

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 887 026**

21 Número de solicitud: 202030593

51 Int. Cl.:

**G01N 21/41** (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN

B2

22 Fecha de presentación:

**18.06.2020**

43 Fecha de publicación de la solicitud:

**21.12.2021**

Fecha de modificación de las reivindicaciones:

**19.12.2022**

Fecha de concesión:

**15.12.2023**

45 Fecha de publicación de la concesión:

**22.12.2023**

73 Titular/es:

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA (100.0%)  
Pabellón de Gobierno. Avda los Castros s/n  
39005 Santander (Cantabria) ES**

72 Inventor/es:

**SAIZ VEGA, José María y  
COBO CANO, Miriam**

54 Título: **REFRACTÓMETRO Y MÉTODO DE MEDIDA DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN DE UNA SUBSTANCIA**

57 Resumen:

La presente invención está dirigida a un refractómetro y a un método para determinar el índice de refracción de una sustancia, y más específicamente a un refractómetro con una semiesfera, un elemento de contraste, un dispositivo de captación de imagen y un espejo, en donde el índice de refracción de la sustancia se obtiene comparando las dimensiones de una imagen obtenida al atravesar un haz de luz la sustancia.

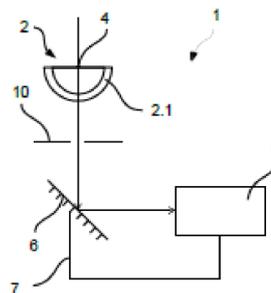


Fig. 1a

ES 2 887 026 B2

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 41 LP 24/2015.  
Dentro de los seis meses siguientes a la publicación de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial cualquier persona podrá oponerse a la concesión. La oposición deberá dirigirse a la OEPM en escrito motivado y previo pago de la tasa correspondiente (art. 43 LP 24/2015).

## DESCRIPCIÓN

### REFRACTÓMETRO Y MÉTODO DE MEDIDA DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN DE UNA SUBSTANCIA

#### Campo técnico de la invención

5

La presente invención está dirigida a un refractómetro y a un método para determinar el índice de refracción de una sustancia, y más específicamente a un refractómetro con una semiesfera, un elemento de contraste, un dispositivo de captación de imagen y un espejo, en donde el índice de refracción de la sustancia se obtiene comparando las dimensiones  
10 de una imagen obtenida al atravesar un haz de luz la sustancia.

#### Antecedentes de la invención

Los avances científicos y tecnológicos requieren de métodos cada vez más precisos,  
15 sencillos y mecanizados para determinar el índice de refracción de materiales muy diversos. La medida precisa del índice resulta de especial importancia en muchos campos de investigación como la química, medicina, biología, física del estado sólido, fibras ópticas, sistemas fotónicos, y numerosas industrias, como la farmacéutica o la alimentaria. Existen muchos métodos de medida del índice de refracción, siendo más adecuado uno u otro en  
20 función del estado de agregación de la sustancia y su forma, o en función de requisitos prácticos, como rapidez, precisión, accesibilidad, portabilidad, etc. El funcionamiento de los sistemas más habituales se basa en la medida del índice de refracción a partir del análisis del ángulo de refracción, el ángulo límite (el refractómetro de Abbe es el más conocido, aunque hay otros como el de Pulfrich o el de inmersión que funcionan bajo el mismo  
25 principio), el ángulo Brewster, el patrón interferencial, la polarimetría o la elipsometría.

Una familia de métodos, que resulta de especial interés son los procedimientos de formación de imágenes por sistemas en los que la potencia de un elemento depende del índice de refracción que se quiere determinar. Un precedente de este tipo de refractómetros  
30 es el refractómetro de Jelley, en el que mediante una cavidad se crea un prisma con el líquido problema, que desvía la luz procedente de una rendija creando una imagen virtual. En los últimos años, han surgido nuevos métodos de medida del índice a través de la formación y el análisis de imágenes mediante cámaras digitales o sensores, lo que facilita la automatización de la medida. Entre estos métodos se encuentra el método del patrón de

sombra, los sistemas optofluídicos, y los sistemas basados en lentes de electrohumectación.

El método del patrón de sombra mide de forma sencilla el índice de refracción de líquidos a partir del gradiente de un patrón de sombra, con un error inferior a 0,01. Los sistemas optofluídicos se basan en el análisis de las imágenes producidas por una lente optofluídica. La lente consiste en una mezcla transparente de silicona (polidimetilsiloxano) que tiene en su interior una cavidad hueca en forma de lente. El líquido problema se inyecta en esta cavidad para encontrar su índice de refracción. En los sistemas basados en lentes de electrohumectación, el índice de refracción del líquido se determina en función del valor del voltaje de conducción de una lente de electrohumectación, que modifica la curvatura de la frontera líquido-líquido hasta focalizar la luz incidente en un plano.

Los métodos convencionales de medida del índice de refracción de líquidos, desde el refractómetro de Abbe, probablemente el más conocido, hasta los métodos elipsométricos e interferométricos, permiten determinar de forma precisa el índice de refracción. A pesar de esto, presentan el inconveniente de que, en sus versiones menos sofisticadas, resultan difíciles de manejar y operar, aparte de ser voluminosos y estar compuestos por componentes ópticos costosos. Estos dispositivos no siempre permiten la medida en tiempo real del índice de refracción del líquido de forma sencilla y automatizada.

