

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 917 217**

51 Int. Cl.:

G01B 11/06 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **04.01.2017 PCT/US2017/012086**

87 Fecha y número de publicación internacional: **13.07.2017 WO17120160**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.01.2017 E 17736209 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **23.03.2022 EP 3400431**

54 Título: **Método óptico para medir el grosor de recubrimientos depositados sobre sustratos**

30 Prioridad:

07.01.2016 US 201662275905 P

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

07.07.2022

73 Titular/es:

**ARKEMA, INC. (100.0%)
900 First Avenue
King of Prussia, PA 19406, US**

72 Inventor/es:

MOELLER, GUNTER, E.

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 917 217 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

Método óptico para medir el grosor de recubrimientos depositados sobre sustratos

Campo de la invención

5 La presente invención se refiere a métodos y aparatos para medir ópticamente el grosor de un recubrimiento depositado sobre un sustrato.

Antecedentes de la invención

10 Durante el proceso de formación de un recipiente de vidrio, típicamente se aplica un recubrimiento de óxido metálico al exterior del recipiente de vidrio. Dichos recubrimientos pueden incluir estaño, titanio u otros compuestos metálicos reactivos o compuestos organometálicos y pueden emplearse para promover la adhesión entre el vidrio y un segundo recubrimiento protector, generalmente una cera, que protege el recipiente de vidrio de daños en la superficie, como abrasiones y arañazos

15 El recubrimiento de óxido metálico se aplica típicamente cuando el recipiente de vidrio emerge en un estado calentado y completamente formado de una máquina formadora de artículos de vidrio, es decir, en el "extremo caliente" del sistema. Los recipientes son transportados fuera de la máquina formadora por un transportador. En la superficie de los recipientes de vidrio existen temperaturas superiores a 400 grados centígrados, de modo que cuando se les aplica un compuesto inorgánico metálico u organometálico termodescomponible, el compuesto reacciona inmediatamente y se convierte en un recubrimiento de óxido metálico.

20 Es deseable inspeccionar periódicamente el recubrimiento durante el proceso de formación del vidrio. Los procedimientos de inspección de calidad actuales típicamente implican un proceso fuera de línea. Uno o más recipientes se retiran periódicamente de la línea de producción, después de que el recipiente se haya enfriado a menos de aproximadamente 100 grados centígrados (en el "extremo frío" del sistema). Luego se mide el grosor del recubrimiento de óxido metálico para determinar si el grosor se encuentra dentro de un intervalo de tolerancia de grosor. Si el grosor está fuera del intervalo de tolerancia, todos los recipientes producidos desde la última inspección exitosa hasta que se corrige el proceso de producción pueden destruirse. Por ejemplo, los recipientes de muestra pueden inspeccionarse cada 4 a 8 horas. Si se forman aproximadamente 400 a 500 botellas por minuto (o aproximadamente 25 000 a aproximadamente 55 000 botellas por hora), una deficiencia de recubrimiento identificada después de cuatro horas de producción puede resultar en una pérdida significativa de inventario.

Existen diversos métodos para detectar defectos en los objetos que se van a inspeccionar.

30 La patente de EE. UU. n.º 4.651.568 se dirige a un método y un aparato de inspección de botellas de vidrio que utiliza un pulso de onda acústica para detectar defectos.

La publicación de EE. UU. n.º 2013/0222575 se dirige a un aparato y un método de inspección de botellas de vidrio que detecta un defecto en la botella de vidrio mediante un proceso de formación de imágenes a través de una o varias unidades de iluminación y al menos una cámara.

35 La publicación de EE. UU. n.º 2014/0119634 se dirige a un método y un aparato de inspección de botellas de vidrio que produce imágenes diferenciales a partir de imágenes capturadas sucesivamente de la botella de vidrio mientras se hace rotar la botella, para determinar si la botella está libre de defectos.

40 La publicación de EE. UU. n.º 2009/0148031 se dirige a un aparato de inspección de superficies que escanea la superficie de un objeto de inspección con una luz de inspección, recibe luz reflejada de la superficie y genera una imagen bidimensional de la superficie del objeto basada en la luz reflejada. El aparato clasifica los píxeles de la imagen bidimensional en píxeles que tienen tonos correspondientes a defectos en la superficie del objeto y píxeles que tienen tonos que no corresponden a los defectos.

Existen diversos métodos para determinar el grosor de recubrimiento dispuesto sobre objetos.

45 La publicación de EE. UU. n.º 2004/0065841 se dirige a un proceso y un aparato para probar el grosor de recubrimiento en un recipiente de plástico haciendo pasar luz ultravioleta a través del recipiente a uno o más sensores ultravioletas y determinando el grosor sobre la base de la cantidad de luz ultravioleta que pasa a través del recipiente.

El documento WO 2004/065902 se dirige a un método y un aparato para la medición sin contacto de un recubrimiento sobre un sustrato tal como una botella, basado en la captura de la radiación ultravioleta reflejada desde el sustrato.

50 La patente de EE. UU. n.º 6.252.237 se dirige a un método para medir el grosor de un recubrimiento sobre una superficie recubierta, utilizando una distribución de estado sólido de elementos sensibles a la luz para medir la luz emitida por una composición de recubrimiento fluorescente y medir la intensidad de la composición de recubrimiento.

La patente de EE. UU. n.º 6.646.752 se dirige a un método y un aparato para medir grosores de capas de óxido de puerta ultrafinas, mediante el uso de tratamiento térmico y elipsometría.

La patente de EE. UU. n.º 5.208.645 se dirige a un método y un aparato para medir el grosor de un recubrimiento alrededor de un objeto cilíndrico, al irradiar el objeto con rayos de luz paralelos en una dirección perpendicular a la longitud del espécimen y medir los niveles máximos de la intensidad de la luz refractada desde el espécimen y recibida a través de un dispositivo de detección de imágenes.

- 5 La patente de EE. UU. n.º 6.515.293 se dirige a un método y un aparato para medir el grosor de una capa delgada formada en una oblea de semiconductor al irradiar luz sobre las células de la oblea y medir los valores de luminancia de la luz reflejada desde la oblea.

- 10 La patente de EE. UU. n.º 5.991.018 se dirige a un aparato para inspeccionar el grosor o la situación de deterioro de una capa de recubrimiento utilizando una unidad de captación de imágenes para recibir luz reflejada o luz de transmisión. La señal de captación de imagen se compara con una fórmula de referencia para determinar el grosor del recubrimiento. El aparato de inspección puede medir el grosor de la capa de recubrimiento en la línea de producción.

- 15 El documento US 2008/285840 A1 se dirige a un aparato de inspección de defectos que obtiene una señal de imagen en color de un objetivo de inspección. Sobre la base de una pluralidad de componentes de señal que forman esta señal de imagen en color, se obtiene una pluralidad de imágenes de análisis. La detección de defectos de un objetivo de inspección se implementa para cada una de la pluralidad de imágenes de análisis. Se detecta un diferencial para una nominación de defecto detectada para cada una de las imágenes de análisis y, por lo tanto, se determina si existe o no una pluralidad de defectos en posiciones de defecto sucesivas del objetivo de inspección.

- 20 Los métodos ópticos actuales de medición de grosores tienen dificultades para proporcionar una medición precisa de grosores de recubrimientos delgados (por ejemplo, menos de aproximadamente 20 nm), así como para identificar con precisión pequeños cambios en el grosor de recubrimiento, lo que puede proporcionar una indicación de que los grosores se acercan al límite de un intervalo de tolerancia aceptable (por ejemplo, menos de aproximadamente 5 nm). La determinación precisa del grosor de recubrimiento en el "extremo caliente" del sistema durante el proceso de producción en línea también es muy deseable, por ejemplo, para mantener el recubrimiento dentro del intervalo de tolerancia y reducir la pérdida de inventario.

25 **Compendio de la invención**

La invención se define en las reivindicaciones independientes. Realizaciones de la invención se exponen en las reivindicaciones dependientes.

- 30 Un aspecto de la presente invención se materializa en un aparato para medir el grosor de un recubrimiento sobre un objeto. El aparato incluye al menos una fuente de luz, un detector y un dispositivo de medición acoplado al detector. La al menos una fuente de luz se configura para dirigir la luz hacia el objeto en una ubicación predeterminada del objeto, de modo que una parte de la luz interactúe con el objeto. El detector se configura para capturar una imagen que tiene al menos dos canales de longitud de onda (por ejemplo, canales de color) producidos por la parte de la luz que interactúa con el objeto. El dispositivo de medición se configura para: determinar un cambio relativo entre cada uno de los al menos dos canales de longitud de onda sobre la base de un histograma de cada canal de longitud de onda de los al menos dos canales de longitud de onda, y determinar al menos uno de los grosores o la aceptabilidad del recubrimiento en el objeto sobre la base del cambio relativo determinado.

- 35 Otro aspecto de la presente invención se materializa en un método para medir el grosor de un recubrimiento sobre un objeto. La luz se dirige hacia el objeto en una ubicación predeterminada en el objeto de manera que una parte de la luz interactúa con el objeto. Se captura una imagen que tiene al menos dos canales de longitud de onda que es producida por la parte de la luz que interactúa con el objeto. Se determina un cambio relativo entre cada uno de los al menos dos canales de longitud de onda, sobre la base de un histograma de cada canal de los al menos dos canales de longitud de onda. Al menos uno del grosor o la aceptabilidad del recubrimiento sobre el objeto se determina sobre la base del cambio relativo determinado.

Descripción de los dibujos

- 45 La invención puede entenderse a partir de la siguiente descripción detallada cuando se lee en relación con el dibujo adjunto. Se enfatiza que, según la práctica común, diversas características del dibujo pueden no estar dibujadas a escala. Por el contrario, las dimensiones de las diversas características pueden ampliarse o reducirse arbitrariamente para mayor claridad. Además, en el dibujo, se utilizan referencias numéricas comunes para representar características similares. En el dibujo se incluyen las siguientes figuras:

- 50 la Figura 1 es un diagrama de bloques funcional de un ejemplo de aparato para medir el grosor de película de un recubrimiento dispuesto sobre un objeto, según un aspecto de la presente invención;

la Figura 2A es un diagrama de vista desde arriba de una botella de vidrio y algunos de los componentes del aparato mostrado en la Figura 1, que ilustra la medición de transmisión óptica de una botella de vidrio en movimiento, según un aspecto de la presente invención;

- 55 la Figura 2B es un diagrama de vista en sección transversal de la botella de vidrio y los componentes del aparato

mostrado en la Figura 2A, según un aspecto de la presente invención;

la Figura 2C es un diagrama de vista en sección transversal de la botella de vidrio y algunos de los componentes del aparato mostrado en la Figura 2A, que ilustra la medición de transmisión óptica simultánea en dos ubicaciones de medición en el objeto, según un aspecto de la presente invención;

- 5 la Figura 2D es un diagrama de vista en sección transversal de la botella de vidrio y algunos de los componentes del aparato mostrado en la Figura 1, que ilustra la medición de reflectancia óptica de una botella de vidrio en movimiento, según otro aspecto de la presente invención;

la Figura 3 es un diagrama de bloques funcional de un dispositivo de medición de grosor de película de ejemplo mostrado en la Figura 1, según un aspecto de la presente invención;

- 10 la Figura 4 es un diagrama de flujo de un método de ejemplo para medir el grosor de un recubrimiento sobre un objeto, según un aspecto de la presente invención;

las Figuras 5A y 5B son histogramas de ejemplo para imágenes de canales de color rojo, azul y verde para dos botellas con diferentes grosores de recubrimiento, respectivamente, según un aspecto de la presente invención;

- 15 las Figuras 6A y 6B son gráficos de barras de ejemplo de diferencia de color convencional y cambio de color relativo según la presente invención, respectivamente, calculados para conjuntos de botellas de pedernal con diferentes grosores de recubrimiento;

las Figuras 6C y 6D son gráficos de barras de ejemplo de la diferencia de color promedio y el cambio de color relativo promedio para diferentes grosores de recubrimiento sobre la base de los resultados mostrados en las respectivas Figuras 6A y 6B;

- 20 las Figuras 6E y 6F son ejemplos de gráficos de barras de la variación en la diferencia de color y la variación en el cambio de color relativo, respectivamente, cuando el grosor de recubrimiento aumenta o disminuye, según los resultados mostrados en las respectivas Figuras 6A y 6B;

- 25 las Figuras 6G y 6H son gráficos de barras de ejemplo de diferencia de color promedio convencional y cambio de color relativo promedio según la presente invención, respectivamente, calculados para conjuntos de botellas de color ámbar con diferentes grosores de recubrimiento;

las Figuras 6I y 6J son ejemplos de gráficos de barras de variación en la diferencia de color y variación en el cambio de color relativo, respectivamente, cuando el grosor de recubrimiento aumenta o disminuye, para conjuntos de botellas de color ámbar con diferentes grosores de recubrimiento;

- 30 la Figura 7 es un gráfico de ejemplo del cambio de color relativo en función del grosor de recubrimiento, según un aspecto de la presente invención;

la Figura 8A es un diagrama de vista desde arriba de una botella que ilustra una relación de ejemplo entre ubicaciones de medición para varias mediciones secuenciales y corrección de curvatura, según un aspecto de la presente invención;

la Figura 8B es una sección transversal de una botella que ilustra otro ejemplo de relación entre ubicaciones de medición para varias mediciones secuenciales y corrección de curvatura, según un aspecto de la presente invención;

- 35 la Figura 9 es un gráfico que ilustra histogramas de ejemplo y las respectivas curvas ajustadas por Gauss en función del valor de canal de color para imágenes de canal de color verde de botellas de cerveza con y sin defectos, que ilustra los efectos de los diversos defectos en los histogramas, según un aspecto de la presente invención;

- 40 las Figuras 10A, 10B y 10C son ejemplos de imágenes capturadas de canal rojo, azul verde (RGB) de una parte de una botella que no tiene defectos, tiene un arañazo y tiene partículas de suciedad, respectivamente, según un aspecto de la presente invención;

las Figuras 10D, 10E y 10F son ejemplos de histogramas de los respectivos canales de color verde, rojo y azul de las imágenes capturadas mostradas en las Figuras 10A, 10B y 10C, que ilustran cambios en cada histograma de canal de color debido a la presencia de defectos, según un aspecto de la presente invención;

- 45 las Figuras 11A y 11B son imágenes capturadas de ejemplo de una parte de una botella que no tiene defectos y una parte que tiene una línea de soldadura, respectivamente, según un aspecto de la presente invención;

las Figuras 11C y 11D son ejemplos de histogramas de canales de color de las respectivas imágenes mostradas en las Figuras 11A y 11B, que ilustran el efecto de las líneas de soldadura en los histogramas, según un aspecto de la presente invención; y

- 50 las Figuras 12A y 12B son gráficos de curvas gaussianas en función de la intensidad (valor de canal) ajustadas al promedio de los histogramas de canales de color mostrados en las respectivas Figuras 11C y 11D, según un aspecto

de la presente invención.

Descripción detallada

Aspectos de la invención se refieren a aparatos y métodos para medir el grosor de un recubrimiento de película dispuesto sobre un objeto. El aparato incluye al menos una fuente de luz, un detector y un dispositivo de medición acoplado al detector. La(s) fuente(s) de luz se configura(n) para dirigir la luz hacia el objeto en una ubicación predeterminada en el objeto de modo que una parte de la luz interactúe con el objeto. La parte de la luz que interactúa con el objeto se denomina en este documento luz de interacción. Como se usa en esta memoria, el término parte de la luz incluye toda la luz o menos de toda la luz (por ejemplo, un porcentaje). La(s) cámara(s) se configura(n) para capturar al menos una imagen que comprende al menos dos canales de longitud de onda (por ejemplo, canales de color) producidos por la luz que interactúa. En algunos ejemplos, los al menos dos canales incluyen tres canales que incluyen, por ejemplo, canales de color rojo, verde y azul. El dispositivo de medición determina un cambio relativo (p. ej., un cambio de color) entre cada uno de los al menos dos canales de longitud de onda, basándose en un histograma de cada canal de los al menos dos canales de longitud de onda. El dispositivo de medición determina al menos uno entre el grosor o la aceptabilidad del recubrimiento sobre el objeto sobre la base del cambio relativo determinado.

En algunos ejemplos, la parte de interacción de la luz incluye luz que pasa a través del objeto, de modo que la imagen capturada es una imagen de transmisión óptica. En algunos ejemplos, la parte de interacción de la luz incluye luz reflejada por el objeto, de modo que la imagen capturada es una imagen de reflectancia óptica. En algunos ejemplos, el aparato puede configurarse para capturar una imagen de transmisión óptica y/o una imagen de reflectancia óptica. Una imagen de transmisión óptica (de la luz que pasa a través del objeto) puede ser adecuada para ejemplos en los que el objeto es transparente a la luz (como el vidrio transparente). Una imagen de reflectancia óptica (de la luz reflejada por el objeto) puede ser adecuada para ejemplos en los que el objeto es al menos parcialmente absorbente de la luz (como el vidrio ámbar). La luz de la(s) fuente(s) de luz puede incluir luz visible, luz infrarroja (IR) o una combinación de las mismas. En algunos ejemplos, el aparato puede capturar imágenes múltiples correspondientes a varias ubicaciones en el objeto. Las imágenes múltiples pueden capturarse secuencialmente, simultáneamente o una combinación de las mismas. Por ejemplo, una sola fuente de luz puede capturar múltiples imágenes para varias ubicaciones a medida que el objeto se mueve más allá de la fuente de luz a una velocidad predeterminada. Como otro ejemplo, se pueden colocar múltiples fuentes de luz para dirigir la luz a varias ubicaciones en el objeto.

En algunos ejemplos, el dispositivo de medición puede tener en cuenta cualquier curvatura del objeto al determinar el cambio de color relativo. En algunos ejemplos, el dispositivo de medición puede comparar una característica de cada histograma de canal de color con un umbral de defecto y determinar el grosor de recubrimiento cuando la característica de cada histograma es menor que el umbral de defecto. El umbral de defecto puede corresponder a una indicación de suciedad, una indicación de arañazo y/o una indicación de línea de soldadura.

