medio, de una película de material orgánico fotocrómico que puede comprender unas moléculas de azobenceno, o de espiropirano, o de estilbena, o de cumarina, o de fulgida, creando dicha iluminación una red de superficie en dicha película que incluye unas estrías cuyas deformaciones son función de los parámetros de turbulencia;
- una etapa de adquisición de imágenes que incluye unas zonas elementales de estructuración vinculadas a dichas estrías, más o menos reducidas y representativas de los parámetros de turbulencia de dicho medio;
- una etapa de tratamiento de dichas imágenes que permite evaluar los parámetros de turbulencia de dicho medio.

2. Procedimiento de evaluación de parámetros de turbulencia según la reivindicación 1, **caracterizado porque** comprende una etapa de adquisición de imágenes de difracción del haz láser por la red de superficie creada, presentando dichas imágenes unos puntos de difracción cuyas características son dependientes de los parámetros de turbulencia.

3. Procedimiento de evaluación de parámetros de turbulencia según la reivindicación 2, **caracterizado porque** la etapa de tratamiento de dichas imágenes comprende:

- una operación de transformada de Radon de dichas imágenes de manera que se generen unas imágenes derivadas por cálculo de las imágenes en una referencia en rotación que generan a partir de las zonas de difracción que pertenecen a dichas imágenes, un conjunto de picos que pertenecen a las imágenes derivadas,
- una comparación de dicho conjunto de picos con un conjunto de picos de referencia de condiciones de turbulencia, de manera que se estime el nivel de turbulencia de dicho medio.

4. Procedimiento de evaluación de parámetros de turbulencia según la reivindicación 1, **caracterizado porque** comprende:

- una etapa de adquisición de imágenes realizada por microscopía AFM;
- una etapa de tratamiento de dichas imágenes que permite reconocer, cuantificar y analizar las zonas elementales formadas en la superficie dependientes de unos parámetros de turbulencia y que permiten obtener unas imágenes derivadas;
- una etapa de análisis de dichas imágenes derivadas por análisis fractal o multifractal, sobre el conjunto de dichas zonas elementales permitiendo definir unas propiedades de invarianza de escala y determinar las informaciones de turbulencia de dicho medio.

5. Procedimiento de evaluación de parámetros de turbulencia según la reivindicación 4, **caracterizado porque** la etapa de tratamiento de dichas imágenes comprende las siguientes operaciones:

- la utilización de un filtro gaussiano, que promedia cada uno de los puntos de adquisición con unos puntos vecinos y que genera las imágenes filtradas;
- la construcción de un conjunto de imágenes producidas por tratamiento de dichas imágenes filtradas, pudiendo ser ejecutado por la transformación de dichas imágenes filtradas en imágenes filtradas binarias, posteriormente el marcado de las zonas exentas de estrías, de manera que se incremente el contraste entre dichas zonas elementales.

6. Procedimiento de evaluación de parámetros de turbulencia según la reivindicación 5, **caracterizado porque** la etapa de análisis fractal o multifractal comprende las siguientes etapas:

- la división de dicha imagen según dos dimensiones x e y, en segmentos N/s, que definen una partición en cajas, siendo N una dimensión de la imagen y el cálculo de dos sumas acumulativas X(i) e Y(i) que definen una señal, tales que:

$$X(i) = \sum_{k=1}^i x_k - \langle x \rangle \quad \text{e} \quad Y(i) = \sum_{k=1}^i y_k - \langle y \rangle$$

correspondiendo $\langle x \rangle$ e $\langle y \rangle$ a las medias de la señal en x e y;

- la estimación en cada una de las cajas, de una superficie definida por dos funciones polinomiales ($p_v(i)$, $q_v(i)$) según las dos dimensiones, que permiten aproximar dicha señal y que permiten definir una tendencia en cada una de las cajas y las variaciones con relación a dicha tendencia de manera que se definan los parámetros $X_s(i) = X(i) - p_v(i)$ e $Y_s(i) = Y(i) - q_v(i)$;

- el cálculo de una función de fluctuación desprovista de dichas tendencias definida por la ecuación

$$F_q(s) = \sqrt[q]{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_s} (|X_s(i)| |Y_s(i)|)^q}$$

siendo q entero no nulo y en la que:

$$\sum_{i=1}^{N_s} \left(\|X_s(i)\| \|Y_s(i)\| \right)^q \approx s^{\tau(q)}$$

y permitiendo definir una ley de potencia entre la función $F_q(s)$ y el tamaño (s) de las cajas y definir el exponente de escala multifractal $\tau(q)$;

- 5 - la determinación de una función de singularidad $\alpha(q) = d\tau(q)/dq$ y de un espectro multifractal: $f(\alpha) = q(\alpha) \cdot \alpha - s[q(\alpha)]$ que presente un valor máximo $f(\alpha)_{\max}$;
- la comparación del valor $f(\alpha)_{\max}$ con una tabla de calibración que referencia unos valores $f(\alpha)_{\max}$ s_t con unos índices de refracción C_n y que permite vincular el índice de refracción C_n con un parámetro de turbulencia de referencia.