Las alternativas a los dispositivos y métodos convencionales de medida del índice de refracción de líquidos presentan numerosos inconvenientes. En el caso del refractómetro de Jolley, se trata de un instrumento que opera bajo observación del ojo, y requeriría lentes adicionales para producir una imagen real sobre un detector, lo que complicaría el instrumento. El método del patrón de sombra mencionado tiene una precisión de 0,01 en la medida del índice, considerablemente inferior a la de un refractómetro comercial. Además, posee un rango de medida reducido, lo que limita sus aplicaciones. Este rango es aún menor en el caso del sistema basado en la lente de electrohumectación aunque la precisión de este dispositivo era similar a la de los refractómetros disponibles en el mercado. El mecanismo de medida basado en el análisis de las imágenes producidas por una lente optofluídica tampoco consigue una precisión mejor que la del refractómetro de Abbe, a pesar de ser un instrumento de complejidad considerable. Por último, los sistemas de medida de índice por formación de imagen requerirían una corrección del enfoque si han

de ser utilizados para medir la dispersión, ya que al variar la longitud de onda cambia la posición de la imagen (aberración cromática longitudinal).

### **Descripción de la invención**

5

La presente invención propone un refractómetro y un método de medida del índice de refracción de una sustancia según se definen en las reivindicaciones independientes, siendo válidos especialmente para líquidos, aunque con aplicaciones también en sólidos transparentes de cualquier otro material.

10

En un primer aspecto inventivo, la invención proporciona *un refractómetro configurado para medir el índice de refracción de una sustancia, caracterizado por que comprende:*

*una semiesfera transparente que comprende la sustancia, en donde la semiesfera está configurada para interponerse en la trayectoria de un haz de luz incidente, de*

15

*forma que el haz de luz atraviese el centro de curvatura de la semiesfera,*

*un elemento de contraste, dispuesto substancialmente en el centro de curvatura de la semiesfera,*

*un dispositivo de captación de imagen, configurado para captar una imagen del elemento de contraste generada por el paso del haz de luz, y*

20

*un espejo, configurado para desviar el haz de luz hacia el dispositivo de captación de imagen;*

*de forma que la medida del índice de refracción de la sustancia se obtiene a partir de la relación entre las dimensiones de la imagen del elemento de contraste formada al pasar el haz de luz a través de la sustancia y las dimensiones de una imagen de referencia*

25

*obtenida previamente.*

Este dispositivo permite la medida sencilla del índice de refracción en función del aumento lateral que está directamente relacionado con el índice de refracción. Asimismo, no requiere componentes ópticos costosos, ni excesivamente precisos, y su manejo y transporte son  
30 simples. Posee aplicaciones en sistemas de medida del índice de refracción en tiempo real, especialmente de líquidos, y no tiene limitaciones en el rango de medida. Además, la apertura, o ángulo de salida del haz de luz, no será una limitación importante, y la imagen no tendrá cromática longitudinal, sólo de aumento. El refractómetro permite la medida directa del índice de refracción a través del aumento de la imagen de un elemento de

contraste situado en el centro de curvatura de la semiesfera, que es captada por un dispositivo de captación de imagen. En consecuencia, la imagen puede ser analizada en tiempo real, preferiblemente por medio de un software convencional capaz de contar el número de píxeles iluminados en una imagen. En investigación podría estar especialmente  
 5 indicado para la medida del “Número de Abbe”, parámetro que evalúa la dispersión de los materiales.

La semiesfera se comporta en la práctica como una lente semiesférica cuyas propiedades se pueden determinar analizando el sistema como un dioptrio esférico. En el dioptrio  
 10 esférico, la relación entre el índice de refracción y el tamaño de la imagen formada del elemento de contraste se puede obtener a partir del invariante de Abbe:

$$n \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{s} \right) = n' \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{s'} \right)$$

donde  $n$  es el índice de refracción del primer medio,  $n'$  el índice de refracción del segundo medio y  $r$  el radio de curvatura del dioptrio. El objeto que genera la imagen, el elemento de  
 15 contraste, se encuentra a una distancia  $s$  del punto en el que se produce el cambio de medio, o vértice del dioptrio, y la imagen del objeto se forma a una distancia  $s'$ ; es fácil comprobar que la relación entre los tamaños, o alturas, del objeto y de la imagen es igual a la relación entre las distancias,  $s/s'$ , por lo que en el presente documento se emplearán indistintamente.

20 Si se considera una semiesfera transparente homogénea de un primer material (el primer medio), dispuesta en el aire (el segundo medio, con índice de refracción  $n_{aire} \approx 1$ ), y un objeto que forma una imagen dispuesto en el centro de curvatura de la semiesfera, es decir, a una distancia del vértice del dioptrio igual al radio de la lente,  $s = r$ , y se substituye en el  
 25 invariante de Abbe, se tiene que  $s = r = s'$ . Considerando ahora que el aumento lateral de la imagen viene dado por:

$$\beta' = \frac{ns'}{n's}$$

Dado que el segundo medio es aire, el índice  $n'$  se puede aproximar como  $n' = n_{aire} \approx 1$ , y el aumento lateral de la imagen se puede expresar como:

30 
$$\beta' = n$$

La consecuencia directa es que, en un sistema óptico como el descrito, el aumento de la imagen de un objeto depende sólo del índice de refracción. Se ha aproximado  $n' \approx 1$ , por

conveniencia, pero no es una condición imprescindible, y dado el caso,  $n'$  se puede substituir por el valor que corresponda.

