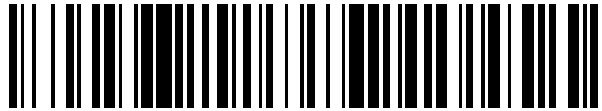


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 436 363**

51 Int. Cl.:

G01B 9/02

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.04.2012 E 12717680 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **28.08.2013 EP 2564154**

54 Título: **Instrumento espectrométrico**

30 Prioridad:

02.05.2011 WO PCT/EP2011/056934

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

30.12.2013

73 Titular/es:

FOSS ANALYTICAL A/S (100.0%)

Foss Allé 1

3400 Hillerød, DK

72 Inventor/es:

FOLKENBERG, JACOB y

LARSEN, HANS

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 436 363 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

Instrumento espectrométrico

La presente invención se refiere a un instrumento espectrométrico que comprende un interferómetro de barrido y, más en concreto, a un instrumento espectrométrico que comprende un interferómetro de barrido que funciona de acuerdo con el principio de Michelson o de acuerdo con un principio derivado del mismo (al que se denomina de manera general en esta especificación interferómetro “de tipo Michelson”).

Los interferómetros de barrido conocidos, como por ejemplo los de tipo Michelson, comprenden generalmente un divisor del haz (que típicamente también incluye un compensador) y dos o más reflectores, tales como espejos o reflectores, estando al menos uno de los reflectores dispuesto para que se pueda trasladar hacia delante y hacia atrás. También pueden estar asociadas al interferómetro lentes colimadoras u otros dispositivos ópticos pero no son fundamentales para su principio de funcionamiento, el cual se basa esencialmente en la presencia de un divisor del haz y de reflectores que se pueden mover con respecto a él.

Se comprende que un interferómetro de barrido se refiere a un sistema óptico en el cual en primer lugar un divisor del haz divide un haz en dos componentes que se recombinan posteriormente para interferir uno con otro después de que cada uno haya atravesado una trayectoria diferente que está delimitado por un respectivo reflector de un par de ellos que tienen el movimiento permitido uno con respecto al otro. A continuación se puede extraer información de los contenidos espectrales de la interferencia, la cual está relacionada con una propiedad de una muestra con la cual ha interactuado el haz.

Cuando se utiliza un interferómetro como este en, por ejemplo, un instrumento espectrométrico para espectroscopía óptica, se lanza al interior del interferómetro un haz de observación consistente en radiación de banda relativamente ancha en una zona de longitud de onda de interés para que choque con el divisor del haz. En este contexto el término “lanzar” hace referencia a la transmisión de un haz desde un último elemento óptico, tal como una fuente de luz, un extremo de fibra óptica, una lente u otro elemento óptico que pueda afectar a la trayectoria o a la forma del haz. Este haz de observación se divide esencialmente en dos partes de igual intensidad en el divisor del haz. Un primer haz es reflejado por el divisor del haz y viaja a lo largo de un primer “brazo” del interferómetro hasta el primer reflector desde donde es reflejado de vuelta al divisor del haz. Un segundo haz es transmitido a través del divisor del haz y viaja a lo largo de un segundo “brazo” hasta el segundo reflector donde también es reflejado de vuelta al divisor del haz para que se solape con el primer haz reflejado. El retardo, δ , es la diferencia entre las longitudes de las trayectorias ópticas de los dos brazos y dependiendo del retardo cada longitud de onda de la fuente espectral puede interferir de manera destructiva o constructiva cuando la luz reflejada en los dos brazos se solapa en el divisor del haz. El patrón de intensidad de la luz que interfiere, que se solapa, en función del retardo se conoce como interferograma. El interferograma es registrado por un detector según se van moviendo el uno o más reflectores para crear excursiones cíclicas de la trayectoria óptica relacionada y por lo tanto una diferencia en la longitud de la trayectoria óptica cíclica entre los haces primero y segundo. Como resultado de esto cada longitud de onda en el haz de observación es modulada a una frecuencia diferente. Se puede extraer entonces información espectral de este interferograma de observación realizando numéricamente una transformada de Fourier (FT).

Cuando se registra un interferograma de observación, en particular cuando se usa la así llamada técnica de FT Rápida, es crítico para evitar errores el muestreo de la salida del detector asociado en posiciones exactas equidistantes del reflector que tiene la traslación permitida.