- 10 7. Dispositivo de evaluación de los parámetros de turbulencia de un medio, que comprende:

- una unidad de medición que incluye:

- 15 ○ una película de material orgánico fotocrómico que puede comprender unas moléculas de azobenceno, o de espiropirano, o de estilbeno, o de cumarina, o de fulgida;
- una fuente láser que emite un haz láser que se propaga en dicho medio y que interactúa con dicha película de manera que crea una red de superficie que incluye unas estrías cuyas deformaciones son función de los parámetros de turbulencia;
- un detector que permite la adquisición de imágenes que incluyen unas zonas elementales de estructuraciones vinculadas a dichas estrías, más o menos reducidas y representativas de los parámetros de turbulencia de dicho medio y que generan unas señales relativas a dichas imágenes;

- 20 - un dispositivo de recepción y de tratamiento de dichas señales que suministra unas informaciones de evaluación de los parámetros de turbulencia de dicho medio.

8. Dispositivo de evaluación de los parámetros de turbulencia de un medio según la reivindicación 7, **caracterizado porque** comprende un conjunto de unidades de medición, estando en relación dichas unidades de medida con dicho dispositivo de recepción y de tratamiento.

- 25 9. Uso del dispositivo de evaluación de los parámetros de turbulencia del medio ambiente según una de las reivindicaciones 7 u 8, para realizar unas mediciones de movimientos de aire, por ejemplo en medio urbano.