A efectos de automatizar el proceso, resulta conveniente convertir la imagen en una imagen discretizada en un conjunto de píxeles con valores de luminosidad, color, etc., que se pueden contabilizar por medio de un procesador. Una forma de contabilizar los píxeles de la imagen formada es establecer un valor umbral de luminosidad a partir del cual se considera que el pixel está en la parte iluminada de la imagen o en la parte en sombra.

10 Para ello es preferible expresar el aumento  $\beta'$  en función de un número de píxeles; si se denominan  $N_0$  y  $N_V$  al número de píxeles de la imagen formada sin ninguna lente, y con una lente (por ejemplo, una lente de vidrio), respectivamente, el aumento se puede expresar:

$$\beta' = \sqrt{\frac{N_V}{N_0}}$$

15 Análogamente, se puede aplicar el mismo razonamiento forma para una semiesfera hueca (por ejemplo, de vidrio) con un índice de refracción  $n_V$ , que contiene una substancia translúcida o transparente, en donde se aplica el mismo cálculo dos veces, una por cada cambio de medio.

Para el paso de la substancia al vidrio de la semiesfera:  $\beta'_1 = \frac{n}{n_V}$

20 Para el paso del vidrio de la semiesfera al aire:  $\beta'_2 = \frac{n_V}{n'}$

El factor de aumento total se calcula como:  $\beta' = \beta'_1 \cdot \beta'_2 = \frac{n}{n_V} \cdot \frac{n_V}{n'} = \frac{n}{n'}$

Si se denominan  $N_0$  y  $N_L$  al número de píxeles de la imagen formada sin ninguna lente, y con la semiesfera hueca, respectivamente, tomando  $n' = n_{aire} \approx 1$ , el aumento se puede expresar:

$$n = \beta' = \sqrt{\frac{N_L}{N_0}}$$

Para simplificar el cálculo del índice de refracción con una semiesfera hueca se puede plantear el aumento relativo, que relaciona  $N_V$  y  $N_L$ , el número de píxeles de la imagen formada con la semiesfera hueca vacía (con aire en su interior), y con la semiesfera hueca llena de una substancia, respectivamente:

$$n = \beta'_{rel} = \sqrt{\frac{N_L}{N_V}}$$

A lo largo del presente documento, se debe entender por semiesfera un elemento transparente o translúcido con un comportamiento de lente esférica; preferiblemente, el refractómetro trabaja con un haz de luz estrecho, por lo que la forma semiesférica se puede aplicar sólo una porción próxima al eje óptico del sistema que atraviesa el haz de luz. La semiesfera puede o bien estar formada por la propia sustancia objeto de estudio, o bien estar contenida en su interior. Ventajosamente, objeto e imagen se localizan sobre el eje en “puntos de Weierstrass”, de forma que uno es imagen perfecta, o estigmática, del otro, confiriendo al método una especial solidez. Primero, la apertura, o ángulo de salida de la luz, no será una limitación importante; y segundo, la imagen no tendrá cromática longitudinal, sólo de aumento. Al tratarse del parámetro a medir, el comportamiento es el deseado.

Por elemento de contraste debe entenderse un objeto de dimensiones conocidas que se posiciona en el centro de curvatura de la semiesfera y que al paso de un haz de luz forma una imagen de sí mismo en el lado opuesto del vértice del dioptrio. Ventajosamente, el elemento de contraste alterna porciones que permiten pasar la luz, por ejemplo, perforaciones, con otras opacas. En función del índice de refracción de los materiales que atraviesa el haz de luz, la imagen del elemento de contraste tendrá unas dimensiones diferentes. Así, midiendo el tamaño de la imagen formada y comparando sus dimensiones con las de una imagen de referencia, obtenida al atravesar el haz de luz un material de índice de refracción conocido, es posible conocer el índice de refracción de la sustancia.

Por dispositivo de captación de imagen se debe entender un dispositivo capaz de captar la imagen formada y o bien almacenarla para su análisis, o bien ofrecer información relevante de dicha imagen a un usuario del refractómetro.

Por espejo se debe entender un elemento capaz de producir al menos una reflexión parcial del haz de luz, preferiblemente en dirección al dispositivo de captación de imagen y cuya orientación respecto al eje óptico se puede modificar selectivamente en función de la configuración del refractómetro. Gracias al espejo, el haz de luz se desvía hacia el dispositivo de captación, lo que proporciona mayor flexibilidad a la posición del dispositivo

de captación.