En algunos ejemplos, se puede presentar al menos entre el grosor, una indicación de que el grosor es aceptable (por ejemplo, dentro de un intervalo predeterminado), o una indicación de que el grosor no es aceptable (por ejemplo, está fuera del intervalo predeterminado). En algunos ejemplos, el aparato puede configurarse para formar parte de una campana de recubrimiento. En algunos ejemplos, el grosor determinado por el dispositivo de medición puede usarse para controlar un inyector de recubrimiento de la campana de recubrimiento. En consecuencia, en algunos ejemplos, el aparato se puede usar en el extremo caliente del proceso de formación de objetos (es decir, durante el tiempo en que la superficie del objeto todavía tiene una temperatura más alta antes de la aplicación de un período de enfriamiento lento), al disponer el recubrimiento sobre el objeto

La invención es aplicable al caso común de recubrir botellas utilizando mono(cloruro de butileno) (MBTC); sin embargo, el aparato descrito en este documento se aplica generalmente al recubrimiento de vidrio con películas de óxido de estaño, óxido de titanio u otro óxido de un solo metal, o con una mezcla de los mismos, utilizando compuestos organometálicos, haluros metálicos u otros compuestos adecuados como precursor químico del recubrimiento.

La invención es aplicable a vidrio transparente (es decir, transparente a la luz visible) y vidrio coloreado (es decir, que absorbe parcialmente la luz) y objetos que no son de vidrio, como los plásticos. Ejemplos no limitantes de vidrio coloreado incluyen vidrio de color verde y vidrio de color ámbar. Aunque los ejemplos descritos en este documento se refieren a botellas de vidrio, el aparato es aplicable en general a cualquier objeto de vidrio capaz de recubrirse con una película. El objeto puede ser hueco (como una botella) o sólido. El objeto puede ser simétrico o asimétrico.

Un aparato ejemplar se describe con referencia a las figuras individuales. La Figura 1 es un diagrama de bloques funcional que ilustra el aparato 100 para medir el grosor de una película de un recubrimiento sobre el objeto 120. El aparato 100 incluye al menos una fuente de luz 102, un detector de posición 104, al menos un detector 106, un controlador 108, un dispositivo de medición de grosor de película 110 (también denominado en el presente documento como dispositivo de medición 110), una pantalla 112, una interfaz de usuario 114 y un almacenamiento 116. Aunque no se muestra en la Figura 1, el controlador 108 también se puede acoplar al dispositivo de medición 110 (por ejemplo, como se muestra en la Figura 2A). Los controladores 108, las pantallas 112, las interfaces de usuario 114 y el almacenamiento 116 adecuados serán entendidos por un experto en la técnica a partir de la descripción del presente documento. El objeto 120 puede disponerse en la cinta transportadora 122 y puede moverse más allá de la(s) fuente(s) de luz 102 a una velocidad predeterminada en la dirección 124. Como se ha discutido anteriormente, el objeto 120

puede ser transparente y/o de color. El objeto 120 puede incluir un recubrimiento dispuesto sobre él, cuyo grosor de película puede medirse con el aparato 100.

La(s) fuente(s) de luz 102 pueden configurarse para generar al menos un haz de luz UV, visible y/o IR. Los haces de luz de la(s) fuente(s) de luz 102 se pueden enfocar y/o dirigir para que interactúen con el objeto 120 a través de componentes ópticos adecuados (no mostrados), como lentes, divisores de haz, espejos, etc. En algunos ejemplos, el haz de luz se puede dirigir desde la(s) fuente(s) de luz 102 para pasar a través del objeto 120, como el haz de luz de medición 204 que se muestra en las Figuras 2A y 2B. El ángulo de incidencia puede variar desde una superficie de botella perpendicular (cero grados) hasta 80 grados. En algunos ejemplos, el haz de luz de la(s) fuente(s) de luz 102 puede configurarse para ser reflejado por el objeto 120, como el haz de luz reflejado 214 mostrado en la Figura 2D. Este diagrama ilustra la incidencia de cero grados. Sin embargo, el ángulo de incidencia real puede variar de cero a 80 grados. El haz de luz de medición 204 (o el haz de luz de medición 210 mostrado en la Figura 2D) puede configurarse para interactuar con el objeto 120 en la ubicación de medición predeterminada 205 (Figura 2B, o la ubicación 215 mostrada en la Figura 2D) en el objeto 120.

En algunos ejemplos, la(s) fuente(s) de luz 102 pueden generar un haz de luz de detección de posición 202 además del haz de luz de medición 204 (Figura 2A). El haz de luz de detección de posición 202 puede configurarse para interactuar con el objeto 120 en la ubicación de detección inicial 203 (Figura 2B) en el objeto 120. La detección del haz de luz de detección 202 en la ubicación de detección inicial 203 puede ser utilizada por el controlador 108 para controlar la captura de la imagen 208 (Figura 2A) en la ubicación de medición predeterminada 205 en el objeto 120.

El detector de posición 104 puede configurarse para detectar la interacción del haz de luz de detección 202 con el objeto 120 en la ubicación de detección inicial 203 en el objeto 120 (por ejemplo, el borde del recipiente), al detectar un evento óptico (es decir, la luz del haz de luz 202) en la ubicación de detección 203. El detector de posición 104 puede incluir cualquier sensor de detección de posición óptico adecuado, como, entre otros, fotodetectores y diodos emisores de luz (ledes). El detector de posición 104 puede generar la señal de detección 206 (Figura 2A) en respuesta a detectar que el objeto 120 está en la ubicación de detección inicial 203. En algunos ejemplos, el detector de posición 104 puede generar la señal de detección 206 cuando el objeto 120 está en la ubicación de detección inicial 203 (o después un retraso adecuado para obtener la medición del recipiente en las ubicaciones deseadas, véanse las Figuras 8A y 8B). En algunos ejemplos, el detector de posición 104 puede generar una señal de detección positiva (o alta) 206 cuando el objeto está en la ubicación de detección inicial 203 y una señal de detección negativa (cero o baja) 206 en caso contrario.

El detector 106 se configura para capturar la imagen 208 que tiene al menos dos canales de longitud de onda (por ejemplo, al menos dos canales de color). La imagen 208 se puede producir a partir de la interacción del haz de luz de medición 204 (210) con el objeto (recubierto) 120 en la ubicación de medición predeterminada 205 (o la ubicación 215 en la Figura 2D). Los canales pueden incluir luz visible y/o luz IR. En un ejemplo, los canales pueden incluir tres canales de color, incluidos los canales de color rojo, verde y azul. El detector 106 puede incluir, sin estar limitado a esto, una cámara, un detector de dispositivo acoplado por carga (CCD) o un detector de semiconductor de óxido de metal complementario (CMOS). En algunos ejemplos, el detector 106 puede incluir un detector monocromático que tiene al menos dos filtros de color diferentes dispuestos sobre él, para obtener al menos dos canales de color en la imagen 208. En algunos ejemplos, el detector 106 puede configurarse para capturar simultáneamente varias imágenes correspondientes a varias ubicaciones de medición (p. ej., ubicaciones 205-1, 205-2 mostradas en la Figura 2C) en el objeto 120 (p. ej., al asignar subconjuntos de píxeles del detector 106 a diferentes ubicaciones de medición). En algunos ejemplos, se pueden usar dos o más detectores 106 para capturar múltiples imágenes simultáneamente (por ejemplo, como se muestra con los detectores 106-1, 106-2 en la Figura 2C).

El controlador 108 puede configurarse para controlar el funcionamiento de una o más fuentes de luz 102, el detector de posición 104, el detector(es) 106, el dispositivo de medición 110, la pantalla 112, al interfaz de usuario 114 y el almacenamiento 116. En algunos ejemplos, el controlador 108 puede controlar la captura de imagen(es) 208 desde la(s) cámara(s) 106 sobre la base de la señal de detección 206 del detector de posición 104. El controlador 110 también puede controlar el almacenamiento (en el almacenamiento 116) de valores para la medición de grosor (por ejemplo, recibidos a través de la interfaz de usuario 114) y resultados de medición de grosor. En algunos ejemplos, el controlador 108 puede controlar el inyector 128 de la campana de recubrimiento 126 sobre la base de los resultados de medición de grosor determinados por el dispositivo de medición 110. El controlador 108 puede ser un procesador de señal digital convencional, un circuito lógico o un microprocesador. Un experto en la técnica entenderá a partir de la presente descripción que una o más de las funciones del dispositivo de medición 110 pueden implementarse en el software y pueden ser realizadas por el controlador 108.

El dispositivo de medición 110 puede configurarse para recibir la(s) imagen(es) 208 capturada(s) por el(los) detector(es) 106 y para determinar el grosor del recubrimiento sobre el objeto 120. Como se ha discutido anteriormente, cada imagen capturada 208 incluye al menos dos canales. La imagen 208 puede incluir una imagen de transmisión óptica (p. ej., capturada como se muestra en la Figura 2B) o una imagen de reflectancia óptica (p. ej., capturada como se muestra en la Figura 2D). Para cada imagen recibida, el dispositivo de medición 110 determina un cambio relativo (por ejemplo, un cambio de color) entre cada uno de los canales. El cambio relativo se determina sobre la base de un histograma de cada canal.

Haciendo referencia a las Figuras 5A y 5B, se muestran gráficos de ejemplo de histogramas en función de la intensidad

para dos grosores de recubrimiento diferentes en SnO₂ botellas de vidrio de pedernal recubiertas. Cada gráfico incluye un histograma para los canales de color rojo, azul y verde (colectivamente denominados histogramas RGB) de una imagen de transmisión óptica capturada para la botella respectiva. La Figura 5A ilustra histogramas RGB para una botella con un grosor de recubrimiento de aproximadamente 3 nm. La Figura 5B ilustra histogramas RGB para una botella con un grosor de recubrimiento de aproximadamente 14 nm. Las imágenes de transmisión óptica de cada botella se adquirieron con un microscopio óptico ME600 y una cámara CCD Nanosight DSU-1, ambos fabricados por Nikon Corporation (Tokio, Japón).

Como se muestra en la Figura 5A, cuando el recubrimiento es más delgado (es decir, aproximadamente 3 nm), los máximos de los histogramas rojo, verde y azul se superponen sustancialmente (es decir, se alinean) entre sí. Por el contrario, como se muestra en la Figura 5B, cuando el recubrimiento es más grueso (es decir, aproximadamente 14 nm), las posiciones relativas del histograma rojo (curva 502-R), el histograma verde (curva 502-G) y el histograma azul (curva 502-B) cambian.

Así, como se muestra en las Figuras 5A y 5B, los cambios en las posiciones relativas del centroide (o máximos) de los histogramas del canal de color indican el grosor de película. Volviendo a la Figura 1, el dispositivo de medición 110 determina un cambio de color relativo entre los canales de color basándose en el centroide (o máximos) de cada histograma de canal de color. El dispositivo de medición 110 puede entonces determinar el grosor de recubrimiento basándose en el cambio de color relativo. Por ejemplo, el dispositivo de medición puede usar una relación predeterminada 312 (Figura 3) entre el cambio de color relativo y el grosor de recubrimiento, tal como se muestra en la Figura 7. El dispositivo de medición 110 se describe más adelante con respecto a la Figura 3.

La pantalla 112 puede configurarse para mostrar una o más imágenes capturadas por el (los) detector(es) 106, histogramas, cambio relativo y/o resultados de medición del grosor (por el dispositivo de medición 110). Los resultados de medición de grosor pueden incluir el grosor determinado por el dispositivo de medición 110, una indicación de que el grosor está dentro de un intervalo de grosor predeterminado (por ejemplo, dentro de un intervalo aceptable de valores de grosor) y/o una indicación de que el grosor está fuera del intervalo de grosor predeterminado (por ejemplo, menor o mayor que el intervalo aceptable de valores de grosor). Se contempla que la pantalla 112 pueda incluir cualquier pantalla capaz de presentar información que incluya información textual y/o gráfica. En algunos ejemplos, el aparato 100 también puede indicar los resultados de medición de grosor mediante una indicación audible y/o vibratoria (p. ej., cuando los resultados de grosor están fuera del intervalo de grosor predeterminado).

La interfaz de usuario 114 puede usarse para iniciar las mediciones de grosor de recubrimiento. La interfaz de usuario 114 se puede usar además para seleccionar parámetros para la(s) fuente(s) de luz 102, detector(es) de posición 104, detector(es) 106, dispositivo de medición 110, pantalla 112 y/o para valores que se almacenarán en el almacenamiento 116. En algunos ejemplos, la interfaz de usuario 114 puede usarse para controlar el inyector 128 de la campana de recubrimiento 126 (por ejemplo, sobre la base de los resultados de la medición del grosor mostrado en la pantalla 112). La interfaz de usuario 114 puede incluir cualquier interfaz adecuada para iniciar mediciones, indicar almacenamiento, análisis y/o visualización de cantidades. La interfaz de usuario 114 puede incluir, por ejemplo, un dispositivo señalador, un teclado y/o un dispositivo de visualización. Aunque la interfaz de usuario 114 y la pantalla 112 se ilustran como dispositivos separados, se entiende que las funciones de la interfaz de usuario 114 y la pantalla 112 pueden combinarse en un solo dispositivo.

El almacenamiento 116 puede almacenar la señal de detección 206 (Figura 2A) del detector de posición 104; parámetros para el dispositivo de medición 110 (tales como valores de corrección de curvatura predeterminados opcionales 310 (Figura 3), relación predeterminada 312 y/o umbral(es) de defecto predeterminado(s) 316); imagen(es) 208 capturada(s) por el(los) detector(es) 106; y/o histogramas y/o resultados de análisis del dispositivo de medición 110. El almacenamiento 116 puede ser una memoria, un disco magnético, un disco óptico, un disco duro, una base de datos o esencialmente cualquier dispositivo tangible no transitorio local o remoto capaz de almacenar datos.

El aparato 100 puede configurarse como parte de la campana de recubrimiento 126 que tiene al menos un inyector 128. Por ejemplo, la(s) fuente(s) de luz 102, el detector de posición 104 y la(s) cámara(s) 106 pueden colocarse dentro de la campana de recubrimiento 126 aguas abajo del inyector(es) 128 (es decir, después de que la botella 120 se recubre con el compuesto de recubrimiento a través del (de los) inyector(es) 128).

La campana de recubrimiento 126 se puede usar para aplicar el recubrimiento de película protectora a recipientes de vidrio calientes a través de inyector(es) 128. La campana de recubrimiento 126 puede aislar los recipientes de vidrio de las condiciones ambientales y puede proporcionar una atmósfera de operación de recubrimiento controlada. La campana de recubrimiento 126 puede incluir un sistema de escape (no mostrado) que captura la mayor parte del compuesto de recubrimiento arrastrado por el aire que no se adhiere a los recipientes. El sistema de escape puede minimizar la oportunidad de que el compuesto de recubrimiento ataque los componentes del edificio. La campana de recubrimiento 126 puede incluir componentes tales como sopladores, ranuras de soplado y/o ranuras de succión para producir uno o más bucles de aire a alta velocidad, de modo que el compuesto de recubrimiento sea distribuido por el (los) inyector(es) 128, sea arrastrado dentro de una corriente de aire y apropiadamente dirigido al objeto 120 a recubrir. Una campana de recubrimiento adecuada para botellas se describe en la solicitud de patente n.º PCT/US2013/037520, cuyo contenido se incorpora por referencia en este documento en su totalidad.

Un experto en la técnica entenderá a partir de la presente descripción que el dispositivo de medición 110 se puede ubicar lejos de la(s) cámara(s) 106, como para mediciones remotas. El dispositivo de medición 110 se puede conectar a la(s) cámara(s) 106 mediante cualquier conexión alámbrica o inalámbrica adecuada.

5 Se contempla que el aparato 100 pueda configurarse para conectarse a una red de información global, por ejemplo, internet, (no se muestra) de modo que las imágenes capturadas, los histogramas y/o los resultados del análisis de grosor también puedan transmitirse a una ubicación remota para su posterior procesamiento y/o almacenamiento.

10 Con referencia a continuación a las Figuras 2A-2D, se describe la captura de una o más imágenes a través del aparato 100. En particular, la Figura 2A es un diagrama de vista desde arriba del objeto (recubierto) 120 y algunos de los componentes del aparato 100 para capturar una imagen de transmisión óptica; la Figura 2B es un diagrama de vista en sección transversal del objeto 120 mostrado en la Figura 2A que ilustra la detección de posición y la captura de imágenes para una sola ubicación a través de la transmisión de luz a través del objeto 120; la Figura 2C es un diagrama en sección transversal del objeto 120 mostrado en la Figura 2A para captura simultánea de dos imágenes de transmisión óptica; y la Figura 2D es un diagrama de vista en sección transversal del objeto (recubierto) 120 y algunos de los componentes del aparato 100 para capturar una imagen de reflectancia óptica (a través del reflejo de la luz del objeto 120). En las Figuras 2A-2D, la(s) fuente(s) de luz 102 están en posiciones fijas, y el objeto 120 se mueve en la cinta transportadora 122 a una velocidad predeterminada pasando la(s) fuente(s) de luz 102 en la dirección indicada por la flecha 124.

20 Haciendo referencia a las Figuras 2A y 2B, una o más fuentes de luz 102 pueden configurarse para dirigir el haz de luz de detección de posición 202 y el haz de luz de medición 204 a través del objeto 120, de modo que el haz 202 y el haz 204 inciden sobre el objeto 120 en la ubicación de detección inicial respectiva 203 y la ubicación de medición predeterminada 205. Aunque la Figura 2B ilustra que la primera fuente de luz 102-1 produce el haz 202 y la segunda fuente de luz 102-2 produce el haz 204, se entiende que una sola fuente de luz 102 (tal como se muestra en la Figura 2A) puede configurarse para emitir ambos haces 202 y 204 (por ejemplo, a través de un divisor de haz adecuado y óptica de dirección).

25 En funcionamiento, cuando el objeto 120 se mueve sobre la cinta transportadora 122, el objeto 120 pasa por la(s) fuente(s) de luz 102 (así como por el detector de posición 104 y la cámara 106). Cuando el objeto 120 alcanza la ubicación de detección inicial 203, el detector de posición 104 detecta el haz de luz de detección de posición 202, lo que hace que el detector de posición 104 genere la señal de detección 206. El detector de posición 104 envía la señal de detección 206 al controlador 108.

30 El controlador 108, en respuesta a la señal de detección 206, hace que el detector 106 capture la imagen de transmisión óptica 208 en la ubicación de medición predeterminada 205. La imagen de transmisión óptica 208 es producida por el haz de luz de medición 204 que incide sobre el objeto 120 en la ubicación de medición predeterminada 205 que se transmite a través del objeto 120 y posteriormente recibido por el detector 106.

35 El detector 106 puede enviar la imagen de transmisión óptica capturada 208 al dispositivo de medición 110, por ejemplo, en respuesta al controlador 108. El dispositivo de medición 110, en respuesta al controlador 108, puede determinar el grosor del recubrimiento sobre el objeto 120 a partir del análisis de la imagen capturada.