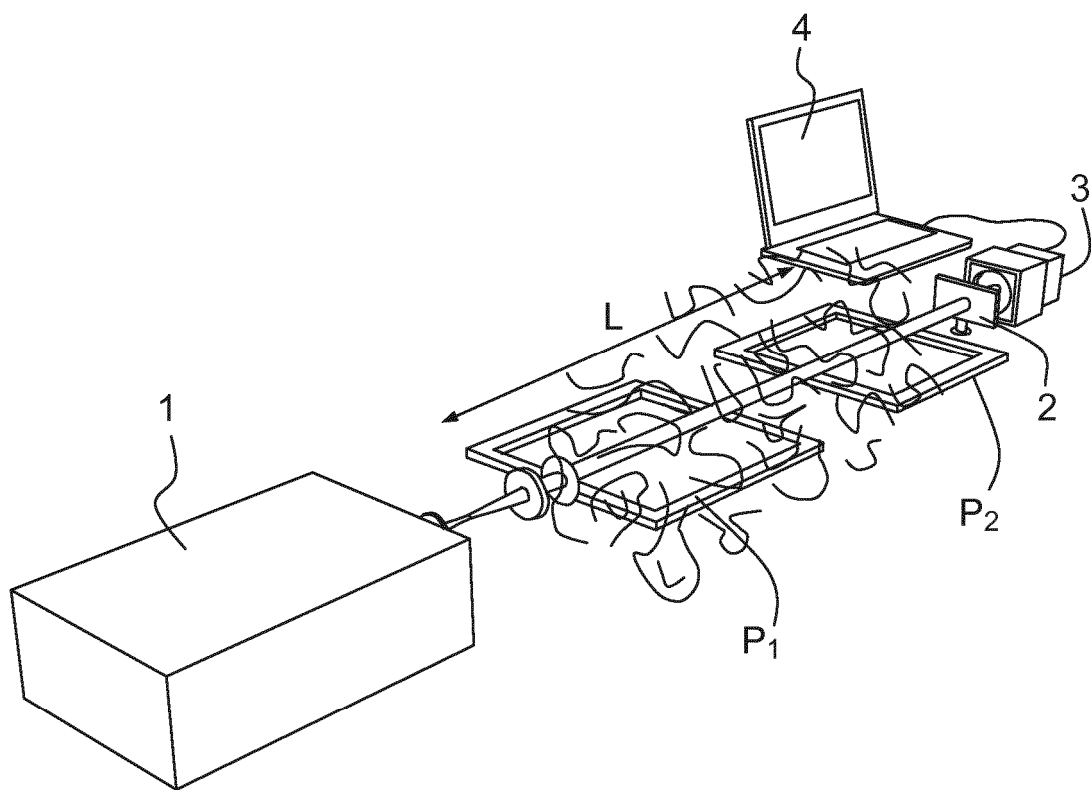


FIG.1

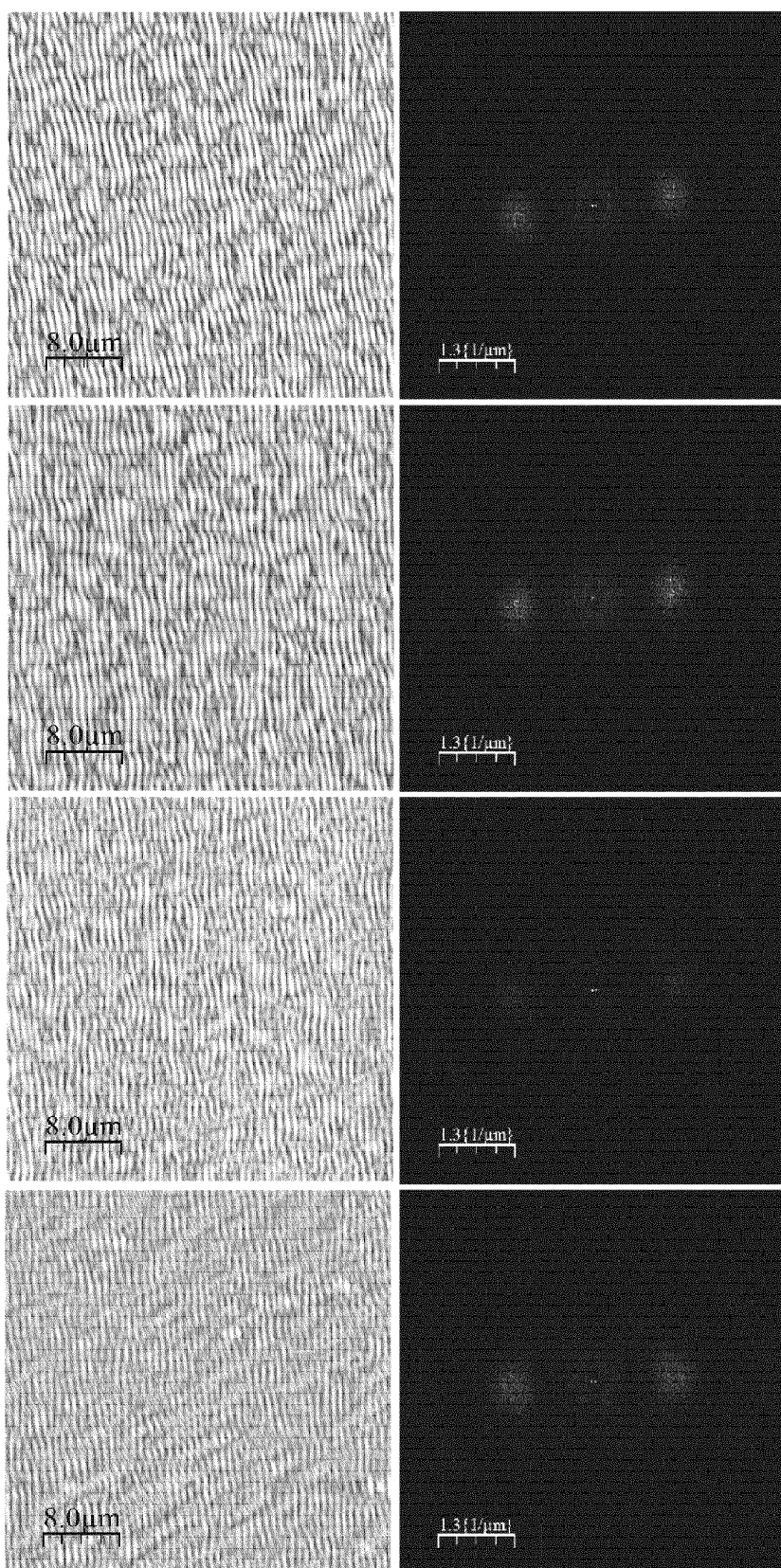


FIG.2a

FIG.2b

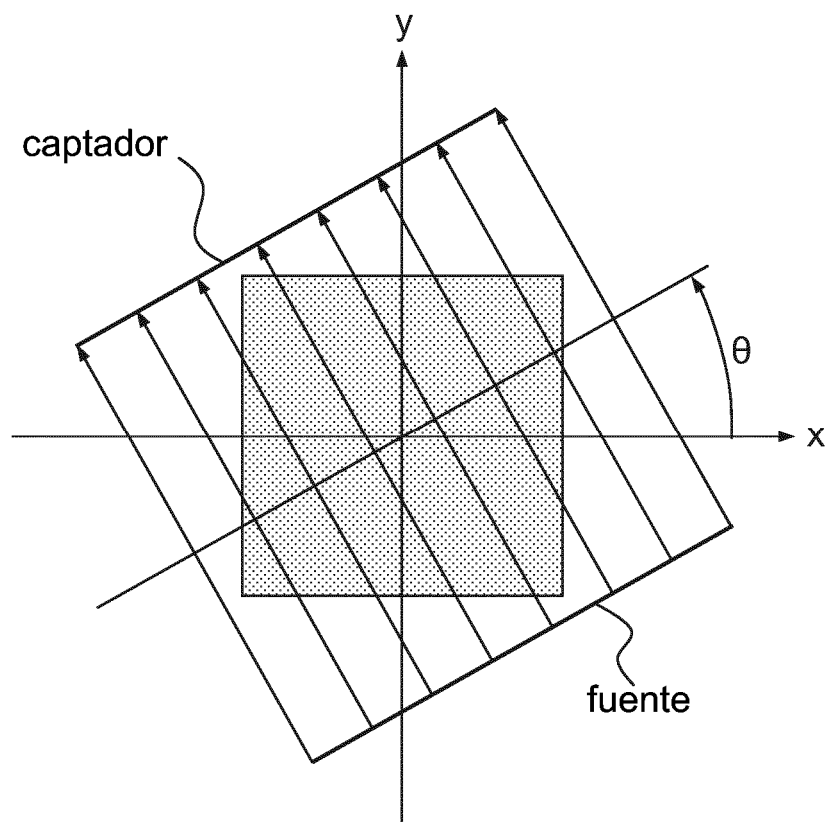


FIG.3