En una realización particular, *la semiesfera es una semiesfera hueca, configurada para contener la substancia en su parte cóncava y para interponerse selectivamente en la trayectoria del haz de luz.* A lo largo del presente documento se entenderá como semiesfera hueca a un casquete semiesférico de un material transparente o translúcido, que en virtud de su geometría define una parte cóncava y una convexa; en una realización, la semiesfera hueca esa fabricada en vidrio. La substancia transparente o translúcida, que preferiblemente es un líquido, se introduce en la parte cóncava de la semiesfera hueca para formar una lente semiesférica con la substancia. Ventajosamente, la semiesfera hueca se puede desmontar del refractómetro; de esta forma es posible obtener una imagen del elemento de contraste sin que el haz de luz experimente un cambio de medio, o se puede intercambiar con otra semiesfera.

En una realización particular, *la semiesfera es una semiesfera maciza, configurada para interponerse selectivamente en la trayectoria del haz de luz.* El refractómetro puede operar tanto con una semiesfera hueca como con una semiesfera maciza de un material homogéneo transparente o translúcido, siendo ambas intercambiables selectivamente en función de los requerimientos del experimento. Algunas substancias, en particular sólidos, pueden mecanizarse para obtener la forma semiesférica, y así poder medir su índice de refracción.

En una realización particular, *el dispositivo de captación de imagen comprende una cámara digital y unos medios de procesamiento de imagen.* Las cámaras digitales están configuradas para discretizar una imagen en píxeles y asignar a cada píxel un valor de luminosidad y color, por lo que, ventajosamente se obtiene una señal digital de la imagen capaz de ser procesada por parte de los medios de procesamiento digital de imagen. Ventajosamente, la imagen captada se transforma en una señal digital que se transmite a unos medios de procesamiento de imagen; preferiblemente, los medios de procesamiento digital de imagen comprenden un procesador y unos medios de almacenamiento con un software de análisis de imagen configurado para clasificar y determinar el número de píxeles de una imagen captada, y para compararla con el tamaño de una imagen de referencia.

En una realización particular, el refractómetro *comprende además un soporte, configurado para sostener y orientar al menos la semiesfera y el espejo*. Como forma de minimizar el error de la medida, el sistema óptico del refractómetro debe tener una elevada precisión y estabilidad en el posicionamiento y orientación de los elementos, en especial de la semiesfera y del espejo. Para ello, al menos los anteriores elementos del refractómetro se relacionan entre sí por medio de un soporte con una rigidez y estabilidad suficientes que asegura la posición de los elementos; además de la esfera y del espejo, el soporte preferiblemente asegura la posición de otros elementos del refractómetro, por ejemplo, el elemento de contraste y el dispositivo de captación de imagen; el soporte preferiblemente comprende una estructura adaptable, en la cual se puede modificar la posición de los diferentes elementos o añadir otros de forma selectiva.

En una realización particular, el refractómetro *comprende además una fuente luminosa configurada para emitir un haz de luz*. Ventajosamente, la fuente luminosa emite un haz de luz dirigido hacia el centro de curvatura de la semiesfera, de manera que se forme una imagen al atravesar el elemento de contraste. La fuente luminosa preferiblemente emite un haz de luz de forma controlada, es decir, cuyos parámetros son conocidos y/o pueden ser modificados a voluntad del operador.

En una realización particular, *la fuente luminosa comprende uno o más de los siguientes: una lámpara de sodio, un láser y un difusor*. Una fuente luminosa de sodio presenta las ventajas de proporcionar una luz difusa y monocromática en una longitud de onda central, y representativa del espectro visible. Mediante un láser se logra tener una luz monocromática y espectralmente potente. En una realización, el refractómetro comprende una pluralidad de fuentes luminosas; con distintas fuentes es posible seleccionar diferentes longitudes de onda y calcular la dispersión del material, por ejemplo, determinar el número de Abbe.

En una realización particular, el refractómetro *comprende además un segundo espejo configurado para desviar un haz de luz hacia el centro de curvatura de la semiesfera*. El refractómetro es especialmente útil para la medida del índice de refracción de un líquido, que puede verse con facilidad si la semiesfera hueca no está orientada con su parte cóncava hacia arriba; por eso es ventajoso mantener la semiesfera orientada según sea más conveniente, y hacer uso de espejos para desviar el haz de luz a voluntad en lugar de

cambiar la posición de la fuente luminosa y/o del dispositivo de captación de imágenes, que pueden ser pesados y voluminosos. En particular, el segundo espejo permite desviar un haz de luz procedente de la fuente luminosa orientada en paralelo al plano horizontal hacia el centro de curvatura de la semiesfera.

5

En una realización particular, el refractómetro *comprende además un diafragma interpuesto entre la semiesfera y el espejo*. El diafragma permite ventajosamente trabajar en la zona paraxial de la lente, lo que minimiza las aberraciones.

10 Una realización del elemento de contraste comprende una placa de material opaco perforada para el paso del haz de luz, de esta forma, la imagen formada se corresponde con la forma de la perforación. En una realización particular, *el elemento de contraste comprende una placa con un orificio circular*. Ventajosamente, un orificio circular proporciona una imagen fácil de medir de forma manual o automatizada.