Se ha convertido en una práctica bien establecida en espectroscopía FT utilizar una fuente monocromática de radiación de longitud de onda λ conocida, tal como por ejemplo un láser, para generar un haz de referencia. Este haz de referencia se emplea en el interferómetro de barrido para determinar las posiciones equidistantes exactas requeridas y un interferómetro FT de este tipo se presenta en la patente US 6.654.125. En este caso, como es habitual, el haz de referencia se lanza al interior del interferómetro de barrido a la vez que el haz de observación y se hace que siga una trayectoria de luz a través de los componentes ópticos del interferómetro que es substancialmente paralela a la seguida por el haz de observación. Como ocurre con el haz de observación, el haz de referencia es dividido por el divisor del haz en dos haces de intensidades substancialmente iguales. Cuando se solapan en el divisor del haz las dos porciones reflejadas del haz de referencia generan un interferograma de referencia que será detectado por un detector asociado. Este interferograma de referencia es senoidal con un periodo de oscilación δ_{per} en el eje de retardo, que está directamente relacionado con la longitud de onda según la expresión: $\delta_{\text{per}} = \lambda/2$ (1)

Dado que la longitud de onda del haz de referencia se conoce con precisión entonces se pueden emplear rasgos que aparecen periódicamente, tales como las posiciones de paso por cero, del interferograma de referencia para determinar con exactitud el desplazamiento incremental y/o la velocidad del reflector que tiene la traslación permitida en el interferómetro. De esta manera, se puede determinar con precisión el periodo de muestreo para el interferograma de observación.

Un problema asociado con el diseño del interferómetro de barrido conocido es que el lanzamiento del haz de referencia al interior del interferómetro requiere componentes ópticos adicionales u obstruye la trayectoria del haz de observación. Por ejemplo, el haz de referencia puede ser lanzado usando espejos periscopios o a través de un agujero en cualquiera de los dispositivos ópticos colimadores para el haz de observación. Sin embargo, en ambos casos, una parte del haz de observación resulta bloqueada. De manera alternativa, el haz de referencia puede ser lanzado al interior del interferómetro usando un espejo dicróico pero esto también produce una reducción en la potencia total del haz de observación a través del interferómetro y también requiere espacio en la trayectoria del haz de observación.

De acuerdo con un primer aspecto de la presente invención se proporciona un instrumento espectrométrico que comprende: un interferómetro de barrido que tiene un divisor del haz para dividir radiación óptica incidente en un haz reflejado y un haz transmitido; una fuente de radiación óptica monocromática para lanzar un haz de referencia al interior del interferómetro para que incida inicialmente en una primera cara del divisor del haz; una fuente de radiación óptica de observación para lanzar un haz de observación al interior del interferómetro para que incida inicialmente en la primera cara del divisor del haz y se solape con el haz de referencia en la primera cara; en el cual las fuentes de radiación operan de forma conjunta para generar un primer ángulo entre trayectorias de propagación de los dos haces en la primera cara que es mayor que un semiángulo de divergencia en el mismo plano que el haz de observación.

Es bien conocido que todos los haces de radiación tienen un ángulo de divergencia que describe la magnitud de un ensanchamiento del haz con la distancia. Se puede considerar, por ejemplo, como el ángulo entre dos direcciones en lados opuestos de un eje de un haz de luz paralelo a la trayectoria del haz y en el mismo plano que el eje en el cual la intensidad de luz típicamente iguala un porcentaje establecido de una intensidad de referencia. Si el haz ha sido colimado usando una lente u otro elemento de enfoque, la divergencia esperada se puede calcular de una manera conocida a partir de dos parámetros: el diámetro, D , del punto más estrecho del haz antes de la lente, y la longitud focal de la lente, f . El semiángulo de divergencia es, como su nombre indica, un ángulo cuya magnitud es la mitad de la magnitud del ángulo de divergencia.

De esta forma, al introducir los haces de referencia y de observación en el interferómetro de tal manera que el ángulo entre sus direcciones de propagación en la primera cara del divisor del haz sobre el cual ambos inciden inicialmente sea mayor que el semiángulo de divergencia que está en el mismo plano que el haz de observación, es posible lanzar el haz de referencia desde fuera del haz de observación para que se solape con el haz de observación en la primera cara del divisor del haz sin necesidad de ningún componente óptico adicional; sin obstruir el haz de observación y sin la necesidad de aumentar el tamaño del divisor del haz y de los otros componentes ópticos.