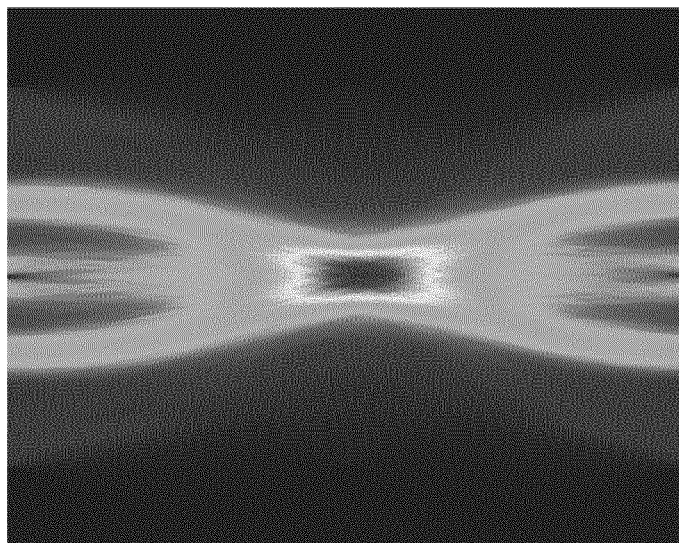


FIG.4a

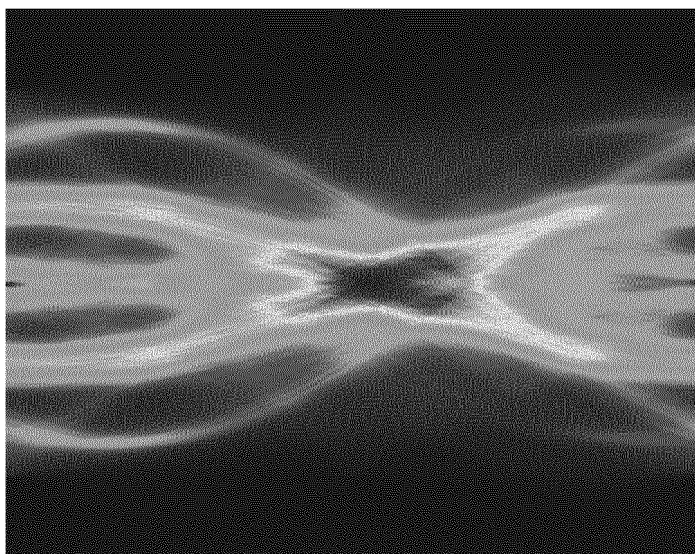


FIG.4b

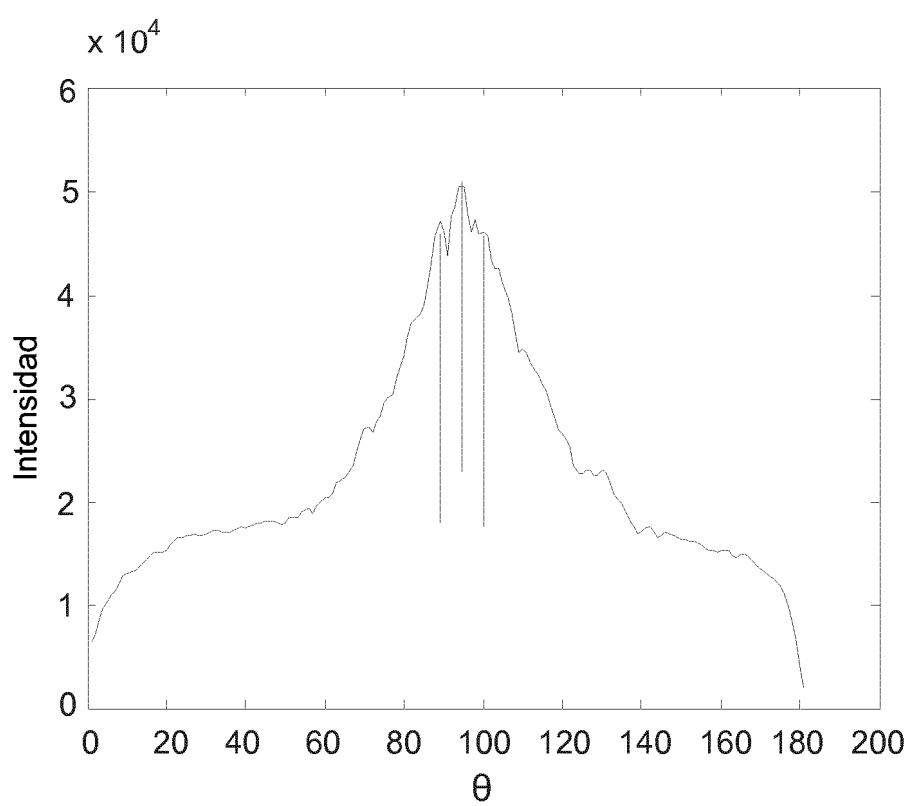


FIG.5a

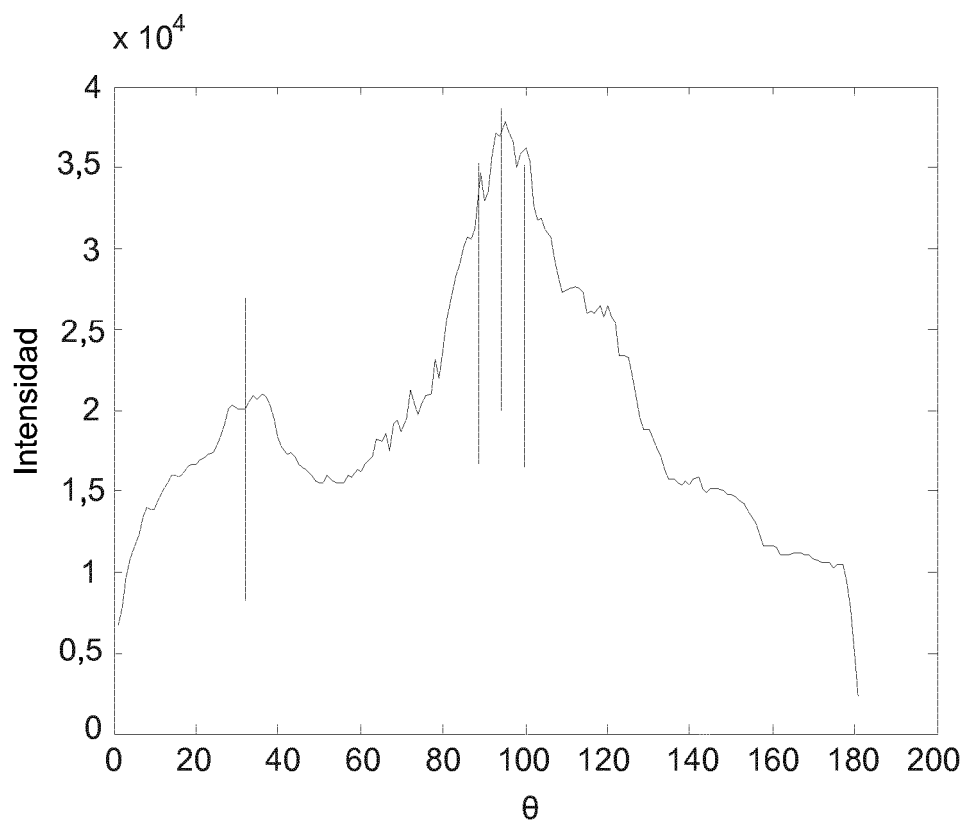


FIG.5b