15

En un segundo aspecto inventivo, la invención proporciona un *método de medida del índice de refracción de una sustancia, que comprende las etapas de:*

*proveer de un refractómetro según el primer aspecto inventivo;*

*disponer una semiesfera en la trayectoria de un haz de luz incidente; y*

20 *obtener una medida de las dimensiones de la imagen generada al pasar el haz de luz a través del elemento de contraste.*

Como se ha explicado, el índice de refracción de una sustancia se puede obtener a partir de una medida de las dimensiones de la imagen de un elemento de contraste formada por  
25 el paso de un haz de luz a través de una semiesfera como la descrita en el primer aspecto inventivo, dispuesta con su centro de curvatura en el eje óptico del refractómetro definido por la trayectoria del haz de luz.

En una realización particular, el método *comprende además las etapas de disponer la*  
30 *sustancia en la parte cóncava la semiesfera hueca; y disponer la semiesfera hueca en la trayectoria de un haz de luz*. La sustancia objeto de estudio se dispone en la parte cóncava de la semiesfera hueca para formar una lente semiesférica compuesta por dos medios, el material de la semiesfera hueca y el de la propia sustancia; preferiblemente, esta etapa se lleva a cabo si la sustancia es un líquido o un gas, o un sistema multifásico capaz de

adaptar su forma a un contenedor.

En una realización particular, el método *comprende además la etapa de calcular el índice de refracción de la sustancia a partir de la relación entre las dimensiones de la imagen formada al pasar la luz a través de la sustancia y las dimensiones de una imagen de referencia*. El índice de refracción se obtiene a partir de la relación entre los tamaños de una imagen formada y una imagen de referencia. De forma ventajosa, la relación entre tamaños de las imágenes se expresa en función del número de píxeles de la imagen, y el índice de refracción se calcula como la raíz cuadrada de la relación entre el número de píxeles de la imagen generada por el paso del haz de luz por la sustancia y el número de píxeles de la imagen de referencia.

En una realización particular, el método *comprende además la etapa de disponer la semiesfera maciza en la trayectoria de un haz de luz incidente*. Ventajosamente, la esfera maciza y la esfera hueca son intercambiables entre sí y se montan en el refractómetro en función de las características de la sustancia objeto de estudio.

En una realización particular, el método *comprende además la etapa de obtener una medida de las dimensiones de una imagen de referencia*. Ventajosamente, la imagen de referencia se obtiene una sola vez para una serie de medidas, y se almacena mientras la sea de utilidad en la memoria del dispositivo de captación de imagen; de esta forma se reducen los tiempos de operación y se minimizan las posibilidades de error humano. Alternativamente, en una realización se almacena únicamente el dato correspondiente al número de píxeles de la imagen de referencia.

Estas y otras características y ventajas de la invención resultarán evidentes a partir de la descripción de las realizaciones preferidas, pero no exclusivas, que se ilustran a modo de ejemplo no limitativo en los dibujos que se acompañan.

### 30 **Breve descripción de los dibujos**

Figuras 1a, 1b Estas figuras muestran una primera realización del refractómetro con una semiesfera hueca y sólida, respectivamente.

Figura 2 Esta figura muestra una vista de alzado y planta del elemento de

contraste.

Figura 3 Esta figura muestra una segunda realización del refractómetro.

### Descripción detallada de un ejemplo de realización

5

En la siguiente descripción detallada se exponen numerosos detalles específicos en forma de ejemplos para proporcionar un entendimiento minucioso de las enseñanzas relevantes. Sin embargo, resultará evidente para los expertos en la materia que las presentes enseñanzas pueden llevarse a la práctica sin tales detalles.

10

La Figura 1a muestra un primer ejemplo de realización del refractómetro (1). El refractómetro (1) representado comprende una semiesfera (2), que en este caso es una semiesfera hueca (2.1) de vidrio transparente con un elemento de contraste (4) en su centro de curvatura alineado con el eje óptico del refractómetro (1). El alineamiento del centro de curvatura de la semiesfera hueca (2.1) con el eje óptico permite que se comporte como una lente semiesférica a través de la cual pasa un haz de luz, y se pueda modelizar como un dioptrio esférico. El eje óptico del refractómetro (1) coincide substancialmente con la trayectoria del haz de luz, que en las figuras se ha representado por medio de un trazo discontinuo con unas flechas que indican la dirección de propagación de la radiación.

20

Además, en el ejemplo de realización mostrado, el refractómetro (1) comprende un diafragma (10) para asegurarse de que opera en la zona paraxial de la semiesfera hueca (2.1), un espejo (6) orientado a 45° del eje óptico para desviar el haz de luz 90° hacia el dispositivo de captación de imagen (5). Unido al espejo (6) y al dispositivo de captación de imagen (5) se muestra un soporte (7) para mantener la posición y orientación correctas de los elementos; aunque no se muestra en las figuras, el soporte (7) está unido a la semiesfera hueca (2.1) y al elemento de contraste (4) además de al dispositivo de captación de imagen (5) y al espejo (6).

30

En esta realización, la semiesfera hueca (2.1) es un casquete esférico de vidrio N-BK7 con una estructura de sujeción para montarlo en el soporte (7). El dispositivo de captación de imagen (5) comprende una cámara con un sensor CCD conectada operativamente a un ordenador con un software de procesamiento de imagen. Por su parte, el soporte (7) comprende una estructura convencional, que en un ejemplo es una estructura de perfiles

metálicos atornillados.