Además, el ángulo de las trayectorias de los haces de acuerdo con la presente invención proporciona un filtrado espacial del haz de referencia y del haz de observación de manera que se puede diseñar un instrumento en el cual se reduzca de manera significativa o incluso se elimine la radiación de fondo en un detector asociado debida al otro haz.

Provechosamente, de acuerdo con la presente invención se utiliza un ordenador para extraer información espectral del interferograma de observación registrado por un detector asociado y dicho ordenador está específicamente adaptado para compensar de manera matemática los errores de longitud de onda introducidos en la información espectral debidos al ángulo relativo de los haces de referencia y de observación. Esta corrección de la escala de longitud de onda que se aplica en el ordenador proporciona una mayor precisión de las medidas realizadas usando el interferómetro.

De acuerdo con un segundo aspecto de la presente invención se proporciona un método de operar un instrumento espectrométrico que tiene un interferómetro de barrido de acuerdo con el primer aspecto de la presente invención que comprende el paso de lanzar de manera simultánea un haz de referencia y un haz de observación divergente hacia el divisor del haz para que incida inicialmente a una primera cara del mismo, lanzándose los haces para proporcionar en el divisor del haz con un primer ángulo entre sus trayectorias ópticas mayor que un semiángulo de divergencia del haz de observación.

Se describirá ahora una realización de la invención sólo a modo de ejemplo y haciendo referencia a los dibujos de las figuras adjuntas, de las cuales: la Figura 1 ilustra una vista seccionada en el plano X/Y de un interferómetro de tipo Michelson de acuerdo con la presente invención; la Figura 2 ilustra una vista seccionada en el plano Y/Z del interferómetro de tipo Michelson de la Figura 1; la Figura 3 ilustra de forma gráfica restricciones sobre los criterios de diseño en el interferómetro ilustrado en las Figuras 1 y 2; y la Figura 4 ilustra una vista seccionada de una realización adicional de un interferómetro de tipo Michelson de acuerdo con la presente invención.

Considérese ahora una realización de ejemplo de un instrumento 2 espectrométrico de acuerdo con la presente invención el cual, como se ilustra en las Figuras 1 y 2, está ahora configurado para comprender un interferómetro de barrido de tipo Michelson. Como el principio general de funcionamiento de un interferómetro de barrido de este tipo es bien conocido se describirá aquí sólo con el detalle necesario para una comprensión de la presente invención. El

interferómetro de barrido de ejemplo comprende un divisor del haz, en este caso un divisor del haz 4 circular, y dos reflectores que en este caso tienen la forma de espejos 6, 8 planos circulares. Uno de los espejos 6 está montado con la traslación permitida hacia delante y hacia atrás (ilustrada por la flecha de doble cabeza) sobre una distancia mostrada como 2L y el otro espejo 8 es fijo. En la presente realización el divisor del haz 4 está encerrado dentro de una carcasa 10 del interferómetro junto con los dos reflectores 6, 8. El instrumento 2 de ejemplo también comprende una fuente 12 radiación óptica monocromática para generar un haz de referencia y lanzarlo generalmente a lo largo de una trayectoria 14 de propagación, ininterrumpida por elementos ópticos adicionales, hacia una primera cara 4' del divisor del haz 4 del interferómetro (4, 6, 8) y una fuente 16 de radiación óptica de observación para generar un haz 18 de observación divergente y lanzarlo hacia la primera cara 4' del divisor del haz 4 del interferómetro (4, 6, 8) generalmente a lo largo de una trayectoria 20 de propagación entre la fuente 12 y el divisor del haz 4 sin que pasar a través de elementos ópticos adicionales, lo cual afectaría a la dirección de propagación (es decir, a la trayectoria de propagación) de este haz 18. Se apreciará que si otras realizaciones de un instrumento de acuerdo con la presente invención comprenden elementos ópticos u otros componentes intercalados entre las fuentes 12, 16 y el divisor del haz 4 que puedan alterar cualquiera de las trayectorias 20, 14 de propagación, entonces las trayectorias de propagación de acuerdo con la presente invención serán la dirección de propagación del haz apropiado entre el último de dichos elementos ópticos y el divisor del haz 4. El término "lanzar" se interpretará de acuerdo con esto.