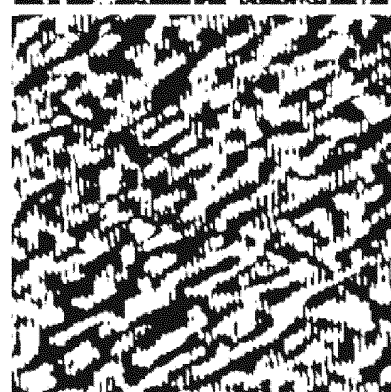
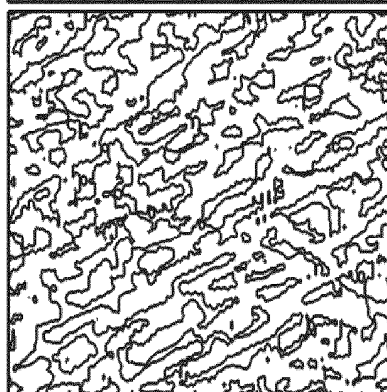
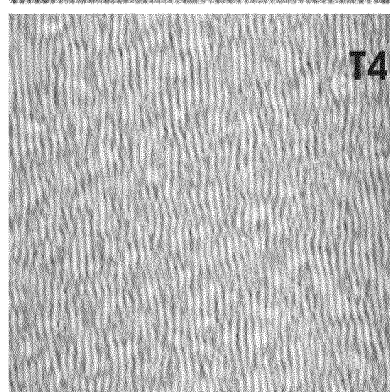
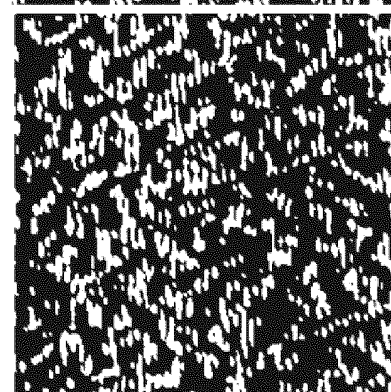