La Figura 1b muestra una variante del anterior ejemplo de realización mostrado en la Figura 1a, substancialmente idéntico, pero con una semiesfera maciza (2.2) en el lugar de la semiesfera hueca (2.1). En esta realización, la semiesfera maciza (2.2) es del mismo tipo  
5 de vidrio que la semiesfera hueca (2.1). En otros ejemplos, la semiesfera maciza (2.2) está fabricada en un material cuyo índice de refracción se desea estudiar.

La Figura 2 muestra un ejemplo de realización del elemento de contraste (4) configurado  
10 como una placa opaca con un orificio circular de dimensiones conocidas. En el ejemplo mostrado el orificio es ligeramente cónico, y se toma el radio del borde más estrecho como valor de referencia para el cómputo del índice de refracción. Resulta conveniente que el orificio tenga un diámetro comparable a la anchura del haz de luz, a fin de mantenerse en la región paraxial del sistema. En la realización mostrada, el elemento de contraste (4) se  
15 ha mecanizado a partir de una lámina metálica delgada con un punzón de anchura conocida y el orificio tiene un radio  $r_0 = 0,5 \text{ mm}$ .

La Figura 3 muestra un segundo ejemplo de realización del refractómetro (1). En este ejemplo de realización se encuentran los mismos elementos que en el ejemplo anterior, y  
20 además el refractómetro (1) comprende una fuente luminosa (9) y un segundo espejo (8) para desviar el haz de luz generado en la fuente luminosa (9) hacia la semiesfera maciza (2.2), formando un periscopio con el primer espejo (6). Se muestran también en las figuras dos alternativas de realización de la semiesfera (2), una semiesfera hueca (2.1) y una semiesfera maciza (2.2), siendo intercambiables entre sí.

25

La fuente luminosa (9) es en el ejemplo mostrado una lámpara de sodio orientada en horizontal; la lámpara emite un haz de luz con una longitud de onda de  $\lambda_D = 589,3 \text{ nm}$  y comprende medios para activarla y desactivarla selectivamente, así como para ajustar otros parámetros de funcionamiento.

30

En otra realización, no mostrada en las figuras, el dispositivo de captación de imagen (5) integra los medios de procesamiento digital, necesarios para contabilizar el número de píxeles de una imagen capturada y almacenar la imagen, comparar este número con un número de píxeles de una imagen de referencia, calcular el índice de refracción de forma

acorde y mostrar el valor por medio de una pantalla de visualización.

Para calcular el índice de refracción de una sustancia dada en fase líquida por medio de un refractómetro (1) como el de la Figura 3 es necesario rellenar la semiesfera hueca (2.1) con dicha sustancia, disponer la semiesfera hueca (2.1) alineada con el eje óptico del refractómetro (1), activar la fuente luminosa (9) y capturar una imagen con el dispositivo de captación de imagen (5). El dispositivo de captación de imagen (5) procesa la imagen y emite un valor del número de píxeles  $N_L$ .

10 Si no se dispone de una imagen de referencia o un valor del número de píxeles para comparar, la semiesfera hueca (2.1) se vacía de la sustancia, y se repite el proceso para obtener el número de píxeles de una imagen de referencia,  $N_V$ . Por último, se procede al cómputo del índice de refracción de la sustancia objeto de estudio,  $n$ .

15 También es posible calcular el índice de refracción del material de una semiesfera maciza (2.2). En tal caso, en primer lugar, se obtiene un valor del número de píxeles de la imagen formada con la semiesfera maciza (2.2) interpuesta en el haz de luz,  $N_V$ . A continuación, se repite el proceso retirando la semiesfera maciza (2.2), y midiendo la imagen formada cuando el haz de luz no atraviesa ninguna semiesfera (2),  $N_0$ .

20

Se presentan a continuación dos ejemplos específicos del cálculo de un índice de refracción  $n$  por medio del refractómetro (1) en una situación ideal, con las aberraciones corregidas y sin tener en cuenta la existencia de ruido en la señal de los píxeles o la presencia de luz de fondo. En el primer ejemplo se desarrolla el cálculo con una semiesfera hueca (2.1), y en el segundo con la semiesfera maciza (2.2). En ambos casos el material de las semiesferas es vidrio N-BK7, y se considera un elemento de contraste (4) con un orificio circular de  $r_0 = 0,5 \text{ mm}$  y el aumento de la cámara  $\beta'_L = -10$ .

25

- *Primer ejemplo:*

30

En el primer caso la sustancia objeto de estudio es agua y la semiesfera hueca (2.1) contiene agua destilada en su parte cóncava ( $n_{\text{Agua}} = 1,333$  para la longitud de onda  $\lambda_D = 589,3 \text{ nm}$  y la temperatura  $T = 20^\circ\text{C}$ ).

En primer lugar, se obtiene una imagen con unas dimensiones de  $N_L = 5582308$  píxeles (px). A continuación, se mide con la semiesfera hueca (2.1) vacía, sólo con aire en su interior, tomando  $n_{aire} \approx 1$ , y se obtiene que  $N_V = 3141676$  px. Por tanto, se tiene que el índice de refracción es  $n = 1,332988$ .

5

*-Segundo ejemplo:*

En el segundo caso, se considera el funcionamiento del refractómetro para una semiesfera maciza (2.2) de vidrio ( $n_V = 1,5167$  para la longitud de onda  $\lambda_D = 589,3$  nm a una temperatura  $T = 20^\circ\text{C}$ ).