En algunos ejemplos, el controlador 108 puede usar imágenes ópticas (ya sea de transmisión o de reflectancia) para determinar una posición del objeto 120 (por ejemplo, perpendicular tanto al eje longitudinal del objeto como a su dirección de desplazamiento).

40 El controlador 108 puede hacer que el detector 106 capture secuencialmente varias imágenes a medida que el objeto 120 pasa por la(s) fuente(s) de luz 102 (como en las ubicaciones de medición predeterminadas Y0-Y5 mostradas en la Figura 8), una vez que el objeto 108 se detecta en la ubicación de detección inicial 203. Por ejemplo, dada la velocidad predeterminada del objeto 120 y las dimensiones predeterminadas del objeto 120, el controlador 108 puede hacer que el detector 106 capture varias imágenes secuenciales en la dirección horizontal (es decir, en una dirección opuesta a la flecha 124).

45 Haciendo referencia a la Figura 2C, la(s) fuente(s) de luz 102 pueden dirigir múltiples haces de luz de medición 204 (p. ej., haces 204-1 y 204-2) a las ubicaciones respectivas 205-1, 205-2 a lo largo de una dirección vertical del objeto 120, para capturar las varias imágenes de transmisión óptica simultánea a través del (de los) detector(es) 106. Aunque la Figura 2C ilustra dos fuentes de luz 102-2 y 102-3 que generan respectivos haces de luz de medición 204-1, 204-2, se entiende que una única fuente de luz 102, con componentes ópticos apropiados, puede producir haces de luz de medición 204-1, 204 -2, así como el haz de luz de detección de posición 202. Aunque se ilustran dos detectores 106-1, 106-2 capturando imágenes para ubicaciones de medición respectivas 205-1, 205-2, se entiende que un solo detector 106 puede configurarse para capturar varias imágenes simultáneas, mediante la partición apropiada de los píxeles para que correspondan a las ubicaciones respectivas 205-1, 205-2.

55 Se entiende que, en algunos ejemplos, el o los detectores 106 pueden configurarse para capturar varias imágenes simultáneas (como se muestra en la Figura 2C) así como imágenes secuenciales (como se describe con respecto a la Figura 2B).

Aunque las Figuras 2A-2C describen la captura de imágenes de transmisión óptica, el aparato 100 también puede configurarse para capturar imágenes de reflectancia óptica, como se muestra en la Figura 2D. Como se muestra en la Figura 2D, en funcionamiento, la fuente de luz 102-2 (o la fuente de luz única 102-1 con componentes ópticos apropiados) puede generar un haz de luz de medición 210. El haz de luz de medición 210 puede dirigirse para que incida sobre el objeto 120 en una ubicación de medición predeterminada 215. En al menos una parte del haz de luz de medición 210 puede ser reflejada por el objeto 120, formando un haz de luz reflejado 214. El haz de luz reflejado 214 se dirige a través del divisor de haz 212 al detector 106, de modo que el detector 106 captura una imagen de reflectancia óptica. La detección del haz de luz de detección de posición 202 a través del detector de posición 104 y la captura de imágenes de reflectancia óptica por el detector 106 en respuesta al controlador 108 es similar a la descripción anterior con respecto a las Figuras 2A y 2B. De forma similar a las Figuras 2A-2C, la configuración mostrada en la Figura 2D, secuencialmente, simultáneamente o una combinación de los mismos. La disposición mostrada en la Figura 2D puede ser adecuada para el objeto 120 de vidrio de color (como el vidrio de color ámbar), donde una o más longitudes de onda de luz pueden absorberse según el color, en lugar de transmitirse a través del objeto 120.

Haciendo referencia a continuación a la Figura 3, se describe el dispositivo de medición de grosor de película 110. Aunque esta realización y las realizaciones que siguen se dirigen a determinar el grosor de película basándose en la captura de múltiples canales de color y la determinación del cambio de color relativo, se entenderá que, en los ejemplos que no sean según la invención reivindicada, también se pueden usar canales de longitud de onda distintos a los canales de color y cambio de longitud de onda relativa. El dispositivo de medición 110 puede incluir un generador de histogramas 302, un analizador de cambio 304, una calculadora de grosores 306 y un detector de defectos opcional 308. El dispositivo de medición 110 puede recibir la imagen 208 del detector 106 y determinar la indicación de grosor 314. El dispositivo de medición 110 puede ser un procesador de señal digital convencional, circuito lógico o un microprocesador. Aunque la Figura 3 ilustra una única imagen 208, se entiende que el dispositivo de medición 110 puede recibir una pluralidad de imágenes 208 del (de los) detector(es) 106, capturadas secuencial y/o simultáneamente, como se describe anteriormente con respecto a las Figuras 2A-2D. En la Figura 3, la imagen 208 puede ser una imagen de transmisión óptica (como se describe en la Figura 2B) o una imagen de reflectancia óptica (como se describe en la Figura 2D).

El generador de histogramas 302 puede configurarse para recibir la imagen 208 del detector 106 (o del almacenamiento 116). La imagen 208 puede tener N canales de color (CC), donde N es mayor o igual a 2. El generador de histograma 302 puede generar un histograma de canal de color para cada canal de color de la imagen 208. Por ejemplo, si la imagen 208 incluye canales de color rojo, azul y verde, el generador de histogramas 302 puede generar histogramas de canales rojo, azul y verde.

Un histograma de canal de color puede definirse como una representación gráfica de la distribución de píxeles de canal de color (por ejemplo, píxeles rojos, verdes o azules) en función de su valor de color entero. Para cada canal de color, los píxeles con valores adyacentes (por ejemplo, píxeles con valores inferiores a 4, valores de píxeles superiores a 4 pero inferiores a 8, etc.) pueden sumarse en contenedores y luego mapearse como una función del valor de color dividido por el número de píxeles en cada contenedor. En los histogramas de ejemplo mostrados en esta memoria, la anchura del contenedor es de un píxel. En general, la anchura del intervalo del histograma puede ser mayor o igual a un píxel. En los ejemplos descritos en esta memoria, la imagen 208 es una imagen RGB que tiene canales de color rojo, verde y azul (es decir, $N=3$). Se entiende que la imagen RGB representa un ejemplo de la imagen 208 y que la imagen 208 puede incluir cualquier número adecuado de canales de color (con $N \geq 2$) y cualquier longitud de onda de luz visible y/o luz IR.

Cuando la imagen 208 se graba con el detector 106, la intensidad de la luz y la distribución espectral típicamente diferirán de un píxel a otro. Un método para medir un valor de canal rojo promedio sería sumar todos los valores de píxeles rojos y dividirlos por el número de píxeles. Se puede repetir un proceso similar para píxeles verdes y píxeles azules. Esta sería la medición de color de una cámara CCD o CMOS equivalente a una medición de color espectrofotométrica. En una medición de color espectrofotométrica, la intensidad de luz total se suma (y se puede multiplicar con una función de sensibilidad humana) en todas las longitudes de onda. El proceso de cálculo de promedios descrito anteriormente para una imagen de cámara CCD o CMOS (como la imagen 208) es equivalente a calcular el centroide de un histograma siempre que la anchura del contenedor sea de 1 píxel. El método de promedio (centroide) trata la imagen completa como un píxel grande. La información contenida en la forma en que se distribuyen los píxeles puede quedar sin utilizar.

Una distinción importante en la tecnología de medición del color es la que existe entre la medición de una propiedad física relacionada con el color, por ejemplo, la intensidad de la luz en función de la longitud de onda reflejada en una superficie, y la forma en que un observador humano percibe los colores. En la tecnología del color, el término color típicamente se relaciona con la percepción del color por parte del observador humano.

Históricamente, para medir la percepción del color, se pedía a los probadores de color que hicieran coincidir el color de una luz de prueba con el de una luz correspondiente. La luz a juego era una superposición de tres luces individuales. Cada una de las tres luces tenía una distribución de longitud de onda muy estrecha y bien definida, al igual que la luz de prueba. Se pidió a los probadores de color que ajustaran las intensidades de las tres luces coincidentes hasta que el color de la luz de prueba coincidiera exactamente con el de la luz coincidente. La prueba condujo a la generación de conocidas funciones de coincidencia de colores ($r(\lambda)$, $g(\lambda)$ y $b(\lambda)$) para la luz roja, azul y verde. Las tres fuentes de

luz fueron seleccionadas sobre la base del ojo humano. El ojo humano sano tiene tres tipos de células receptoras para la visión del color, todas las cuales tienen diferentes sensibilidades a la luz en función de la longitud de onda.

Hay muchos estándares normativos diferentes para las mediciones de color. Un estándar de medición de color bien conocido es el sistema RGB en el que cada color está representado por tres valores numéricos para rojo (R), verde (G) y azul (B). Para calcular valores RGB a partir de datos espectrofotométricos, la intensidad de la luz transmitida o reflejada puede medirse en función de la longitud de onda utilizando un espectrofotómetro adecuado. Luego, la intensidad ($I(\lambda)$) se multiplica con cada una de las tres funciones de combinación de colores y se integra en todas las longitudes de onda del espectro visible para generar valores numéricos para R, G y B (mostrado en las ecuaciones respectivas 1-3 a continuación). En la práctica, la "integración" es una suma, porque las intensidades y las funciones de combinación de colores se miden en intervalos discretos.

$$\int I(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda = R$$

(1)

$$\int I(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda = G$$

(2)

$$\int I(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda = B$$

(3)

Otros sistemas de color típicos, como los sistemas XYZ o Lab, también utilizan tres componentes para indicar un color (X, Y y Z o L, a y b, respectivamente). Cualquiera de los tres componentes de un sistema puede transformarse en otro sistema de color por medio de una matriz de transformación estandarizada. Esto es equivalente a una transformación de coordenadas de un espacio de color "vectorial" a otro. También se pueden usar otros conceptos del cálculo vectorial y la geometría para medir propiedades de interés en los espacios de color (por ejemplo, un cambio de color como un cambio en la longitud de un "vector" de color) o para demostrar propiedades y relaciones no obvias dentro y entre ellos.

Las cámaras CMOS o CCD (como el detector 106) utilizan distribuciones de semiconductores, circuitos electrónicos y otros componentes de dispositivo, así como algoritmos de software, para generar valores numéricos para R, G y B en cada píxel de una imagen que capturan. Los valores R, G y B se representan como números enteros, que van desde 0 hasta un múltiplo de 2 (2^L , siendo L un número entero.) Estos valores se escriben en una matriz para cada canal de color (R, G y B) en lo que se denomina una imagen de color verdadero. El número de columnas y filas en las matrices R, G y B corresponde al número de píxeles del detector 106 a menos que se realice un procesamiento de imagen adicional o una división de píxeles (es decir, la combinación de varios píxeles en un píxel más grande).

En las cámaras CMOS/CCD, el intervalo utilizable de valores depende de cuántas cargas eléctricas generan los elementos semiconductores cuando se exponen a la luz, el nivel de ruido y la conversión de analógico a digital. Típicamente, las imágenes se digitalizan de tal manera que el intervalo de valores para cada canal de color (R, G y B) es $256 = 2^8$, u 8 bits, por lo que hay 256 tonos de rojo, verde y azul. El número de cargas generadas es una medida indirecta de la intensidad de la luz. Se puede usar una combinación de filtros de color y algoritmos de software para determinar cuántas cargas crean las bandas de longitud de onda en las regiones roja, verde y azul en cada píxel. Menos cargas corresponden a una menor intensidad de luz. Una intensidad de luz más baja para la luz roja puede resultar en un valor numérico más bajo para el valor R. Lo mismo es cierto para los valores G y B.

El dispositivo de medición 110 usa valores de intensidad de luz capturados por el detector 106, en oposición a la percepción del color, para determinar el grosor de película de un compuesto de recubrimiento sobre el objeto 120. Por lo tanto, el generador de histogramas 302 usa los valores de intensidad de luz para cada canal de color en la imagen 208 para generar un histograma de canal de color para cada canal de color. Cada histograma de canal de color puede, por ejemplo, proporcionarse al analizador de cambio de color 304, al detector de defectos opcional 308, a la pantalla 112 (Figura 1) y/o al almacenamiento 116.

El analizador de cambio de color 304 puede configurarse para recibir un histograma de canal de color para cada canal de color, según lo determine el generador de histograma 302. Para cada histograma de canal de color, el analizador de cambio de color puede determinar un centroide del histograma respectivo. El centroide de cada histograma de canal de color puede ser utilizado por el analizador de cambio de color 304 para determinar un cambio de color relativo entre cada uno de los canales de color recibidos en la imagen 208. La determinación del cambio de color relativo se describe más adelante.

En las técnicas de medición de color convencionales, los cambios de color se miden mediante la integración de datos de intensidad de luz espectrofotométrica en un intervalo de longitudes de onda o, cuando se usan cámaras CCD/CMOS, sumando las respuestas de color de cada píxel de una cámara y determinando un valor de respuesta de color promedio. Para las mediciones de color RGB, esto está relacionado con determinar el centroide de los histogramas de color para los canales de color R, G y B y normalizar el resultado. Una diferencia de color convencional ΔE entre dos imágenes con valores RGB de R_1, G_1, B_1 y R_2, G_2, B_2 y $\Delta R = R_2 - R_1$, $\Delta G = G_2 - G_1$, y $\Delta B = B_2 - B_1$ se calcula, según la ecuación (4), como:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta R^2 + \Delta G^2 + \Delta B^2}$$

(4)

donde ΔE puede interpretarse como el cambio en la longitud de un vector de color.

Por el contrario, el analizador de cambio de color 304 determina las posiciones de centroide (por ejemplo, C_r, C_g , y C_b) de histogramas de canal rojo, verde y azul respectivos para la imagen 208 (determinados por el generador de histogramas 302). La posición de centroide representa la posición media aritmética de todos los puntos en el histograma. La media puede ser diferente de una posición de valor máximo del histograma.

El analizador de cambio de color 304 determina entonces un cambio de posición relativo entre las posiciones de centroide de todos los canales de color (es decir, $C_r - C_g, C_r - C_b$, y $C_g - C_b$). El cambio de color relativo ($\Delta E_{\text{CambioColor}}$) entre cada uno de los canales de color puede determinarse elevando al cuadrado todos los cambios de posición relativos y sumando el resultado. Finalmente, se determina la raíz cuadrada de las sumas, formando una raíz cuadrada de una suma de diferencias al cuadrado entre cada posición del centroide. El cambio de color relativo $\Delta E_{\text{CambioColor}}$ determinado por el analizador de cambio de color 304 se muestra en la ecuación (5) como:

$$\Delta E_{\text{CambiosColor}} = \sqrt{(C_r - C_g)^2 + (C_r - C_b)^2 + (C_g - C_b)^2}$$

(5)

En algunos ejemplos, el cambio de color relativo se puede determinar como un porcentaje, multiplicando $\Delta E_{\text{CambioColor}}$ (ecuación 5) por 100. El analizador de cambio de color 304 puede, por ejemplo, proporcionar el cambio de color relativo $\Delta E_{\text{CambioColor}}$ a la calculadora de grosor 306, la pantalla 112 (Figura 1) y/o al almacenamiento 116.

Con referencia a continuación a las Figuras 6A-6J, se muestran comparaciones de ejemplo de diferencia de color convencional ΔE (ecuación 4) y cambio de color relativo $\Delta E_{\text{CambioColor}}$ (ecuación 5). Las comparaciones se determinan a partir de imágenes RGB de botellas de vidrio de pedernal y de vidrio ámbar con diferentes grosores de recubrimiento. En particular, las Figuras 6A y 6B son gráficos de barras de ejemplo de diferencia de color y cambio de color relativo, respectivamente, calculados para conjuntos de botellas de pedernal con diferentes grosores de recubrimiento; las Figuras 6C y 6D son gráficos de barras de ejemplo de la diferencia de color promedio y el cambio de color relativo promedio para diferentes grosores de recubrimiento sobre la base de los resultados mostrados en las respectivas Figuras 6A y 6B; las Figuras 6E y 6F son ejemplos de gráficos de barras de la variación en la diferencia de color y la variación en el cambio de color relativo, respectivamente, cuando el grosor de recubrimiento aumenta o disminuye, según los resultados mostrados en las respectivas Figuras 6A y 6B; las Figuras 6G y 6H son gráficos de barras de ejemplo de diferencia de color promedio y cambio de color relativo promedio, respectivamente, calculados para conjuntos de botellas de color ámbar con diferentes grosores de recubrimiento; y las Figuras 6I y 6J son ejemplos de gráficos de barras de variación en la diferencia de color y variación en el cambio de color relativo, respectivamente, cuando el grosor de recubrimiento aumenta o disminuye, para conjuntos de botellas de color ámbar con diferentes grosores de recubrimiento. En general, las Figuras 6A-6J ilustran que el cambio de color relativo (ecuación 5) (usando un cambio de posición de centroide relativo) es más sensible al grosor de película y mejora la repetibilidad en comparación con la diferencia de color (ecuación 4) (usando una posición de centroide absoluta).

Las Figuras 6A, 6C y 6E ilustran los resultados de las mediciones de color ΔE (ecuación 4) con conjuntos de botellas de vidrio de pedernal (F). Las Figuras 6B, 6D y 6F ilustran los resultados de mediciones de color de $\Delta E_{\text{CambioColor}}$ (ecuación 5) con los mismos conjuntos de botellas de vidrio de pedernal (F). Todas las botellas habían sido recubiertas con SnO_2 . Cada conjunto consistía en cuatro botellas con aproximadamente los mismos grosores de película. Los grosores de película del conjunto de botellas FL4 (4a, 4b, 4c y 4d) fueron de aproximadamente 14 nm, los grosores de película del conjunto de botellas FL3 (3a, 3b, 3c y 3d) fueron de aproximadamente 10 nm y los grosores de película del conjunto de botellas FL8 (8a, 8b, 8c y 8d) fueron de aproximadamente 3 nm. Los resultados mostrados en las Figuras 6A-6F se basan en imágenes de transmisión óptica obtenidas con un microscopio óptico Nikon ME600 y una cámara CCD Nikon Nanosight DSU-1, usando la disposición mostrada en la Figura 2A. Se tomaron diez imágenes y diez mediciones para cada botella. El conjunto de botellas FL3 (FL3A-FL3d) representa un grosor intermedio (es decir, aproximadamente 10 nm). El conjunto de botellas FL8 (FL8A-FL8d) representa un grosor bajo (es decir, aproximadamente 3 nm). El conjunto de botellas FL4 (FL4A-FL4d) representa un grosor alto (es decir,

aproximadamente 14 nm).