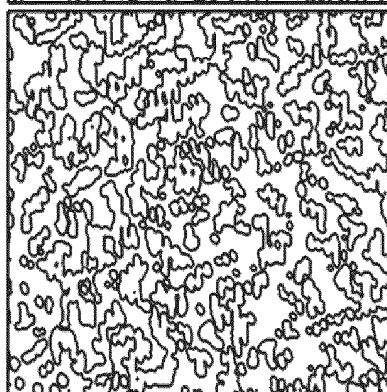
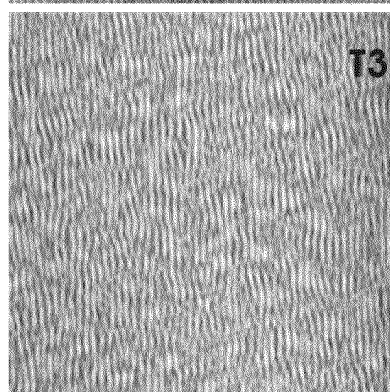
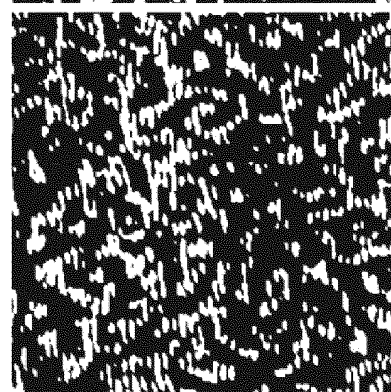
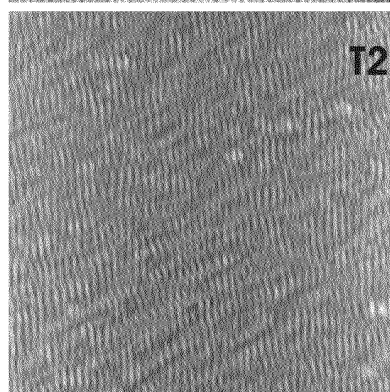
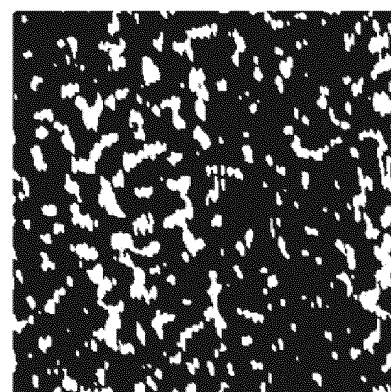