Como se sabe, el divisor del haz 4 se considera el primer elemento del interferómetro (4, 6, 8) de barrido y está construido de tal manera que un haz incidente se dividirá en haces de intensidades substancialmente idénticas para atravesar una trayectoria 22 del haz transmitido y una trayectoria 24 del haz reflejado. El espejo 6 móvil está colocado con respecto al divisor del haz 4 de tal manera que devuelva el haz atravesando la trayectoria 22 del haz transmitido de vuelta al divisor del haz 4 cuando se traslada éste hacia delante y hacia atrás. El otro espejo 8, fijo, está situado con respecto al divisor del haz 4 de tal manera que devuelva el haz atravesando la trayectoria 24 del haz reflejado de vuelta al divisor del haz 4 de manera que se solape con el haz devuelto que sigue la trayectoria 22 del haz transmitido y de ese modo se genere un interferograma para el haz de referencia procedente de la fuente 12 del haz de referencia y otro interferograma para el haz de observación procedente de la fuente 16 del haz de observación.

Como parte del instrumento 2 espectrométrico se proporcionan respectivamente correspondientes detectores de radiación 26 del haz de referencia y 28 del haz de observación. El detector 26 de radiación del haz de referencia está situado dentro de la carcasa 10 del interferómetro para detectar un interferograma de referencia generado a partir de los componentes reflejados del haz de referencia lanzado, el cual atraviesa una trayectoria 36 del haz de referencia. De forma similar, el detector 28 de radiación del haz de observación está situado dentro de la carcasa 10 del interferómetro para detectar un interferograma de observación generado a partir de los componentes reflejados del haz de observación lanzado, el cual atraviesa una trayectoria 34 del haz de observación. Provechosamente y de acuerdo con una realización de la presente invención el detector 26 de radiación del haz de referencia puede estar situado fuera del haz de observación que atraviesa la trayectoria 34 del haz desde el divisor del haz 4 hacia el detector 28 de radiación del haz de observación. Esto permite que se maximice la radiación disponible que incide sobre el detector 28 del haz de observación y proporciona un filtrado espacial de la trayectoria 34 del haz de observación y de la trayectoria 36 del haz de referencia en los respectivos detectores 28, 26. Este efecto de filtrado espacial es ventajoso en que se reduce substancialmente e incluso se puede eliminar el ruido de fondo en los respectivos detectores 28, 26 provocado por luz procedente del otro haz (es decir, provocado por luz procedente del haz de observación incidente sobre el detector 26 de referencia y viceversa).

En la presente realización estos detectores 26 del haz de referencia y 28 del haz de observación están situados dentro de la carcasa 10 del interferómetro, pero se observará que uno o más de ellos puede estar situado fuera de la carcasa 10 y acoplado ópticamente, por ejemplo por medio de fibras ópticas apropiadas, al interior de la carcasa 10. De manera similar una de las dos o las dos fuentes 12 de radiación óptica monocromática y 16 de radiación óptica de observación pueden estar situadas fuera de la carcasa 10 y acopladas ópticamente a ella para seguir las trayectorias de los haces como se ilustra en las Figuras 1 y 2 y como se describe en este documento.

Un procesador de datos, tal como por ejemplo un ordenador 30 programado de la manera adecuada, puede estar conectado funcionalmente a cada uno de los detectores 26 del haz de referencia y 28 del haz de observación para recibir señales representativas de los respectivos interferogramas de referencia y de observación detectados, típicamente sometiendo al interferograma de observación a un análisis de Fourier. En la presente realización el ordenador 30 se ilustra como un único dispositivo pero se apreciará que en este contexto el término ordenador puede significar uno o más dispositivos configurados usando programación y técnicas de ingeniería electrónica convencionales para que realicen de manera automática los cálculos deseados. Uno o más de los dispositivos que constituyen el procesador 30 de datos puede ser integral con la carcasa 10 o se puede proporcionar fuera de la carcasa 10 en comunicación local (como se ilustra mediante una conexión fija) o remota (como por ejemplo a través de un enlace de telecomunicaciones, intranet o conexiones de internet).

Cuando el instrumento 2 espectrométrico se usa en espectroscopía óptica se puede colocar una cubeta transparente o translúcida u otro portamuestras 32 en la trayectoria 20 del haz de observación y en este caso se configura para que no altere la dirección general de la trayectoria 20 del haz entre la fuente 16 y la primera cara 4' del divisor del

5 haz 4. En la presente realización, y sólo a modo de ejemplo, el portamuestras 32 está situado antes del divisor del haz 4 (en la dirección de propagación del haz 18 de observación y a lo largo de la trayectoria 20) pero puede estar situado después del divisor del haz 4 o incluso antes del divisor del haz 4 fuera de la carcasa 10 si la fuente 16 de radiación óptica de observación también está situada fuera de la carcasa 10. Algunas longitudes de onda del haz 18 de observación interactuarán más que otras con el material de muestra contenido en el portamuestras 32. Esto produce una variación de intensidad dependiente de la longitud de onda del haz 18 de observación que es característica del material contenido en el portamuestras 32. Esta información espectral se puede extraer mediante una deconvolución del interferograma de observación, por ejemplo por medio de una transformación de Fourier, en el ordenador 30.