Los valores de grosor de recubrimiento se midieron de forma independiente con un dispositivo de American Glass Research (AGR). Los valores RGB promedio para las cuatro muestras en el conjunto de grosor intermedio FL3 (con un grosor de recubrimiento de aproximadamente 10 nm) se usaron como referencia en el sentido de que, para calcular las diferencias de color ΔE , los valores RGB de cada imagen capturada se restaron de los de la referencia como en la ecuación 4 anterior. Las barras de error en las Figuras 6A - 6J son intervalos de confianza del 95 %, asumiendo una distribución normal.

Un grosor típico de un recubrimiento de extremo caliente comercial es de aproximadamente 10 nm. La Figura 6A ilustra que el análisis de medición de color basado en la ecuación 4 (diferencia de color) no puede discernir diferencias de grosor de recubrimiento de 3 a 14 nm con una confianza del 95 %. Por el contrario, en la Figura 6B, el análisis de medición de color basado en el cambio de color relativo (ecuación 5) mejora significativamente la capacidad de discernir grosores de recubrimiento para recubrimientos de extremo caliente dentro de un intervalo de grosores de recubrimiento que pueden ser de interés comercial.

Las Figuras 6C y 6D ilustran el promedio de la diferencia de color ΔE (Figura 6C) y el promedio del cambio de color relativo $\Delta E_{\text{CambioColor}}$ (Figura 6D) para cada conjunto de cuatro botellas, es decir, conjunto FL3 (10 nm), conjunto FL4 (14 nm) y conjunto FL8 (3 nm). Los resultados mostrados en las Figuras 6C y 6D se obtuvieron promediando los resultados de las cuatro botellas para cada grosor y 10 mediciones para cada botella, de modo que cada contenedor representa 40 mediciones.

Las Figuras 6E y 6F ilustran los cambios respectivos en ΔE (ecuación 4) y $\Delta E_{\text{CambioColor}}$ (ecuación 5) cuando el grosor de recubrimiento aumenta de 10 nm a 14 nm (alto a medio) o disminuye de 10 nm a 3 nm (medio a bajo). El promedio de 10 nm se fijó en cero para monitorizar los cambios de grosor relativos. Los resultados mostrados en las Figuras 6E y 6F se obtuvieron promediando los resultados de las cuatro botellas para cada grosor y 10 mediciones para cada botella.

En las Figuras 6E y 6F, los mismos resultados mostrados en las respectivas Figuras 6C y 6D se trazan en relación con el resultado de 10 nm (utilizado como estándar de calibración). Como se muestra en la Figura 6F, al reducir el grosor de recubrimiento de 10 nm a 3 nm (variación de grosor medio a bajo) se produce una disminución del cambio de color relativo. El aumento del grosor de recubrimiento de 10 nm a 14 nm (alto a medio) da como resultado un aumento en el cambio de color relativo. Presentar los resultados de cambio de color relativo como en la Figura 6F puede ser útil para los procedimientos de control de calidad en los que se controlan las desviaciones de un objetivo de grosor (p. ej., 10 nm).

Las Figuras 6G y 6I ilustran resultados de las mediciones de color ΔE (ecuación 4) con conjuntos de botellas de vidrio ámbar (AM). Las Figuras 6H y 6J ilustran resultados de mediciones de color $\Delta E_{\text{CambioColor}}$ (ecuación 5) con los mismos conjuntos de botellas de vidrio ámbar (AM). Los resultados mostrados en las Figuras 6G-6J se basan en imágenes de reflectancia óptica obtenidas con la misma cámara de microscopio óptico descrita anteriormente con respecto a las Figuras 6A-6F, usando la disposición de medición de reflectancia mostrada en la Figura 2D.

Las Figuras 6G y 6H ilustran el promedio de la diferencia de color ΔE (Figura 6G) y el promedio del cambio de color relativo $\Delta E_{\text{CambioColor}}$ (Figura 6H) para cada conjunto de botellas, es decir, conjunto AM10 (10 nm), conjunto AM11 (14 nm) y conjunto AM13 (3 nm). Los resultados mostrados en las Figuras 6G y 6H se basan en mediciones con cuatro botellas para grosores de 14 nm y 10 nm (es decir, conjuntos AM10 y AM11), y en una botella para grosores de 3 nm (es decir, conjunto AM13). Se realizaron diez mediciones para cada botella.

Las Figuras 6I y 6J ilustran los cambios respectivos en ΔE (ecuación 4) y $\Delta E_{\text{CambioColor}}$ (ecuación 5) cuando el grosor de recubrimiento aumenta de 10 nm a 14 nm (alto a medio) o disminuye de 10 nm a 3 nm (medio a bajo). El promedio de 10 nm se fijó en cero para monitorizar los cambios de grosor relativos. Los resultados mostrados en las Figuras 6I y 6J se basan en mediciones con cuatro botellas para los grosores de 14 nm y 10 nm, y en una botella para el grosor de 3 nm. Se realizaron diez mediciones para cada botella. Las Figuras 6G-6J ilustran que las mediciones de cambio de color relativo pueden discernir mejor las diferencias de grosor de recubrimiento para botellas de vidrio ámbar (en comparación con las mediciones de diferencia de color).

Volviendo a la Figura 3, la calculadora de grosor 306 puede configurarse para recibir el cambio de color relativo $\Delta E_{\text{CambioColor}}$ para la imagen 208 del analizador de cambio de color 304 y determinar la indicación de grosor 314 para la imagen 208. La calculadora de grosor 306 puede usar una relación predeterminada 312 (por ejemplo, almacenada en el almacenamiento 116 (Figura 1)) entre el cambio de color relativo y el grosor de recubrimiento para determinar la indicación de grosor 314. La indicación de grosor 314 puede, por ejemplo, almacenarse en el almacenamiento 116 y/o proporcionarse a la pantalla 112.

La Figura 7 es un ejemplo de relación predeterminada 312 (también denominada en esta memoria como curva de calibración) entre el cambio de color relativo y el grosor de recubrimiento que puede usarse para determinar la indicación de grosor 314. La Figura 7 representa un ejemplo de curva de calibración que relaciona $\Delta E_{\text{CambioColor}}$ (ecuación 5) mediciones de grosor de película para un total de 12 botellas de vidrio de pedernal. Los resultados mostrados en la Figura 7 se basan en promedios de cuatro botellas para cada grosor y 10 mediciones para cada botella. Las mediciones de grosor se realizaron de forma independiente con un instrumento comercialmente disponible

de AGR Research. La curva de calibración se obtiene trazando $\Delta E_{\text{CambioColor}}$ en función del grosor de recubrimiento y ajustando los resultados con un polinomio adecuado. En la Figura 7, el grosor de recubrimiento se midió en unidades CTU. Diez CTU corresponden a aproximadamente 3 nm y la escala es lineal. Aunque no se muestra, se puede obtener una curva de calibración similar para botellas de color ámbar.

5 Volviendo a la Figura 3, la indicación de grosor 314 puede incluir el grosor real determinado a partir de la relación predeterminada 312, una indicación de que el grosor está dentro de un intervalo de grosor predeterminado (por ejemplo, almacenado en almacenamiento 116) y/o una indicación de que el grosor está fuera del intervalo de grosor predeterminado.

10 En algunos ejemplos, el analizador de cambio de color 304 puede aplicar el valor de corrección de curvatura opcional 310 (por ejemplo, almacenado en el almacenamiento 116 (Figura 1)) al cambio de color relativo $\Delta E_{\text{CambioColor}}$, basado en la ubicación de medición 205 (Figura 2B, o la ubicación de medición 215 mostrado en la Figura 2D) en el objeto 120. En algunos ejemplos, el valor de corrección de curvatura opcional 310 puede basarse en un estándar de calibración asociado con la ubicación de medición 205, asumiendo que la intensidad de la señal en función de la curvatura no es una función del grosor de recubrimiento. Se puede aplicar un valor de corrección de curvatura al cambio de color relativo o después de determinar el grosor, por ejemplo, a partir de una curva de calibración.

15 En algunos ejemplos, se puede usar una forma de punto de luz, un tamaño de punto, una ubicación de medición 205 (215) y un radio de curvatura del objeto 120 para ajustar el cambio de color relativo $\Delta E_{\text{CambioColor}}$ antes de determinar la indicación de grosor 314.

20 Haciendo referencia a la Figura 8A, se muestra una sección transversal del objeto 120 que pasa por la fuente de luz (fija) 102 (no se muestra en la Figura 8A) a una velocidad predeterminada a lo largo de la dirección 124. Se supone que la fuente de luz 102 está frente al detector 106 (tal como se muestra en la Figura 2B) de manera que la fuente de luz 102 produzca, a través de cualquier lente y abertura adecuada, un punto de luz de forma cuadrada con longitudes de punto ΔY , de modo que el área del punto sea ΔY^2 . La forma del objeto 120 en la Figura 8A es cilíndrica (al menos en los puntos en los que se realizan las mediciones de grosor). Se puede realizar un procedimiento similar para otros objetos y formas de puntos de luz. La botella se mueve a lo largo de la cinta transportadora 122 (no mostrada en la Figura 8A) mientras que el sistema de medición está estacionario. En un ejemplo, el detector de posición 104 (Figura 2B) puede activar una primera medición cuando el punto de luz que interactúa con el objeto 120 está centrado entre las ubicaciones Y5 e Y4 (es decir, en la posición $Y4 + (Y5-Y4)/2 = (Y5+Y4)/2$). Se puede activar otra medición cuando el centro del punto se mueve hacia abajo para ubicarse en la posición $(Y4+Y3)/2$ y así sucesivamente. En el ejemplo de la Figura 8A, se pueden completar un total de 10 mediciones cuando el objeto 120 pasa por la fuente de luz 102 y el detector 106 (Figura 2B).

25 Se supone que el cambio de color delta E de señal de luz se escala con el volumen de recubrimiento. Para un cuadrado plano con diámetro ΔY y un grosor de recubrimiento de d, el volumen de recubrimiento sería $\Delta Y^2 d$. Sin embargo, debido al radio de curvatura, el volumen efectivo es mayor. Por ejemplo, el volumen efectivo es $R(\Phi_{05} - \Phi_{04})d$ si R es el radio de la botella y Φ_{05} y Φ_{04} son 90° y el ángulo desde donde la línea Y0 cruza el círculo hasta donde la línea Y4 lo cruza. El radio del objeto 120 sería conocido en una instalación de producción típica. A partir de la geometría del objeto 120, la señal de activación (del detector de posición 104) y la velocidad conocida de la cinta transportadora 122, se conocen las posiciones Y0 a Y5 (así como las otras 5 posiciones debajo de la línea Y0). La relación entre el grosor de recubrimiento y la intensidad de señal se puede establecer a través de una curva de calibración usando objetos con grosores de recubrimiento conocidos medidos en la posición Y0 (curvatura mínima) o muestras planas, si están disponibles. Los ángulos Φ_{0i} se puede determinar a partir del radio R de la botella conocido y las posiciones del centro del punto conocido de la siguiente manera (Y_{01} = punto centrado entre Y0 e Y1, etc.) como

$$Y_{01} = R \operatorname{sen}\left(\frac{\Phi_{01}}{2}\right) \Rightarrow \Phi_{01} = 2 \operatorname{arcsen}\left(\frac{Y_{01}}{R}\right)$$

$$Y_{12} = R \operatorname{sen}\left(\frac{\Phi_{12} + \Phi_{01}}{2}\right) \Rightarrow \Phi_{12} = 2 \operatorname{arcsen}\left(\frac{Y_{12}}{R}\right) - \Phi_{01}, \text{ etc.}$$

45 En una realización, cada valor de cambio de color de grosor o delta E se multiplica por la relación del volumen efectivo (teniendo en cuenta la curvatura) y el volumen del punto central. Alternativamente, la distancia angular se puede calibrar a partir de mediciones con una botella de grosor conocido, especialmente para mediciones de reflectancia para las que existe una complicada dependencia angular de la señal.

50 La Figura 8B representa una sección transversal de una botella de vidrio. El círculo representa la circunferencia de la botella. Se representa una geometría de transmisión en la que una sola fuente de luz (LS) y un solo detector (D) se colocan paralelos entre sí. La botella se coloca entre el detector y la fuente de luz. Alternativamente, podrían usarse múltiples fuentes de luz y/o detectores colocados en ángulos distintos de cero grados entre sí. Además, no es necesario colocar la botella entre la fuente de luz y el detector. Por ejemplo, en la geometría de reflexión, la botella no se colocaría entre la fuente de luz y el detector. En el ejemplo esbozado se toman tres mediciones. Como alternativa, se puede practicar una sola medición o cualquier número de mediciones mayor que una. El número de mediciones solo está limitado por la velocidad de procesamiento del detector y la unidad informática (no mostrada) para procesar

datos relativos a la velocidad de movimiento de la botella.

En la Figura 8B, la botella se ilustra moviéndose de izquierda a derecha. Las mediciones se toman cuando el centro de la fuente de luz está en las posiciones X0, X1 y X2.

5 La detección de posición de botella en relación con la línea que conecta los puntos Xi (i=0, 1, 2) se puede realizar a través de un segundo sistema de detección que consiste en una fuente de luz y un detector colocado sobre el primer conjunto de fuente de luz y detector de tal manera que el camino de la luz entre la segunda fuente de luz y el segundo detector se bloquea cada vez que pasa un cuello de botella (no mostrado). El tiempo de "bloqueo" podría usarse para activar mediciones a intervalos de tiempo fijos. Este procedimiento supone que se conoce la geometría de la botella, que la botella tiene un cuello con un diámetro diferente a su centro y que las botellas se mueven a velocidad constante. 10 De hecho, este es el caso en instalaciones típicas de producción de botellas.

15 Alternativamente, la detección de posición podría realizarse mediante el análisis de la distribución de intensidad de la imagen que es capturada por el detector (cámara). Esta técnica de detección de posición se basa en que la transmisión de la luz y por tanto la señal de color medida por los diferentes píxeles de la cámara es función de la posición de la botella. Cuando la botella se mueve de izquierda a derecha, se detectará primero un cambio en la transmisión en los píxeles más cercanos al borde derecho del detector y la transmisión será diferente para el centro de la botella en comparación con los bordes debidos a la curvatura de la botella (ver croquis.)

20 En la geometría de reflexión, la posición de la botella a lo largo de la línea que conecta los puntos Xi (véase la Figura 8B) también podría detectarse a través del análisis de imágenes en función del tiempo. Además, en geometría de reflexión, la posición de la botella con respecto a una línea perpendicular a la línea que conecta los puntos Xi también podría determinarse a partir del análisis de imágenes. Esto se basa en el hecho de que la llamada distinción de imagen, medible como el grado de borrosidad, así como la intensidad total (y la intensidad de la señal de color) medida por el detector son función de la distancia desde la fuente de luz y el detector. Esto tiene relevancia práctica, ya que las anchuras de las cintas transportadoras típicas en las instalaciones de producción de botellas suelen ser mayores que los diámetros de las botellas y las botellas pueden moverse ligeramente en una dirección perpendicular a la misma, que es, en la Figura 8B, perpendicular a la línea que une los puntos Xi. 25

La intensidad de señal de la señal de color escala con el volumen total de recubrimiento que es iluminado por la luz de sondeo y que llega al detector. El área total de la botella iluminada por un haz de luz circular de diámetro ΔX centrado en la posición X1 tendrá una forma elíptica debido a la curvatura de la botella. El área A de esta elipse será:

$$A = \pi \cdot \frac{\Delta X}{2} \cdot \left(\frac{R \cdot \Delta \Phi_0}{2} \right)$$

30 Si el grosor de recubrimiento es d, el volumen total del recubrimiento sondado cuando el centro de la fuente de luz en la posición X1 es A·d. Para calcular los volúmenes correspondientes para las posiciones X0 y X2, podemos usar la misma ecuación para A que la anterior con ΔΦ0 reemplazada por ΔΦ1.

El ángulo ΔΦ0 se puede calcular a partir de ΔX y R usando la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta \Phi_0}{2} = \arcsen \left(\frac{\Delta X / 2}{R} \right) = \arcsen \left(\frac{\Delta L_0 / 2}{R} \right), y \frac{\Delta \Phi_1}{2} = \Phi_1 - \frac{\Delta \Phi_0}{2}$$

Si se toman más de tres mediciones, los ángulos consecutivos ΔΦi se pueden calcular usando:

35
$$\frac{\Delta \Phi_i}{2} = \Phi_i - \Phi_{(i-1)} - \frac{\Delta \Phi_{(i-1)}}{2}$$

Para los ángulos Φi obtenemos:

$$\Phi_0 = 0$$

$$\Phi_1 = \frac{\Delta \Phi_0}{2} + \frac{\Delta \Phi_1}{2}$$

$$\Phi_i = \Phi_{(i-1)} + \frac{\Delta \Phi_{(i-1)}}{2} + \frac{\Delta \Phi_i}{2} \text{ para } i > 1.$$

Junto con la distancia conocida entre las mediciones ΔX , las ecuaciones anteriores podrían usarse para corregir los cambios en el grosor de recubrimiento medido debido a la curvatura.

Volviendo a la Figura 3, el detector de defectos opcional 308 puede configurarse para recibir histogramas de canales de color del generador de histogramas 302 y determinar si una característica de uno o más de los histogramas de canales de color indica un defecto. El defecto puede incluir una indicación de suciedad, una indicación de arañazos y/o una indicación de línea de soldadura. La característica del histograma puede incluir un cambio en la distribución. En los ejemplos siguientes, un ensanchamiento de la distribución del histograma puede indicar un defecto. Se entiende que el ensanchamiento de histograma representa una característica de ejemplo y que pueden usarse otras características, como la amplitud, además o en lugar de la anchura de distribución.

El detector de defectos opcional 308 puede comparar la característica de histograma (de uno o más canales de color) con el umbral predeterminado de defectos 316 (tal como una anchura de distribución predeterminada) que puede indicar la presencia de un defecto. El umbral de defectos 316 puede almacenarse en el almacenamiento 116 (Figura 1). Cuando el detector de defectos 308 determina que la característica de histograma es mayor que el umbral de defectos 316, el detector de defectos 308 puede generar una indicación de defectos 318 de que la medición se descarta para la ubicación de medición actual. El detector de defectos 308 puede proporcionar una indicación de defecto 318, por ejemplo, al controlador 108 (Figura 1), pantalla 112, almacenamiento 116, analizador de cambio de color 304 y/o calculadora de grosor 308. En algunos ejemplos, la indicación de defecto 318 puede provocar que los histogramas de canal de color sean excluidos del análisis por el analizador de cambio de color 304 y la calculadora de grosor 306 para la ubicación de medición actual. En algunos ejemplos, se pueden usar varias indicaciones de defectos 318 activadas durante la medición de grosor para terminar el proceso de medición de grosor.