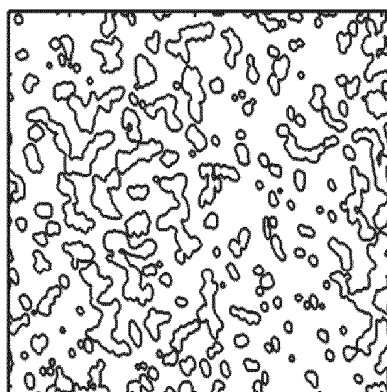
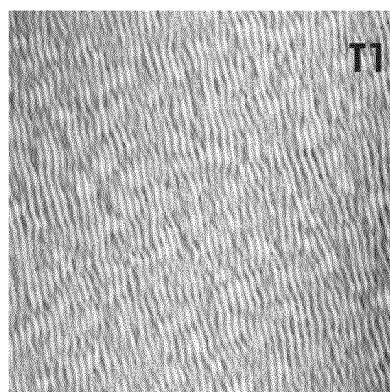
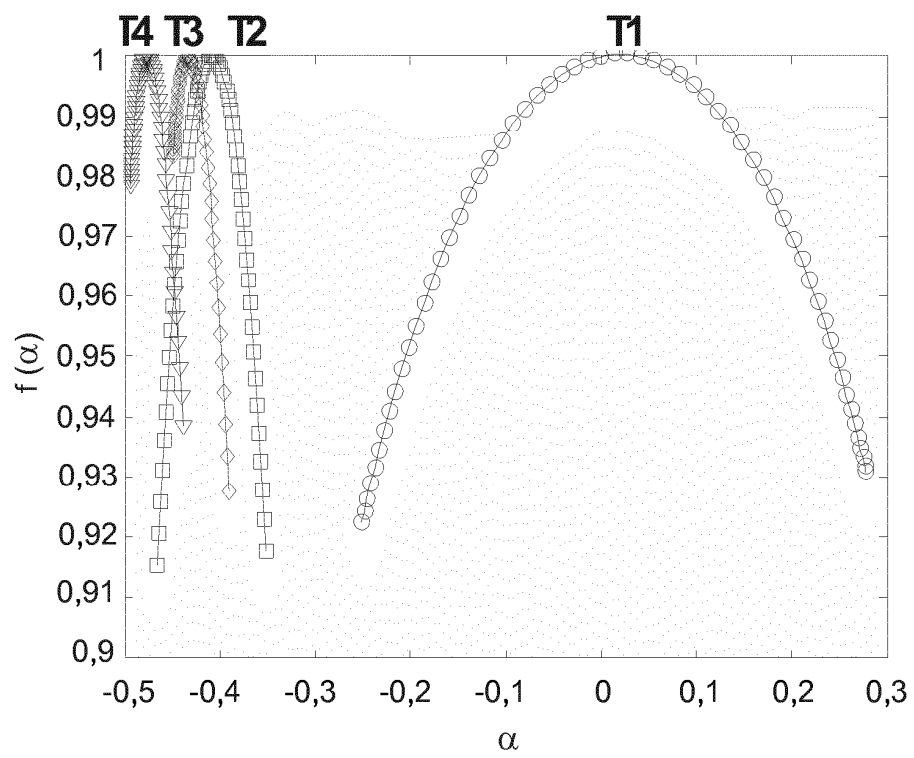
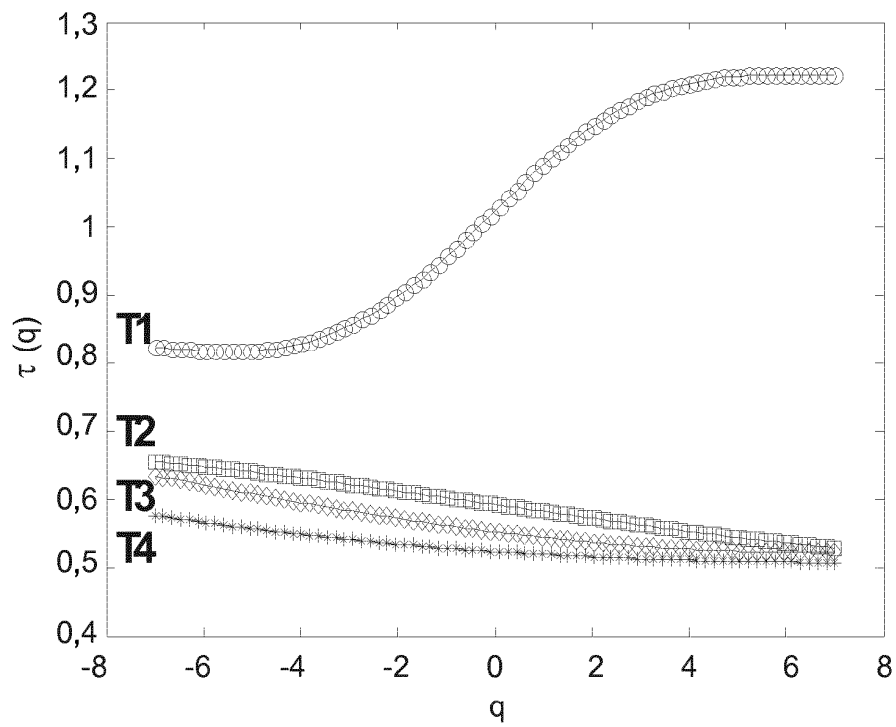