10 La presente configuración tiene la ventaja de que el desplazamiento de la porción 22 transmitida del haz de referencia a través del divisor del haz 4 (la doble refracción) cuando se traslada hacia delante y hacia atrás el espejo 6 móvil se minimiza en comparación con otras orientaciones relativas de la fuente 12 de radiación óptica monocromática y de la fuente 16 de radiación de observación. Sin embargo, se apreciará que se pueden usar otras orientaciones relativas de las fuentes 12, 16 alrededor del eje Y (en este caso equivalente a la trayectoria 20 de propagación) sin alejarse de la invención reivindicada.

15 No todas las variables de diseño del interferómetro (4, 6, 8) se pueden seleccionar de manera independiente y el interferómetro 2 de las Figuras 1 y 2 se puede diseñar teniendo en cuenta los criterios de diseño explicados a continuación:

20 Considérese el haz 18 de observación que se está lanzando al interior del interferómetro (4, 6, 8) para que incida inicialmente en la primera cara 4' del divisor del haz 4 desde la fuente 16, la cual, en la presente realización, está configurada y orientada de tal manera que la divergencia del haz es simétrica con respecto a una dirección 20 general de propagación del haz (tal como la definida por la dirección de propagación del centro del haz o del máximo de la distribución de potencia del haz). Este haz 18 de observación tiene un semiángulo α de divergencia, con respecto a esta dirección 20 general de propagación del haz. Al mismo tiempo se está lanzando el haz de referencia al interior del interferómetro (4, 6, 8) a lo largo de la trayectoria 14 del haz de referencia para que incida inicialmente en la primera cara 4' del divisor del haz formando un ángulo, θ , con la trayectoria 20 de propagación del haz 18 de observación en el plano (en este caso, como se ilustra, el plano Z-X) que contiene el semiángulo α de divergencia donde, de acuerdo con la presente invención, $\theta > \alpha$. El desplazamiento del espejo 6 móvil varía entre $-L$ y $+L$. De esta forma, el desplazamiento total del espejo 6 es $L_{tot}=2L$ y el retardo varía entre $-2L$ y $2L$. El retardo máximo es $\delta_{max}=2L$.

30 Cuando el retardo del interferómetro (4, 6, 8) es cero, los componentes devueltos del haz de referencia tendrán un solape máximo en el divisor del haz 4. Sin embargo, dado que θ no es cero, los componentes devueltos del haz de referencia se alejarán unos de otros en el divisor del haz 4 cuando el valor absoluto del retardo aumente por encima de cero. Este es el llamado efecto de doble refracción. Para el mayor retardo absoluto, δ_{max} , la distancia entre los centros de los componentes del haz de referencia devuelto es: **$2L \sin(\theta) = \delta_{max} \sin(\theta)$ (2)**

35 La amplitud del interferograma de referencia viene dada por la integral del solape de la distribución de intensidad del campo eléctrico de los dos componentes del haz de referencia devuelto, lo cual significa que la amplitud es constante sólo si $d_{ref} \gg \delta_{max} \sin(\theta)$, donde d_{ref} es la Anchura de Altura Media (FWHM) del haz de referencia devuelto (es decir, el que atraviesa la parte de la trayectoria 22 de propagación entre el espejo 6 y el divisor del haz 4) sobre el divisor del haz 4. El solape de las magnitudes de las intensidades del campo eléctrico disminuirá debido al efecto de doble refracción, cuando se separan los dos componentes del haz devuelto sobre el divisor del haz 4. Preferiblemente, la fuente 12 de radiación monocromática es una fuente láser que genera un haz de referencia que tiene un único modo espacial y una cintura del haz que está situada sobre la primera cara 4' del divisor del haz 4. De esta manera el frente de fase del haz de referencia se vuelve substancialmente paralelo, lo que maximiza la coherencia espacial y por lo tanto maximiza la doble refracción tolerable.