En un ejemplo, se pueden utilizar múltiples mediciones para compensar defectos tales como suciedad y/o arañazos. En otros ejemplos, se puede usar una característica del histograma de canal de color para compensar los defectos. En particular, los arañazos más grandes, la suciedad y las líneas de soldadura pueden provocar un ensanchamiento significativo de las distribuciones de histograma de color (descritas más adelante con respecto a las Figuras 9-12B). La anchura de distribución de histograma (de uno o más histogramas de canales de color) se puede usar para compensar los defectos (p. ej., suciedad, arañazos y artefactos de la línea de soldadura). Por ejemplo, la anchura de distribución puede usarse para excluir histogramas del análisis cuando el ensanchamiento de la distribución excede el umbral de defecto 316. El ensanchamiento puede cuantificarse a partir de una curva gaussiana ajustada a uno o más de los histogramas de canales de color.

La Figura 9 es un gráfico que ilustra histogramas de ejemplo (902, 906 y 910) y las respectivas curvas ajustadas por Gauss (904, 908 y 912) en función del valor de canal de color verde de una imagen de una botella de cerveza, que ilustra los efectos de diversos defectos en histogramas 902, 906 y 910. La curva 902 representa un histograma de canal de color verde para una botella sin defectos.

La curva 906 representa un histograma de canal de color verde para una botella con un arañazo. La curva 910 representa un histograma de canal de color verde para una botella transparente con un hoyuelo (es decir, partículas de suciedad). Las curvas ajustadas por Gauss 904, 908 y 912 muestran que la anchura de distribución aumenta cuando el objeto incluye defectos (por ejemplo, arañazos o partículas de suciedad).

Las Figuras 10A-10C son ejemplos de imágenes de transmisión RGB capturadas de una parte de una botella que no tiene defectos (Figura 1), que tiene un arañazo (Figura 10B) y que tiene partículas de suciedad (Figura 10C). Las imágenes de transmisión óptica pueden capturarse usando una disposición similar a la disposición mostrada en la Figura 2B. Las Figuras 10D-10F son ejemplos de histogramas del respectivo canal verde (Figura 10D), canal rojo (Figura 10E) y canal azul (Figura 10F) de las imágenes capturadas mostradas en las Figuras 10A, 10B y 10C, que ilustran cambios en cada histograma de canal de color debido a la presencia de defectos.

Las curvas 1000, 1010 y 1020 representan los respectivos histogramas de los canales verde, rojo y azul para la botella de la Figura 10A sin defectos. Las curvas 1002, 1012 y 1022 representan los respectivos histogramas de los canales verde, rojo y azul para la botella de la Figura 10B con un arañazo. Las curvas 1004, 1014 y 1024 representan los respectivos histogramas de los canales verde, rojo y azul para la botella de la Figura 10C que tiene partículas de suciedad. Cada histograma de canal de color ilustra un comportamiento similar, con una distribución que se ensancha cuando la botella incluye un defecto.

Otra preocupación por la precisión de medición de grosor es la presencia de líneas de soldadura (típicas en las botellas de vidrio). Las Figuras 11A y 11B son ejemplos de imágenes ópticas capturadas de una parte de una botella de vidrio de pedernal que no tiene defectos (Figura 11A) y la misma botella en una línea de soldadura (Figura 11B). La imagen mostrada en la Figura 11A fue capturada aproximadamente a 1 cm de la línea de soldadura mostrada en la Figura 11B.

Las Figuras 11C y 11D son ejemplos de histogramas de canales de color de las respectivas imágenes mostradas en las Figuras 11A y 11B, que ilustran el efecto de las líneas de soldadura en los histogramas. La Figura 11C ilustra el histograma de canal rojo 1102-R, el histograma de canal verde 1102-G y el histograma de canal azul 1102-B para la imagen de la Figura 11A. La Figura 11D ilustra el histograma de canal rojo 1104-R, el histograma de canal verde 1104-G y el histograma de canal azul 1104-B para la imagen de la Figura 11B. La Figura 11D muestra que cada histograma

de canal de color (1 104-R, 1104-G, 1104-B) para la imagen de botella pronunciada de línea de soldadura (Figura 11B) tiene una distribución significativamente diferente (y más amplia) en comparación con los histogramas de canal de color (1102-R, 1102-G, 1102-B) para la imagen de la botella sin defectos (Figura 1 1A).

5 Las Figuras 12A y 12B son gráficos de curvas gaussianas en función de la intensidad (valor del canal) ajustadas al promedio de los histogramas de los canales de color mostrados en las respectivas Figuras 11C y 1 1D. La Figura 12A representa una curva ajustada por Gauss para la imagen de la botella sin defectos mostrada en la Figura 1 1A. La Figura 12B representa una curva ajustada por Gauss para la imagen de la botella de la línea de soldadura mostrada en la Figura 11B. En la Figura 12B, la curva 1200 corresponde a los histogramas promediados para los canales R, G y B. La curva 1202 representa la curva ajustada por Gauss a la curva de histograma promediada 1200.

10 Haciendo referencia a continuación a la Figura 4, se muestra un diagrama de flujo de un método de ejemplo para medir el grosor de un recubrimiento en el objeto 120. La Figura 4 se analiza a continuación con respecto a las Figuras 1 y 3. En el método descrito en la Figura 4, se supone que el objeto 120 se mueve a una velocidad predeterminada en la cinta transportadora 122 a lo largo de la dirección 124, de modo que el objeto 120 se mueve más allá de la(s) fuente(s) de luz fija 102. La medición de grosor se puede realizar según la transmisión óptica de imágenes (como se muestra en la Figura 2B) o según la imagen de reflectancia óptica (como se muestra en la Figura 2D).

15 La Figura 4 se describe para el ejemplo de una imagen RGB (es decir, una imagen de canal de tres colores), pero también se puede aplicar a otros canales de color (para luz visible y/o luz IR), incluida cualquier imagen 208 que tenga al menos dos canales de color. Además, aunque la etapa 406 a continuación describe la captura de una única imagen 208, dos o más imágenes pueden capturarse simultáneamente (tal como se muestra en la Figura 2C) y procesarse de manera similar a como se describe a continuación en las etapas 410-440 para el caso de varias imágenes capturadas secuencialmente.

20 En la etapa 400, se transmite luz hacia el objeto 120, por ejemplo, a través de la(s) fuente(s) de luz 102. El objeto 120 puede moverse más allá de la(s) fuente(s) de luz 102, de modo que al menos una parte de la luz transmitida esté configurada para interactuar con el objeto 120 cuando el objeto 120 alcanza la posición de detección inicial 203. En la etapa 402, el objeto 120 se detecta en la posición de detección inicial 203 (Figura 2B), por ejemplo, mediante el detector de posición 104. El detector de posición 104 puede enviar la señal de detección 206 (Figura 2A) al controlador 108, en respuesta a la etapa de detección de posición (etapa 402). En la etapa 404, el índice de ubicación de medición k se iguala a 1, por ejemplo, mediante el controlador 108 en respuesta a la señal de detección 206 del detector de posición 104. El índice de ubicación de medición k es un valor entero de 1 a K (donde K es mayor o igual que a 1). Cada índice de ubicación de medición k representa una ubicación horizontal a lo largo del objeto 120 en la dirección 124.

30 En la etapa 406, la imagen 208 que tiene dos o más canales de color puede capturarse en la ubicación de medición $Y(k)$, por ejemplo, mediante el detector 106. La ubicación de medición $Y(k)$ puede representar la ubicación 205 (Figura 2B), la ubicación 215 (Figura 2D) o cualquiera de las ubicaciones Y_0 - Y_5 (Figura 8). Por ejemplo, el controlador 108, en respuesta a la detección del objeto en la posición de detección inicial 203 (etapa 402) puede hacer que el detector 106 capture la imagen RGB 208 en la ubicación de medición $Y(k)$. La imagen puede ser producida por la parte de la luz (de la(s) fuente(s) de luz 102) que interactúa con el objeto 120 en el lugar de medición $Y(k)$. En un ejemplo, si solo se captura una única imagen para determinar la medición de grosor (es decir, el número de ubicaciones de medición horizontales $K=1$), la ubicación de medición $Y(1)$ puede corresponder al centro del objeto 120 (a lo largo de la dirección 124).

35 Una imagen RGB 208 puede incluir tres matrices, una para cada uno de los canales de color rojo, verde y azul. El número de columnas y filas típicamente corresponde a la resolución de píxel del detector 106. Las matrices contienen números enteros, cada uno de los cuales representa un valor particular de rojo, verde o azul en un píxel particular.

40 En la etapa 408, se genera un histograma de canal de color para cada canal de color de la imagen 208, por ejemplo, mediante el generador de histograma 302 del dispositivo de medición 110. Cada histograma de canal de color puede determinarse sumando todos los píxeles con un valor de canal de color particular (por ejemplo, valor rojo, verde o azul) y mapear los píxeles sumados en función del rango dinámico del detector 106. El rango dinámico es una medida de lo fino que puede detectar un detector de diferencia de color 106 dentro de una ventana de intensidad de luz dada. Para una imagen de 24 bits, por ejemplo, con 8 bits para cada canal de color, el detector 106 puede medir $2^8 = 256$ tonos de rojo, verde y azul. El rango dinámico y el rendimiento de un detector 106 también dependen de otros factores tales como lo pequeña que es la carga que puede transferir cada píxel, su nivel de ruido.

45 En la etapa opcional 410, se puede ajustar una curva gaussiana a uno o más de los histogramas de canal de color (etapa 408), por ejemplo, mediante el detector de defectos opcional 308. El detector de defectos 308 puede determinar la anchura de la curva ajustada por Gauss. En la etapa opcional 412, el detector de defectos 308 puede determinar si la anchura de distribución es mayor que el umbral predeterminado de defectos 316. Una distribución mayor que el umbral de defectos 316 puede indicar un defecto como partículas de suciedad, uno o más arañazos o una línea de soldadura.

50 Si, en la etapa opcional 412, la anchura de distribución es mayor que el umbral de defectos 316, la etapa 412 procede a la etapa opcional 414 y la medición en la ubicación $Y(k)$ se descarta, por ejemplo, mediante el detector de defectos 308 o el controlador 108. La etapa opcional 414 puede proceder a la etapa 416. En la etapa opcional 416, el número de mediciones descartadas (por ejemplo, sobre la base de la indicación de defecto 318) puede compararse con un umbral predeterminado (por ejemplo, si se determina más de una medición de grosor para el objeto 120), por ejemplo,

por el controlador 108. Si el controlador 108 determina, en la etapa 416, que el número de mediciones descartadas es mayor que el umbral, la etapa 416 procede a la etapa 420 y el proceso finaliza.

5 Si el controlador 108 determina, en la etapa 416, que el número de mediciones descartadas es menor o igual que el umbral predeterminado, la etapa 416 procede a la etapa 418 y el proceso continúa en la etapa 430 (para la siguiente ubicación de medición).

10 Si, en la etapa opcional 412, se determina que la anchura de distribución de uno o más histogramas de canales de color es menor que el umbral de defectos 316, la etapa 412 procede a la etapa 422. En la etapa 422, se identifica el centroide de cada histograma de canal de color, para ejemplo, por el analizador de cambio de color 304. Cada posición de centroide (por ejemplo, C_r , C_g , C_b) puede determinarse multiplicando todos los píxeles del canal de color respectivo por sus valores de rango dinámico, sumando el resultado y dividiendo posteriormente la suma por el número de píxeles del canal de color.

15 En la etapa 424, el analizador de cambio de color 304 determina el cambio de color relativo $\Delta E_{\text{CambioColor}}$ entre cada uno de los canales de color sobre la base de las posiciones del centroide (etapa 422). Primero, el analizador de cambio de color 304 determina los cambios de posición del centroide relativo, calculando las diferencias $C_r - C_b$, $C_r - C_g$, y $C_b - C_g$. Los cambios de posición de centroide se aplican a la ecuación 5. Específicamente, todos los cambios de posición de centroide se elevan al cuadrado. Luego, se determina la raíz cuadrada de la suma de cuadrados. En algunos ejemplos, el cambio de color relativo (ecuación 5) puede multiplicarse por 100 y proporcionarse como un porcentaje.

20 En la etapa opcional 426, el valor de corrección de curvatura 310 se puede aplicar al cambio de color relativo $\Delta E_{\text{CambioColor}}$, por el analizador de cambio de color 304, por ejemplo, sobre la base de la ubicación de medición Y (k) y una forma predeterminada del objeto 120, según un estándar de calibración.

En la etapa 428, el controlador 108 puede almacenar el cambio de color relativo $\Delta E_{\text{CambioColor}}$ para la ubicación Y(k) en el almacenamiento 116. En la etapa 430, el controlador 108 determina si el índice de ubicación de medición k es igual a K.

25 Si el controlador 108 determina, en la etapa 430, que el índice k no es igual a K, la etapa 430 procede a la etapa 432. En la etapa 432, el controlador 108 incrementa el índice de medición k a k+1, y la etapa 432 procede a la etapa 406. Las etapas 406-432 se repiten hasta que el índice k sea igual a K.

Si el controlador 108 determina, en la etapa 430, que el índice k es igual a K, la etapa 430 procede a la etapa 434. En la etapa 434, el analizador de cambio de color 304 (o el controlador 108) determina un cambio de color relativo promedio entre las K ubicaciones de medición basándose en los cambios de color relativos almacenados (etapa 428) para cada ubicación de medición.

30 En la etapa 436, la calculadora de grosor 306 determina el grosor de recubrimiento sobre el objeto 120 basándose en el cambio de color relativo promedio (etapa 434) usando la relación predeterminada 312 entre el cambio de color relativo y el grosor de recubrimiento. Se entiende que la etapa 434 no se puede realizar cuando $K = 1$ (es decir, para una medición de grosor utilizando una única ubicación de medición en el objeto 120). Alternativamente, la calculadora de grosores 306, en la etapa 436, puede determinar si el recubrimiento está dentro de un intervalo aceptable, sin determinar el grosor real del recubrimiento.

En la etapa 438, se presenta la indicación de grosor 314, por ejemplo, a través de la pantalla 112 sobre la base del grosor determinado en la etapa 436. La indicación de grosor 314 puede incluir el grosor determinado, una indicación de que el grosor determinado está dentro de un intervalo de grosor predeterminado, o una indicación el grosor determinado está fuera del intervalo de grosor predeterminado.

40 En la etapa opcional 440, la tasa de alimentación de un compuesto de recubrimiento para el inyector o inyectores 128 de la campana de recubrimiento 126 se puede ajustar sobre la base de la indicación de grosor 314, por ejemplo, mediante el controlador 108 (por ejemplo, automáticamente) o mediante la entrada de usuario a través de la interfaz de usuario 114 (junto con el controlador 108).

45 Se contempla que un medio legible por ordenador no transitorio pueda almacenar instrucciones legibles por ordenador para la ejecución por máquina de las etapas 400-440.

50 Aunque la invención se ha descrito en términos de métodos y aparatos para medir ópticamente el grosor de película de un recubrimiento depositado sobre un sustrato, se contempla que se pueden implementar una o más etapas y/o componentes en software para uso con microprocesadores/ordenadores de uso general (no mostrados). En esta realización, una o más de las funciones de los diversos componentes y/o etapas descritas anteriormente pueden implementarse en un software que controla un ordenador. El software puede incorporarse en medios legibles por ordenador tangibles no transitorios (tales como, a modo de ejemplo no limitativo, un disco magnético, un disco óptico, un disco duro, etc.) para su ejecución por el ordenador. Como se describe en esta memoria, los dispositivos 104, 106, 110, 112 y 114, mostrados en la Figura 1, pueden realizar ciertas operaciones usando circuitos dedicados y/o usando software contenido en un medio legible por ordenador 116 acoplado al controlador 108. Las instrucciones del software pueden hacer que el controlador 108 y/o el dispositivo de medición 110 realicen uno o más procesos descritos en esta memoria. Alternativamente, se pueden usar circuitos cableados en lugar o en combinación con instrucciones de

software para implementar los procesos descritos en este documento. Por lo tanto, las implementaciones descritas en este documento no se limitan a ninguna combinación específica de circuitos de hardware y software.

Aunque la invención se ilustra y describe en este documento con referencia a realizaciones específicas, no se pretende que la invención se limite a los detalles mostrados. Más bien, se pueden realizar diversas modificaciones en los detalles dentro del alcance de las reivindicaciones.