FIG.6a

FIG.6b

FIG.6c



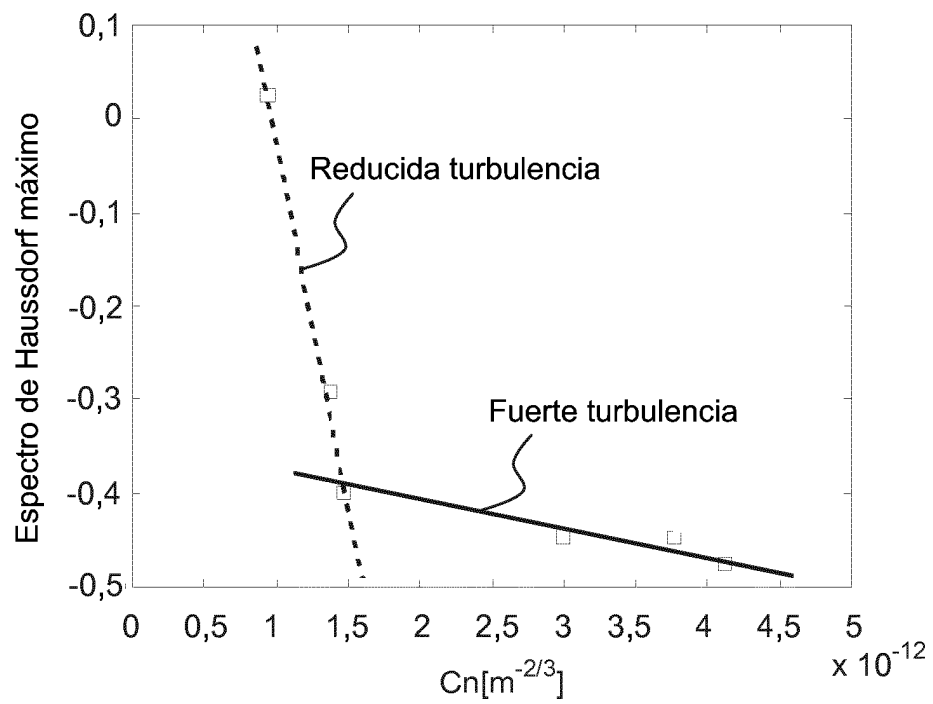


FIG.9

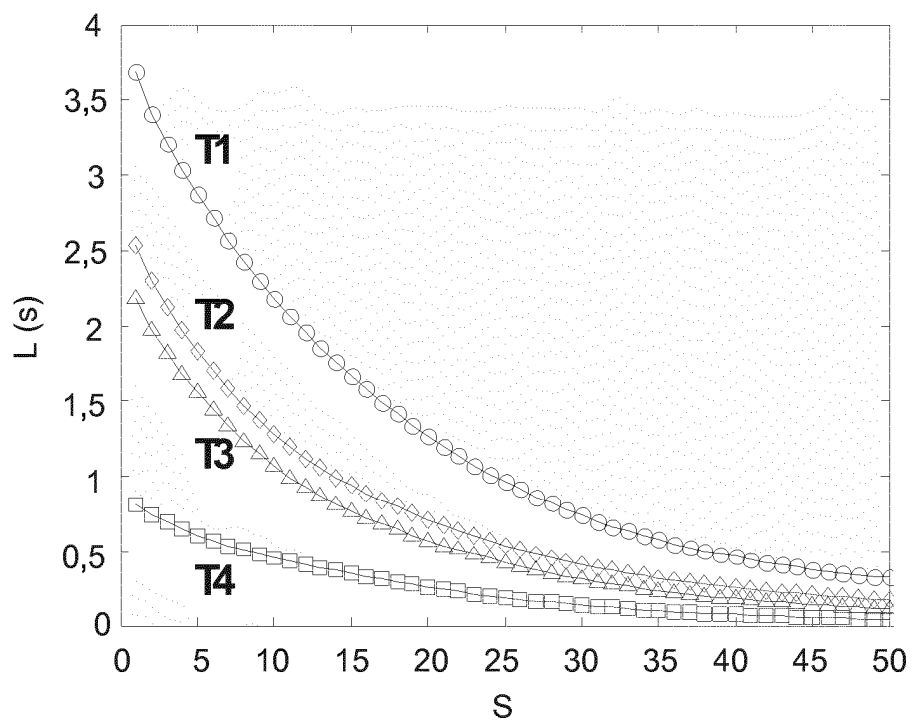


FIG.10

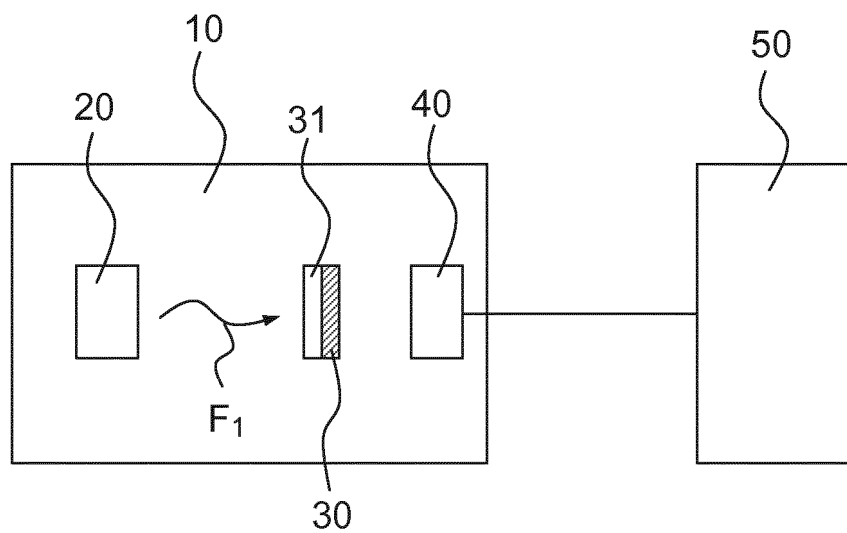


FIG.11

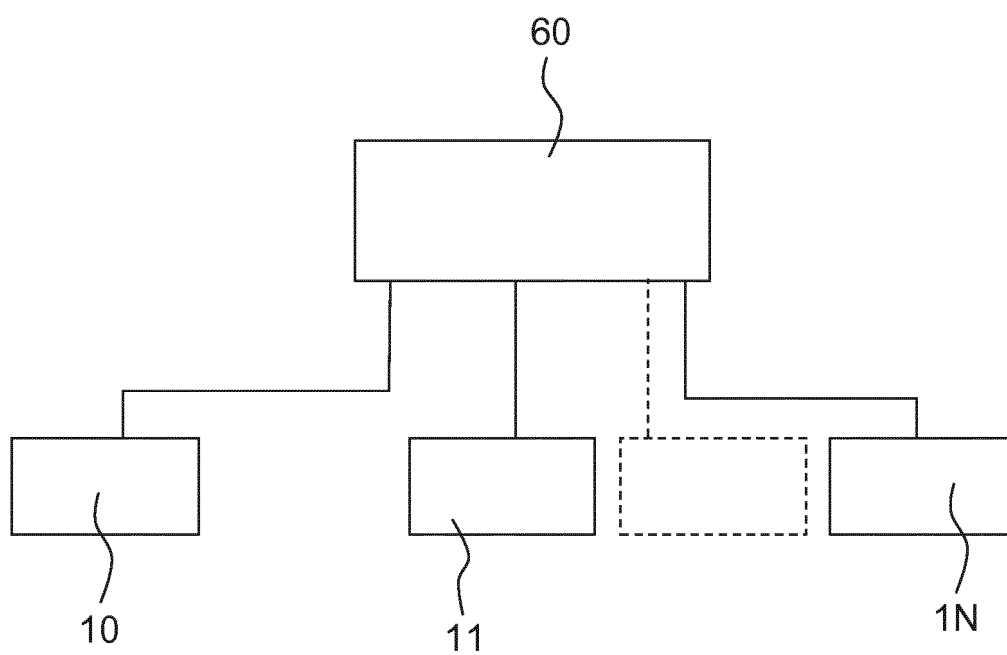


FIG.12