El número de píxeles de la imagen con la semiesfera maciza (2.2) obtenido es de  $N_V = 7226792$  px. Retirando la semiesfera maciza (2.2) se obtiene que el número de píxeles es  $N_0 = 3141676$  px. En consecuencia, se tiene que el índice de refracción es  $n = 1,51667$ .

## REIVINDICACIONES

1. Refractómetro (1) configurado para medir el índice de refracción de una sustancia, caracterizado por que comprende:

5 una semiesfera (2) transparente hueca (2.1) que comprende la sustancia en su parte cóncava, en donde la semiesfera (2) está configurada para interponerse selectivamente en la trayectoria de un haz de luz incidente, de forma que el haz de luz atraviese el centro de curvatura de la semiesfera (2),

10 un elemento de contraste (4), dispuesto substancialmente en el centro de curvatura de la semiesfera (2),

un dispositivo de captación de imagen (5), configurado para captar una imagen del elemento de contraste (4) generada por el paso del haz de luz,

y un espejo (6), configurado para desviar el haz de luz hacia el dispositivo de captación de imagen (5);

15

de forma que la medida del índice de refracción de la sustancia se obtiene a partir de la relación entre las dimensiones de la imagen del elemento de contraste (4) formada al pasar el haz de luz a través de la sustancia y las dimensiones de una imagen de referencia obtenida previamente.

20

2. Refractómetro (1) según la reivindicación anterior, en donde el dispositivo de captación de imagen (5) comprende una cámara digital y unos medios de procesamiento de imagen.

25 3. Refractómetro (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además un soporte (7), configurado para sostener y orientar al menos la semiesfera (2) y el espejo (6).

30 4. Refractómetro (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además una fuente luminosa (9) configurada para emitir un haz de luz.

5. Refractómetro (1) según la reivindicación anterior, en donde la fuente luminosa (9) comprende uno o más de los siguientes: una lámpara de sodio, un láser y un difusor.

5 6. Refractómetro (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además un segundo espejo (8) configurado para desviar un haz de luz hacia el centro de curvatura de la semiesfera (2).

7. Refractómetro (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además un diafragma (10) interpuesto entre la semiesfera (2) y el espejo (6).

10

8. Refractómetro (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el elemento de contraste (4) comprende una placa con un orificio circular.

15 9. Método de medida del índice de refracción de una sustancia, que comprende las etapas de:

20 proveer de un refractómetro (1) según cualquiera de las reivindicaciones 1-8; obtener una medida de las dimensiones de una imagen de referencia; disponer la sustancia en la parte cóncava de la semiesfera hueca (2.1); disponer la semiesfera hueca (2.1) en la trayectoria de un haz de luz incidente; obtener una medida de las dimensiones de la imagen generada al pasar el haz de luz a través del elemento de contraste (4); calcular el índice de refracción de la sustancia a partir de la relación entre las dimensiones de la imagen formada al pasar la luz a través de la sustancia y las dimensiones de una imagen de referencia.