5

REIVINDICACIONES

1. Un aparato (100) para medir el grosor de un recubrimiento sobre un objeto (120), comprendiendo el aparato:
al menos una fuente de luz (102) configurada para dirigir la luz hacia el objeto (120) en una ubicación predeterminada (205, 215) en el objeto (102), una parte de la luz que interactúa con el objeto (102);
- 5 un detector (106) configurado para capturar una imagen (208) que comprende al menos dos canales de longitud de onda producidos por la parte de la luz que interactúa con el objeto (120) en donde cada uno de los al menos dos canales de longitud de onda es un canal de color; y
un dispositivo de medición (110) acoplado al detector, caracterizado por que el dispositivo de medición (110) se configura para:
- 10 (i) determinar un cambio de color relativo entre los al menos dos canales de longitud de onda de la imagen (208) sobre la base del centroide de un histograma de cada canal de longitud de onda de los al menos dos canales de longitud de onda de la imagen (208), en donde el cambio de color relativo se basa en una diferencia entre cada centroide de los al menos dos canales de color, y
- 15 (ii) determinar al menos uno entre el grosor o la aceptabilidad del recubrimiento sobre el objeto (120) sobre la base del cambio de color relativo determinado,
comprendiendo dicho aparato opcionalmente, además:
- una pantalla (112) configurada para mostrar al menos uno entre el grosor determinado, una indicación de que el grosor determinado es aceptable, o una indicación de que el grosor determinado no es aceptable,
 - un sensor de posición (104) configurado para detectar que el objeto está en la ubicación predeterminada (205, 215).
- 20 - una campana de recubrimiento (126).
2. El aparato (100) de la reivindicación 1, en donde el dispositivo de medición (110) se configura para:
comparar una característica de cada histograma con un umbral de defecto predeterminado, y
determinar el grosor del recubrimiento cuando la característica de cada histograma es menor que el umbral de defecto predeterminado,
- 25 en donde el umbral de defecto corresponde a al menos una indicación de suciedad, una indicación de arañazo o una indicación de línea de soldadura.
3. El aparato (100) de la reivindicación 1, en donde la parte de la luz que interactúa con el objeto (120) incluye al menos una parte de la luz que pasa a través del objeto (120) o la parte de la luz reflejada desde el objeto (120).
4. El aparato (100) de la reivindicación 1, que comprende además:
- 30 un controlador (108) acoplado a la al menos una fuente de luz (102), el detector (106) y el dispositivo de medición (110), el controlador (108) configurado para controlar la fuente de luz (102), el detector (106), y el dispositivo de medición (110), de tal manera que el dispositivo de medición (110) determina una pluralidad de cambios de color relativos a partir de varias imágenes respectivas (208) correspondientes a varias ubicaciones en el objeto (120),
en donde el dispositivo de medición determina el grosor del recubrimiento sobre el objeto (120) sobre la base de un
35 cambio de color relativo promedio de la pluralidad de cambios de color relativos, y
las varias imágenes (208) correspondientes a las varias ubicaciones se capturan secuencialmente, simultáneamente o una combinación de las mismas.
5. El aparato (100) de la reivindicación 1, en donde el objeto (120) se mueve a una velocidad predeterminada en una primera dirección y el dispositivo de medición (110) se configura para determinar el movimiento del objeto (120) en
40 una segunda dirección ortogonal a la primera dirección basándose en una característica de la imagen capturada (208).
6. El aparato (100) de la reivindicación 1, en donde el grosor del recubrimiento sobre el objeto (120) se determina sobre la base de una relación predeterminada entre el cambio de color relativo determinado y el grosor de recubrimiento.
7. El aparato (100) de la reivindicación 1, en donde la fuente de luz (102) se configura para transmitir al menos una luz visible o una luz infrarroja.
- 45 8. Un método para medir el grosor de un recubrimiento sobre un objeto, comprendiendo el método:
- (a) dirigir luz hacia el objeto (120) en una ubicación predeterminada (205, 215) en el objeto (120), una parte de la luz

interactúa con el objeto;

(b) capturar una imagen (208) que comprende al menos dos canales de color producidos por la parte de la luz que interactúa con el objeto (120);

caracterizado por que el método comprende además:

5 (c) generar un histograma de cada canal de color de los al menos dos canales de color de la imagen (208);

(d) identificar, para cada canal de color, un centroide del respectivo histograma;

(e) determinar un cambio de color relativo entre los al menos dos canales de color sobre la base de una diferencia entre cada centroide de los al menos dos canales de color; y

10 (f) determinar al menos uno entre el grosor o la aceptabilidad del recubrimiento sobre el objeto sobre la base del cambio relativo de color determinado.

9. El método de la reivindicación 8, comprendiendo además el método:

repetir la dirección de la luz, la captura de la imagen (208) y la determinación del cambio de color relativo para varias ubicaciones en el objeto (120);

determinar un cambio de color relativo promedio para las varias ubicaciones en el objeto (120); y

15 determinar el grosor del recubrimiento sobre el objeto sobre la base del cambio de color relativo medio.

10. El método de la reivindicación 9, en donde las varias imágenes (208) correspondientes a las varias ubicaciones se capturan de forma secuencial, simultánea o una combinación de las mismas.

20 11. El método de la reivindicación 8, en donde los al menos dos canales de color incluyen al menos tres canales de color, y el cambio de color relativo se basa en la raíz cuadrada de la suma de las diferencias al cuadrado entre cada centroide de los al menos tres canales de color.

12. El método de la reivindicación 8, en donde la parte de la luz que interactúa con el objeto (120) incluye al menos una parte de la luz que pasa a través del objeto (120) o la parte de la luz reflejada desde el objeto (120).

13. El método de la reivindicación 8, comprendiendo además el método:

comparar una característica de cada histograma con un umbral de defecto predeterminado, y

25 determinar el grosor del recubrimiento cuando la característica de cada histograma es menor que el umbral de defecto predeterminado,

en donde el umbral de defecto corresponde a al menos una indicación de suciedad, una indicación de arañazo o una indicación de línea de soldadura.

14. El método de la reivindicación 8, la determinación del cambio de color relativo que comprende además:

30 aplicar un valor de corrección de curvatura al cambio de color relativo basado en la ubicación predeterminada (105, 215) en el objeto (120), para formar un cambio de color corregido por curvatura, y

en donde el grosor del recubrimiento sobre el objeto se determina sobre la base del cambio de color corregido por curvatura.

15. El método de la reivindicación 8, comprendiendo además el método:

35 presentar al menos uno entre el grosor determinado, una indicación de que el grosor determinado es aceptable o una indicación de que el grosor determinado no es aceptable.

16. El método de la reivindicación 8, en donde la determinación del grosor incluye determinar el grosor del recubrimiento sobre el objeto basándose en una relación predeterminada entre el cambio de color relativo determinado y el grosor de recubrimiento.

FIG. 1

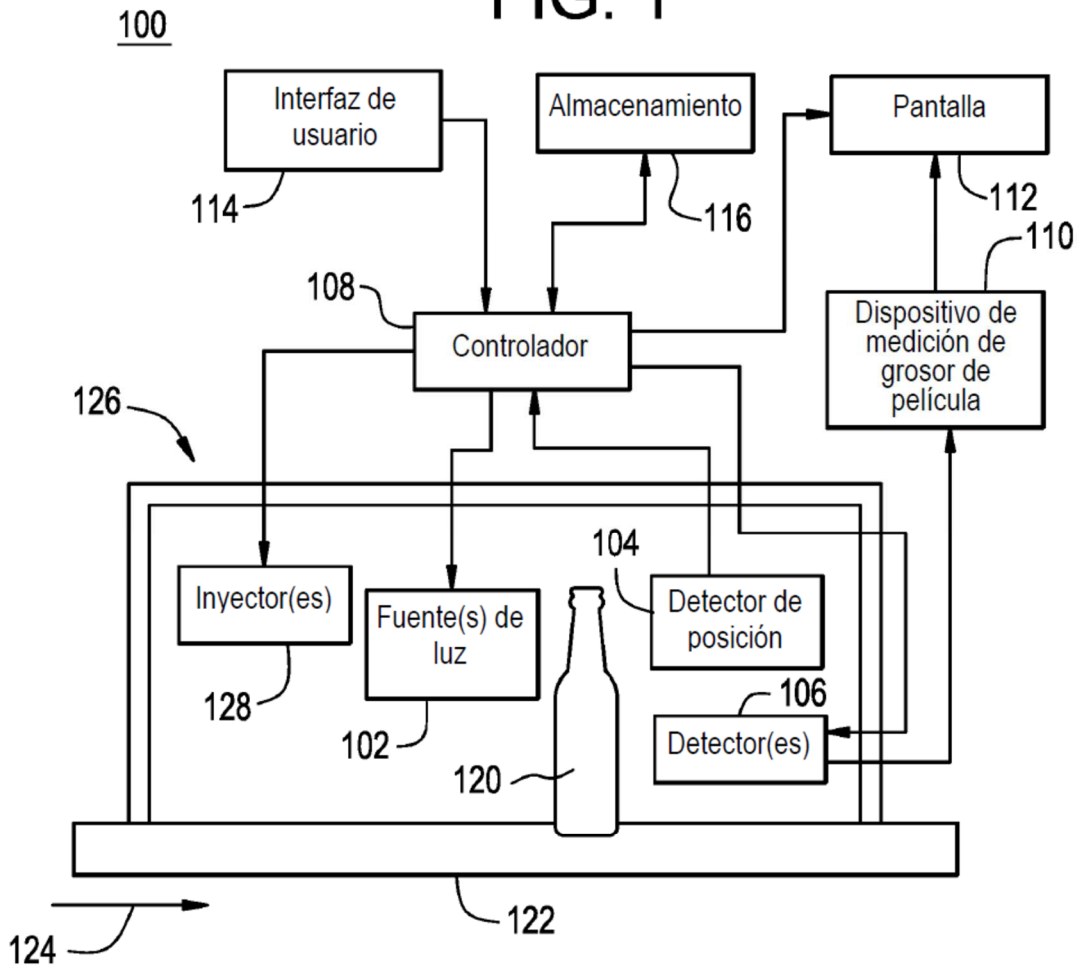


FIG. 3

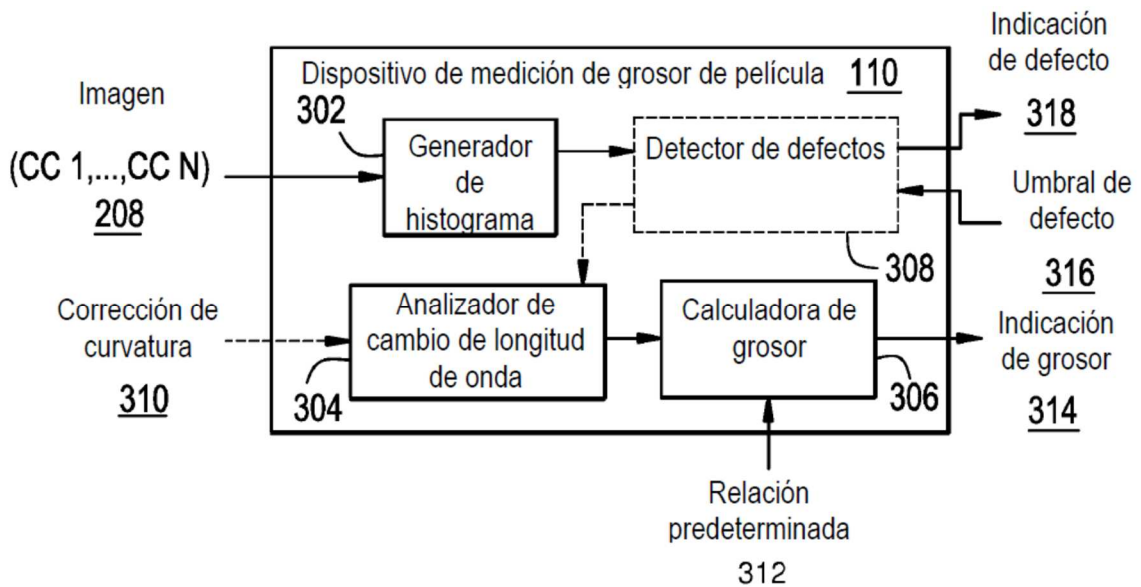


FIG. 2A

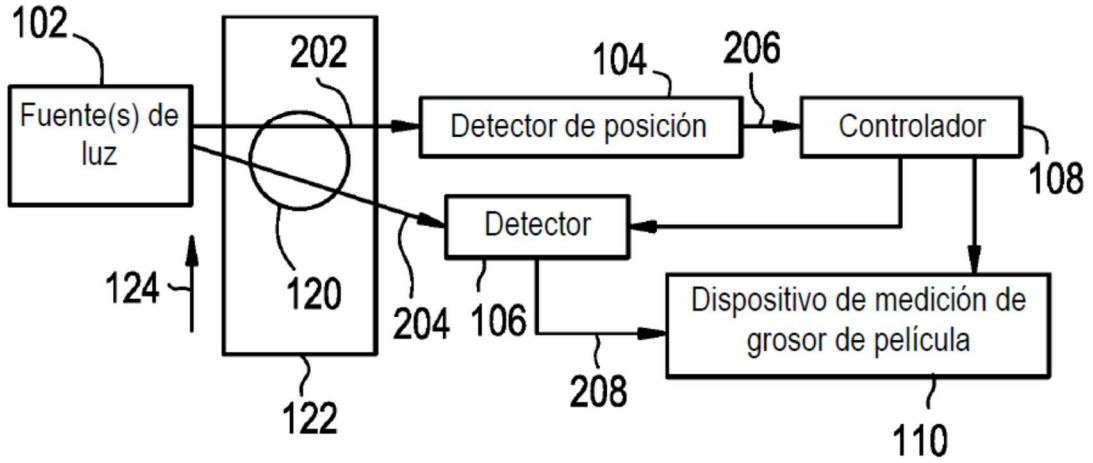


FIG. 2B

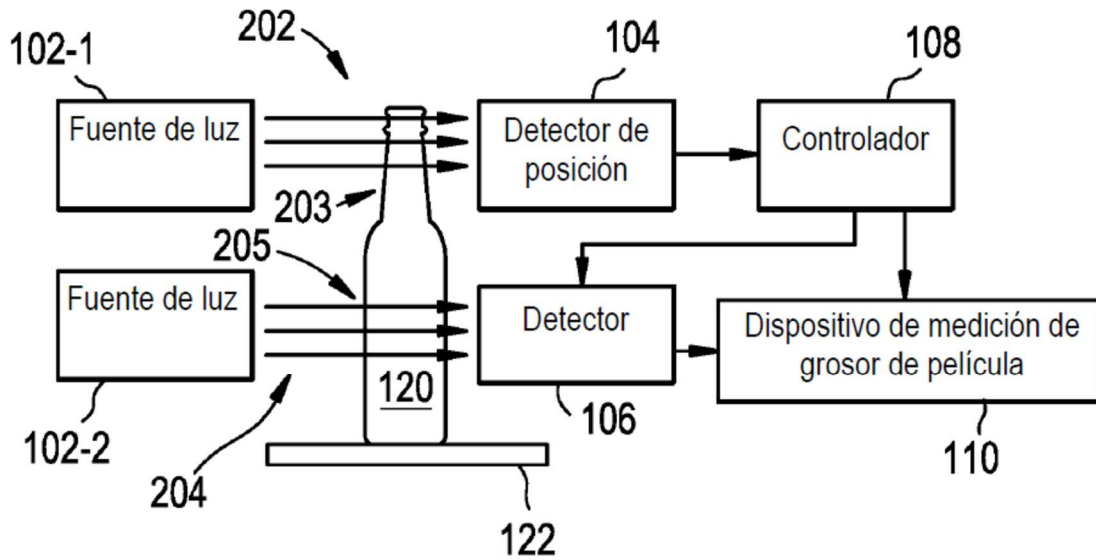


FIG. 2C

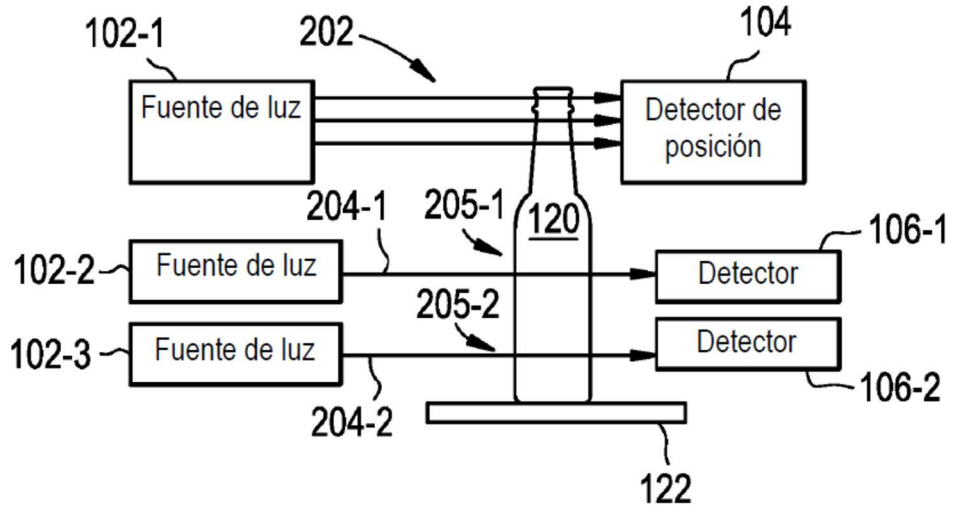


FIG. 2D

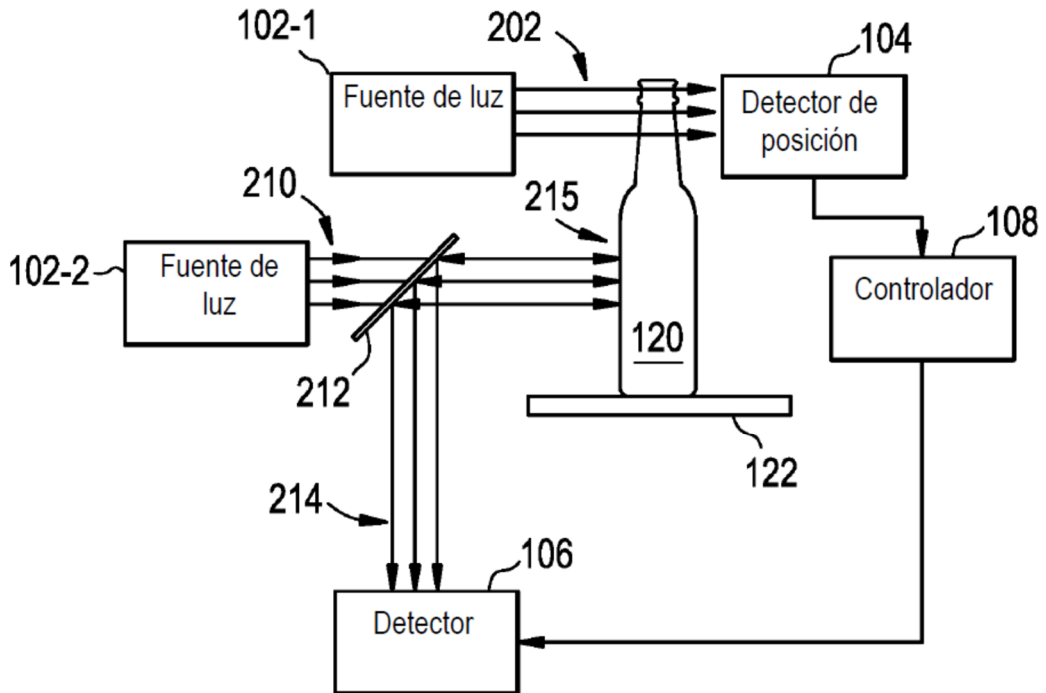


FIG. 4

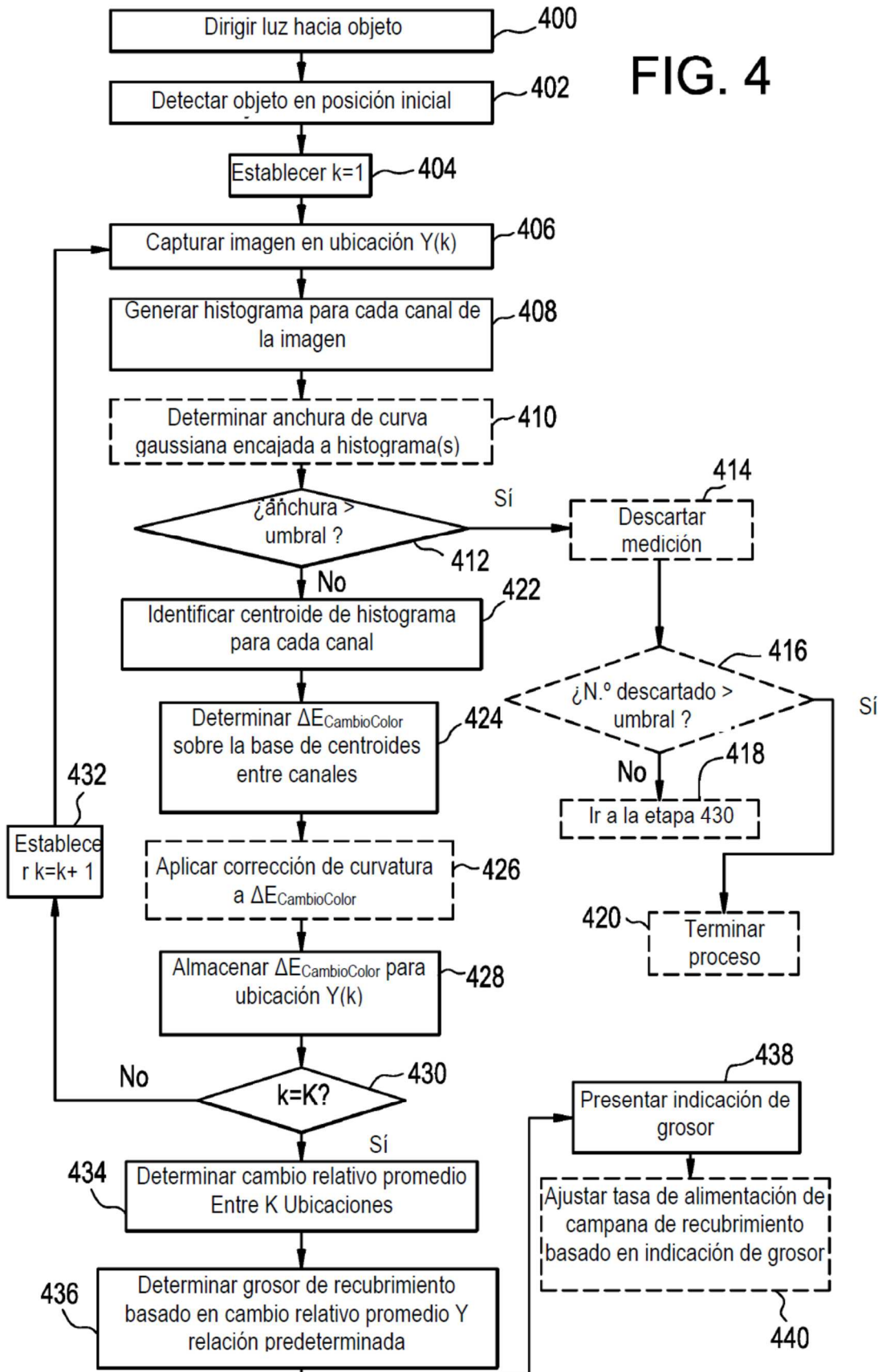


FIG. 5A

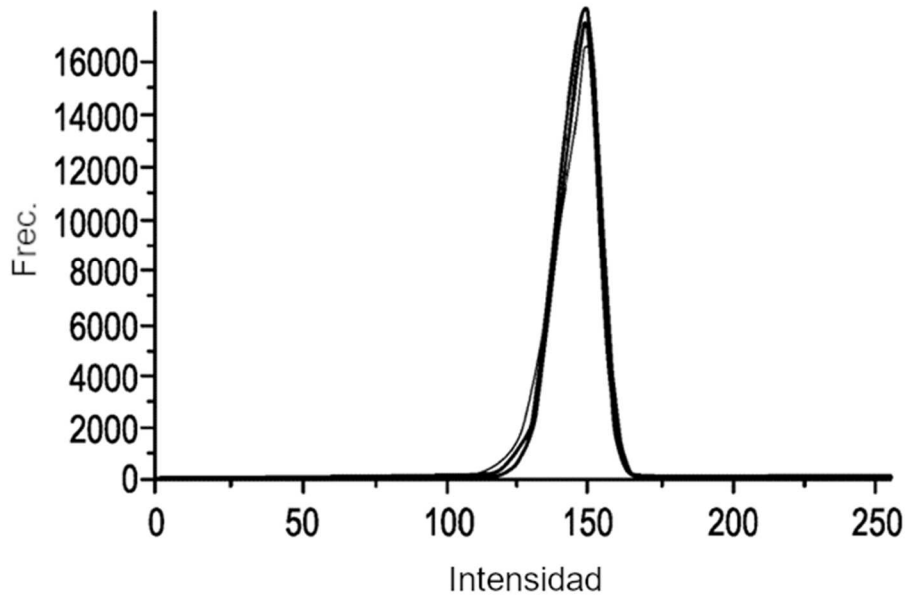


FIG. 5B

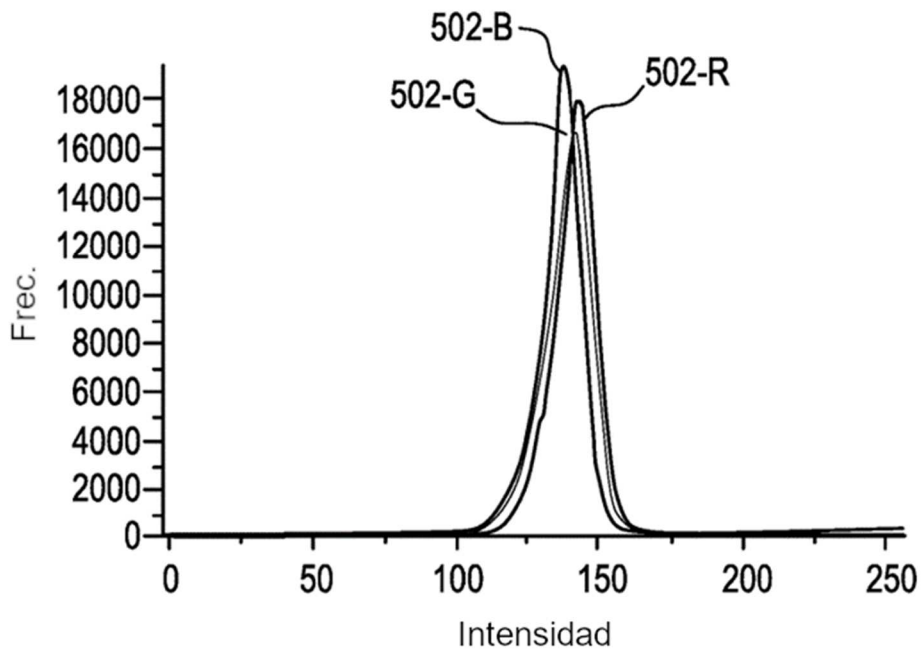


FIG. 6A

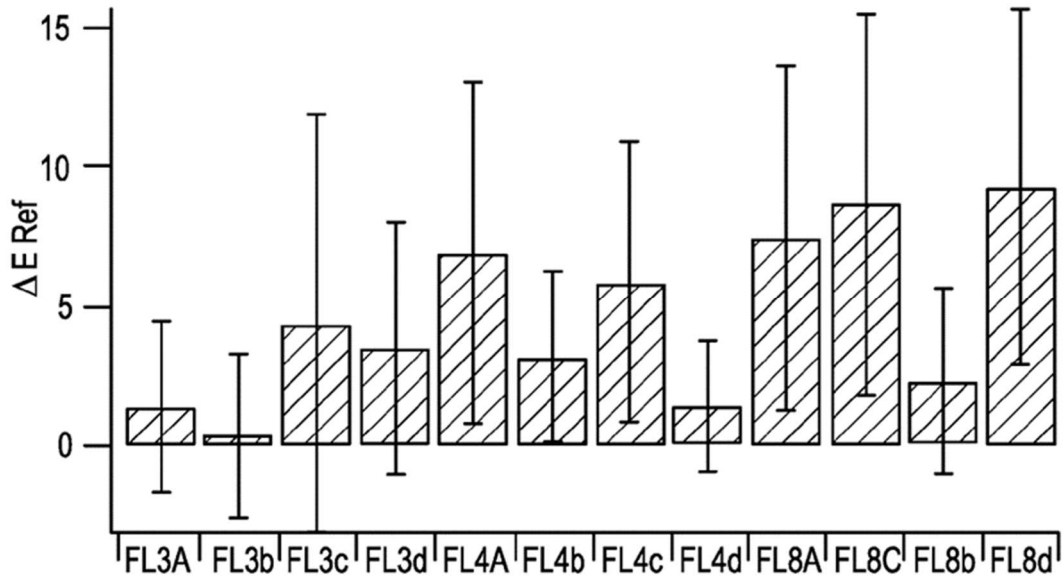


FIG. 6B

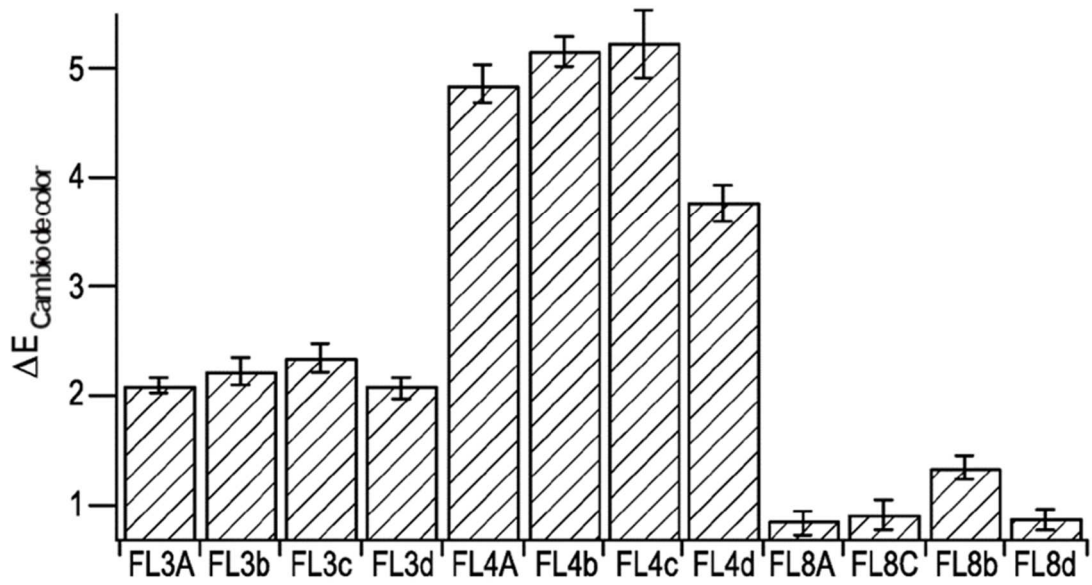


FIG. 6C

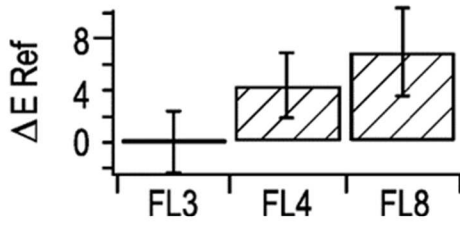


FIG. 6D

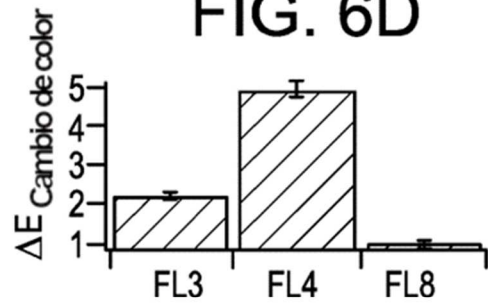


FIG. 6E

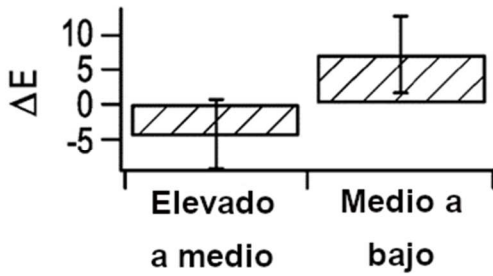


FIG. 6F

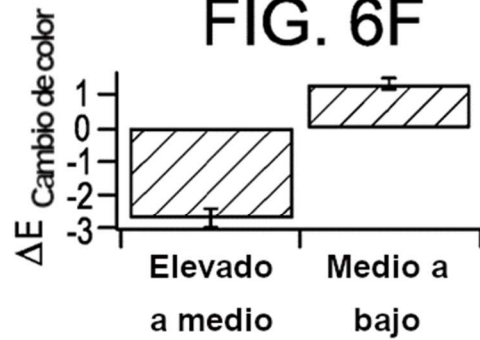


FIG. 6G

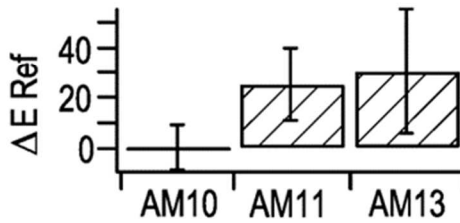


FIG. 6H

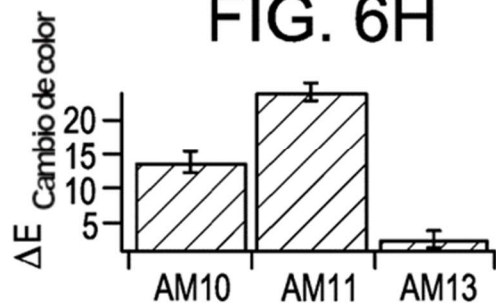


FIG. 6I

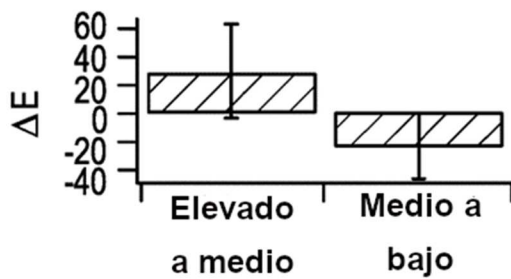


FIG. 6J

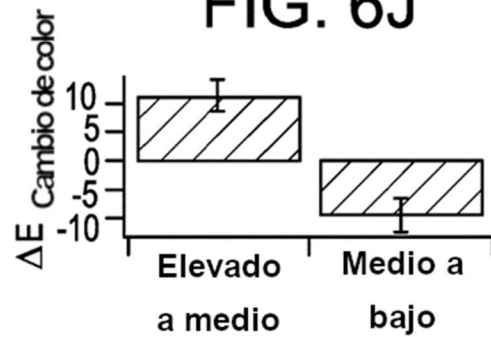


FIG. 7

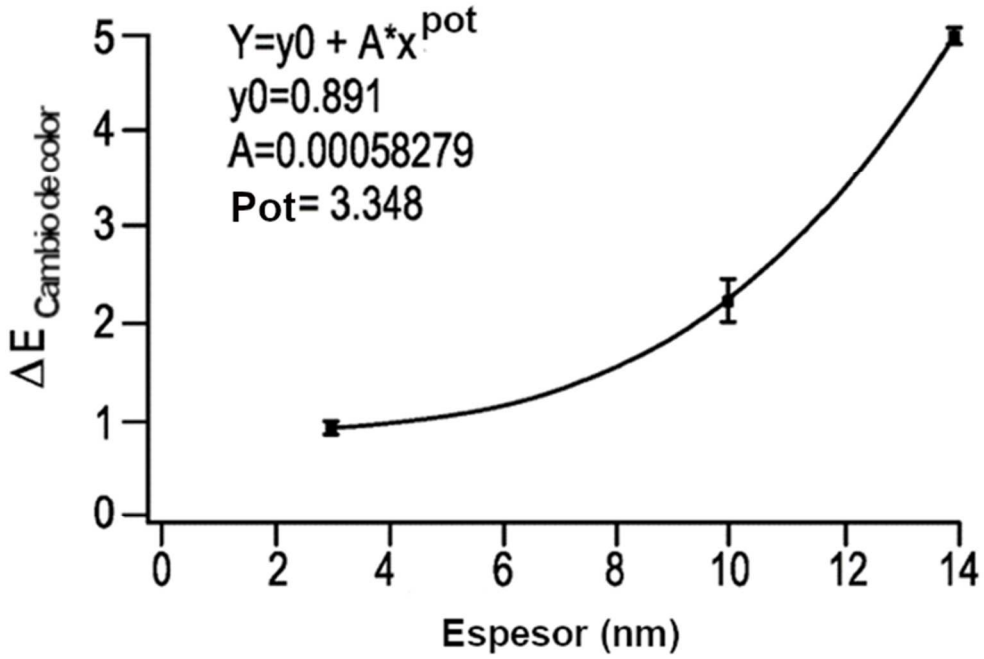


FIG. 8A

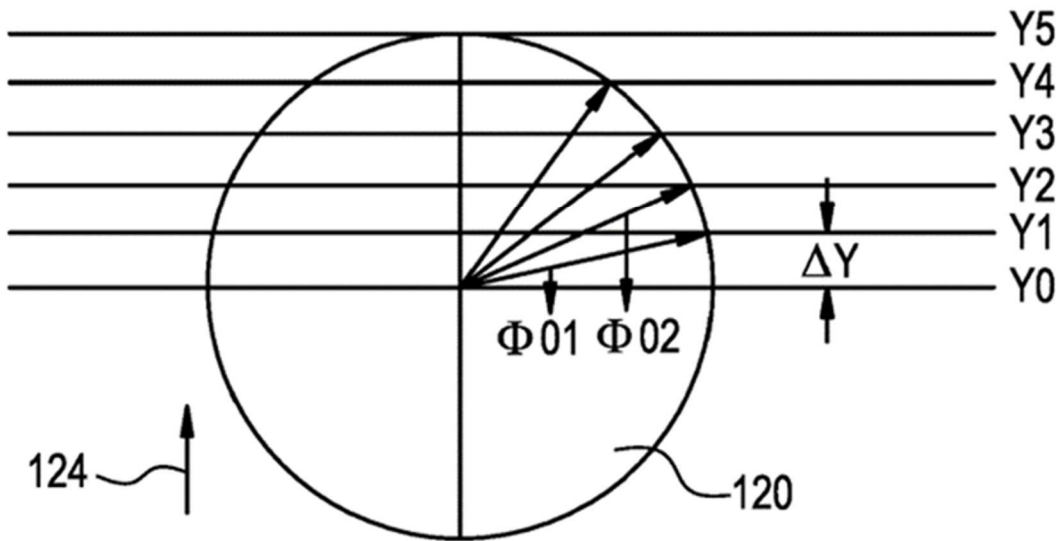


FIG. 8B

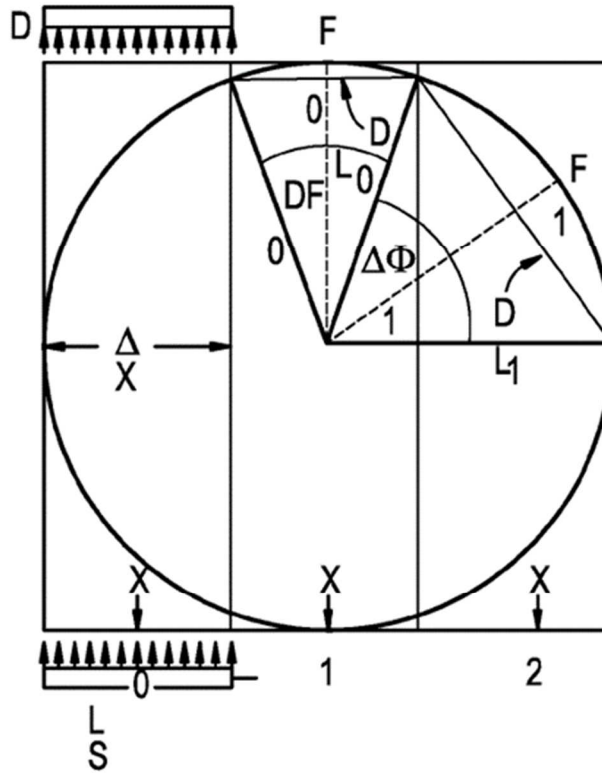


FIG. 9

Resultados de ajuste por Gauss para una botella sin defectos (arañazos u hoyuelos)
 ± una desviación estándar: $y = y_0 + A \cdot \exp \left(-\frac{(x-x_0)^2}{\text{anchura}^2} \right)$