25

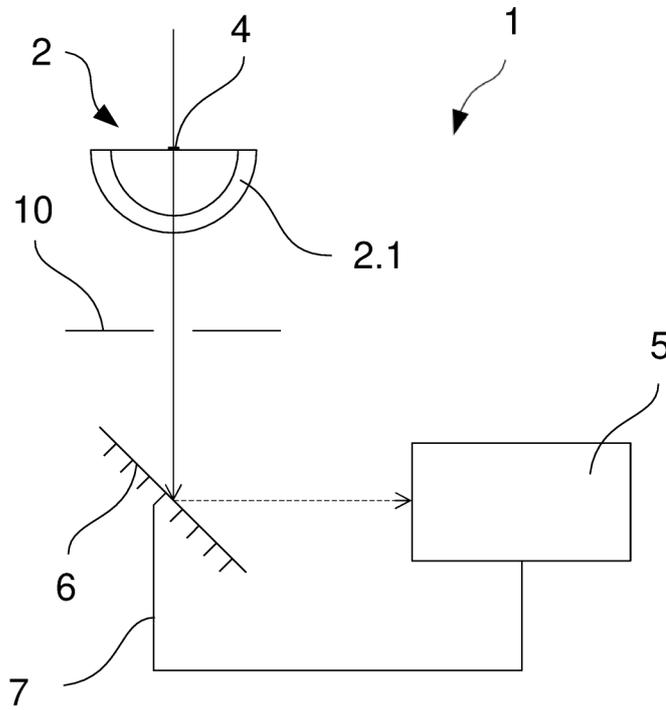


Fig. 1a

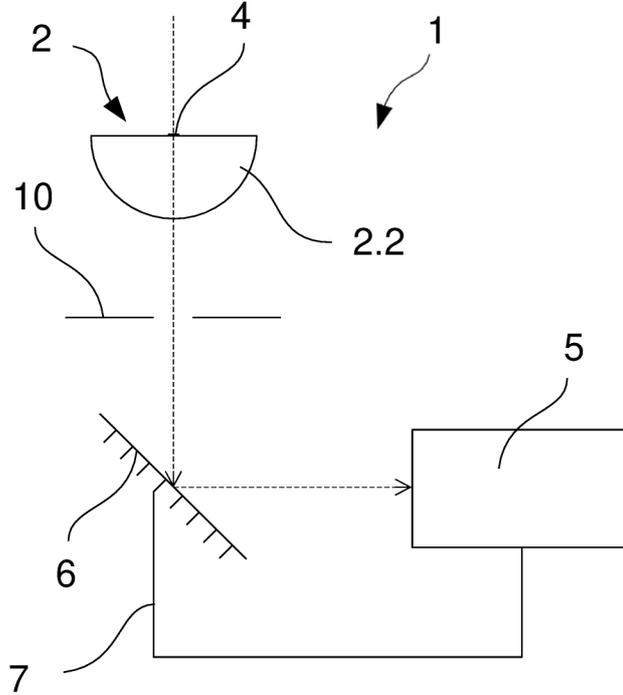


Fig. 1b

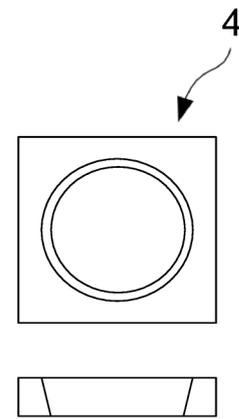


Fig. 2

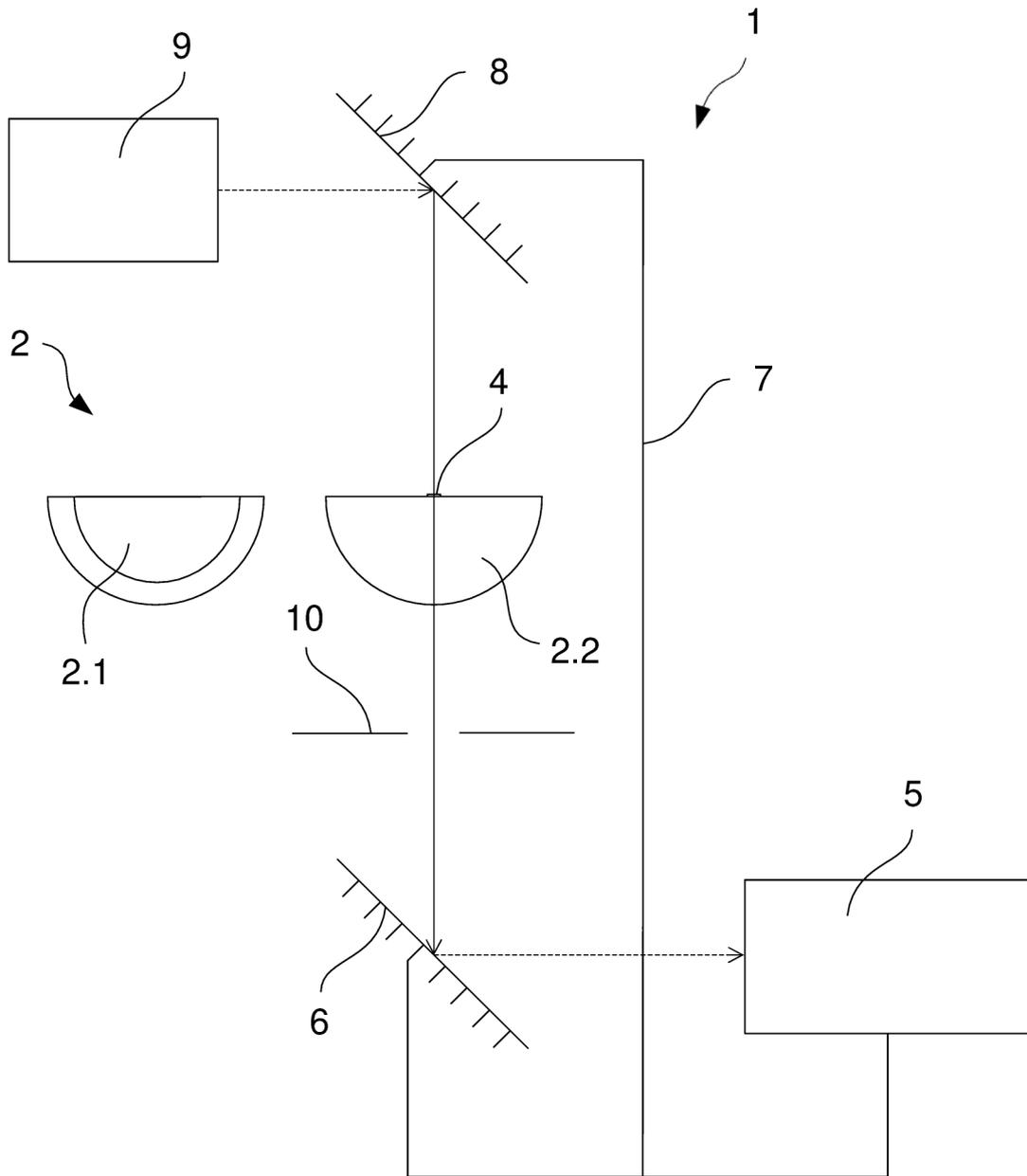


Fig. 3