$y_0 = -156.93 \pm 134$
 $A = 38630 \pm 475$
 $x_0 = 133.86 \pm 0.182$
 $\text{anchura} = 18.533 \pm 0.274$

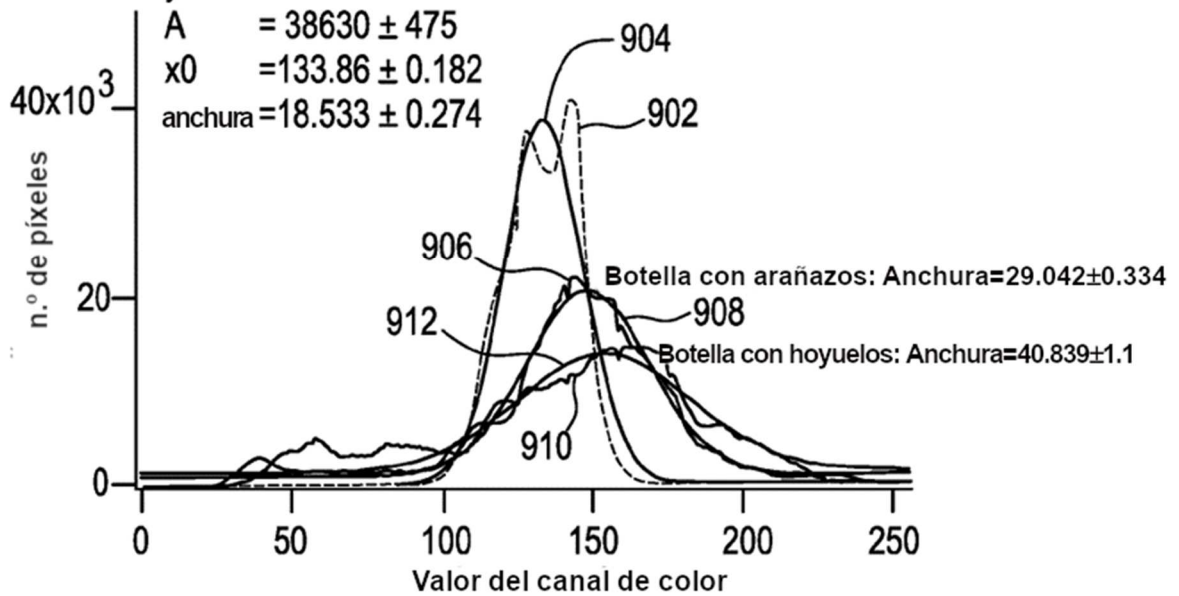


FIG. 10A

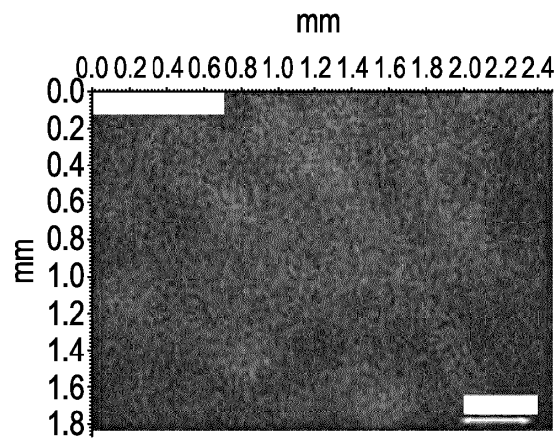


FIG. 10B

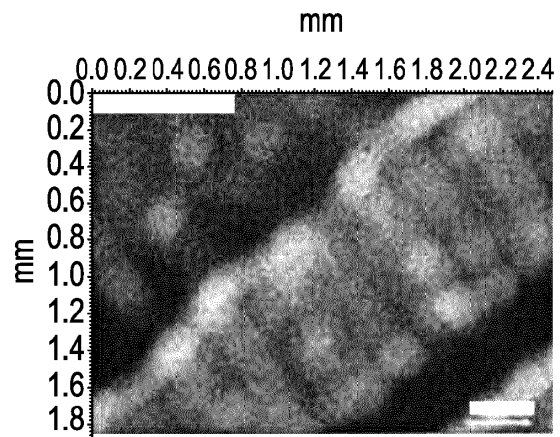


FIG. 10C

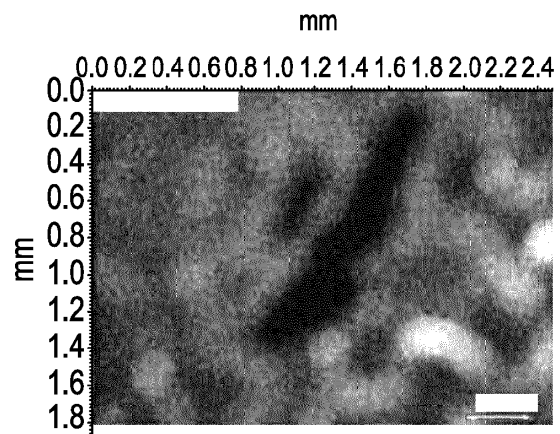


FIG. 10D

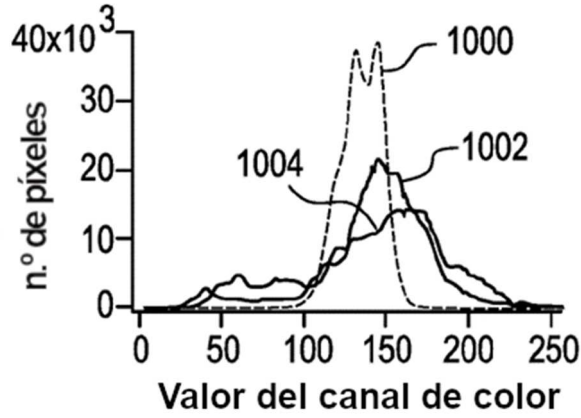


FIG. 10E

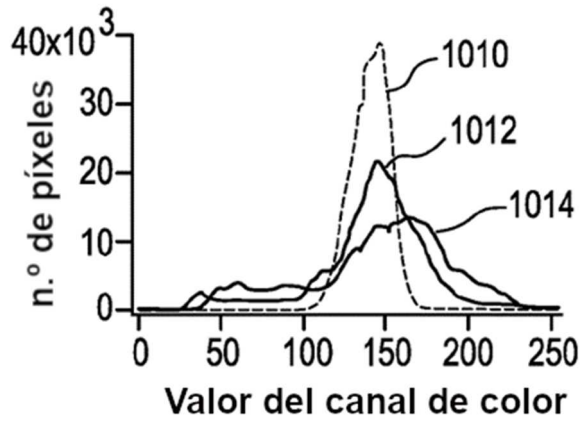


FIG. 10F

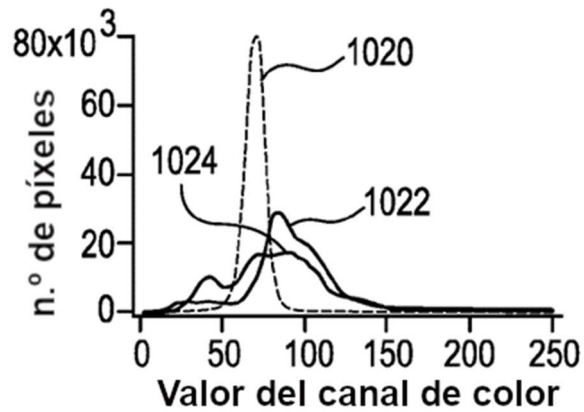


FIG. 11A

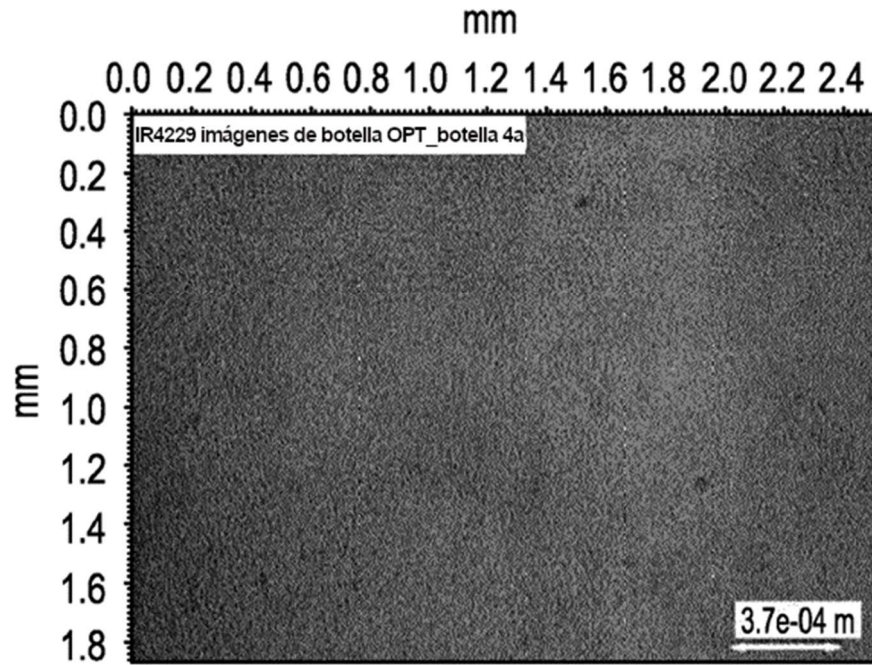


FIG. 11B

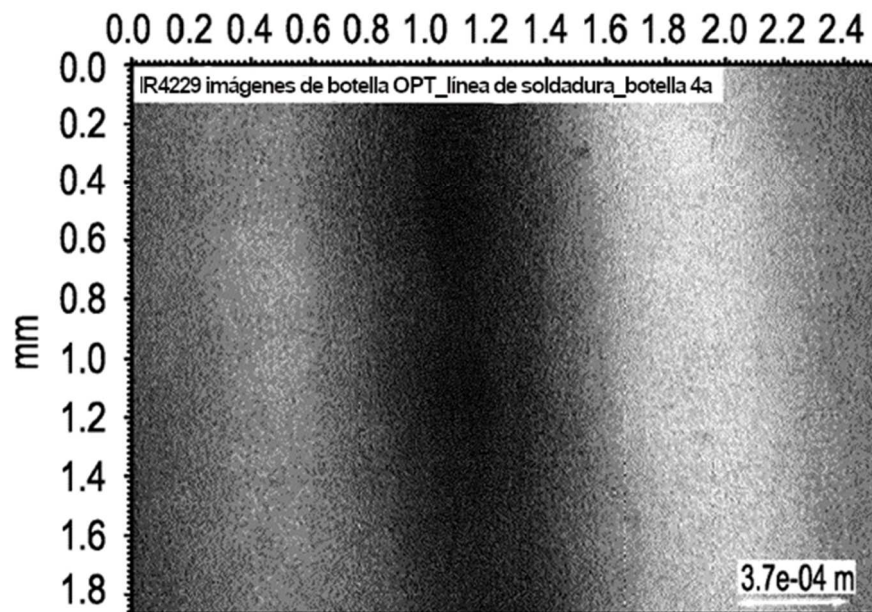


FIG. 11C

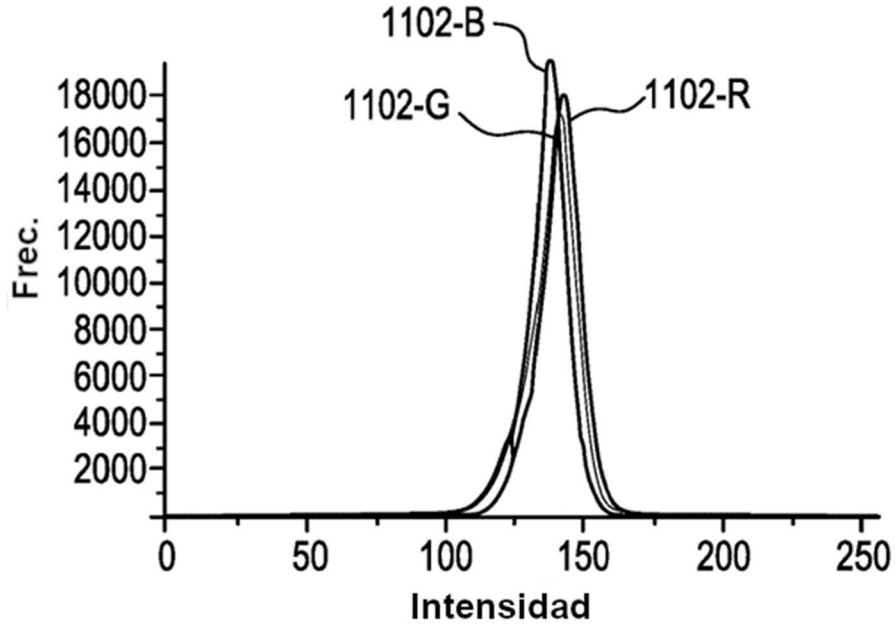


FIG. 11D

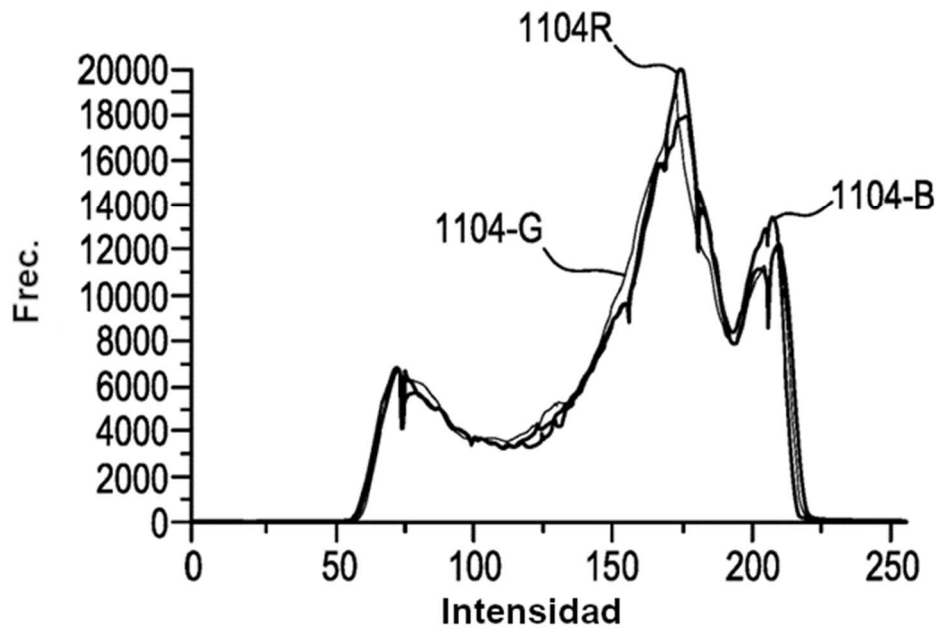


FIG. 12A

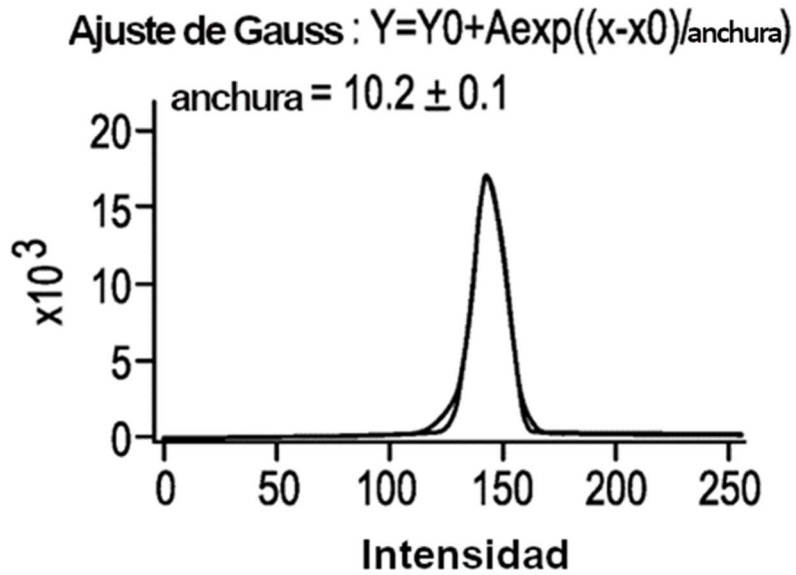


FIG. 12B