45 Si el haz de referencia se genera con una gran coherencia espacial, por ejemplo un único modo o un haz limitado de difracción, entonces la doble refracción del haz afectará principalmente a la amplitud del interferograma de referencia. En la práctica, es aceptable una cierta envolvente de amplitud sobre el interferograma de referencia, y el requisito sobre el tamaño del haz de referencia devuelto, d_{ref} , se puede relajar a: **$d_{ref} > \varepsilon \delta_{max} \sin(\theta)$ (3)**, donde ε es una constante determinada de forma empírica, seleccionada de tal manera que la relación señal-ruido en el detector 26 es suficiente para permitir determinaciones basadas en rasgos que se repiten periódicamente, típicamente determinaciones de paso por cero, que se deben realizar a partir del interferograma de referencia.

50 A partir de experimentos sobre una configuración concreta de la invención ilustrada en las Figuras 1 y 2, y sólo a modo de ejemplo, se encontró que $\varepsilon \approx 50$ era un valor razonable, teniendo en cuenta las tolerancias típicas en la óptica y la fabricación. Por ejemplo si el tamaño del haz de referencia devuelto es $d_{ref}=2$ mm y $\theta=10$ grados, el retardo máximo, δ_{max} , debería ser menor que 0,23 mm, para mantener una envolvente de amplitud suficiente del interferograma de referencia.

55 Existe otra limitación de diseño importante entre el semiángulo de divergencia, α , del haz 18 de observación, la resolución espectral, Δv , necesaria del instrumento 2 espectrométrico, y el número de ondas máximo, v_{max} , al cual se

debe alcanzar esta resolución Δv . La resolución es inversamente proporcional al retardo máximo. Este se puede definir como: $\delta_{\max}=1/(\Delta v)$ (4), el límite superior de la divergencia del haz de observación se puede expresar como: $\alpha_{\max}=(\delta_{\max}v_{\max})^{-1/2}$ (5).

5 De esta forma, si, por ejemplo, $\delta_{\max}=0,23$ mm (como en lo anterior) y típicamente el número de ondas máximo $v_{\max}=3000$ cm^{-1} la divergencia del haz aceptable máxima es $\alpha_{\max}=0,085$ rad (ó 4,9 grados). La resolución obtenida en este caso es 22 cm^{-1} – limitada por el movimiento del espejo.

10 El ejemplo anterior ilustra la posibilidad de configurar un interferómetro (4, 6, 8) de barrido con un haz de referencia que tenga un ángulo θ de incidencia en la primera cara 4' del divisor del haz 4 que sea mayor que el semiángulo, α , de divergencia del haz de observación, y todavía obtenga la resolución limitada por el movimiento del espejo (retardo). Sin embargo, también se puede ver que este tipo de diseño es desfavorable para conseguir una gran resolución como se puede apreciar considerando lo siguiente: siguiendo el ejemplo anterior, el ángulo de incidencia del haz de referencia se puede reducir a $\theta=1$ grado, para permitir un retardo máximo de 2,3 mm que corresponde a una mayor resolución de $2,2$ cm^{-1} . Sin embargo, el requisito sobre el límite superior de divergencia del haz de observación es ahora $\alpha_{\max}=0,027$ rad (ó 1,5 grados), de tal manera que $\alpha_{\max}>\theta$. Esto significa que no se puede implementar el diseño de las Figuras 1 y 2, o que no se puede utilizar el ángulo sólido máximo del haz de observación. En el último caso, se reduce la producción de energía de la luz, lo cual reduce la relación señal-ruido en el detector.

20 Los dos ejemplos descritos anteriormente se ilustran en el gráfico general de la Figura 3. El eje x muestra el ángulo de incidencia del haz de referencia láser y el ángulo de divergencia del haz de observación, respectivamente, y el eje y muestra el retardo máximo correspondiente, asumiendo un tamaño del punto del láser de $d=2$ mm y un número de ondas máximo de $v_{\max}=3000$ cm^{-1} . Los diseños de baja y de alta resolución descritos anteriormente se muestran con líneas discontinuas. El gráfico muestra que, para los parámetros usados en este caso, sólo es posible tener un ángulo de incidencia del láser (fuente de referencia) mayor que el ángulo de divergencia si el retardo máximo es menor de aproximadamente 1 mm. Para un retardo mayor, es decir, para una mayor resolución, no es posible aprovechar todo el ángulo sólido del haz 18 de observación.

25 Otra potencial limitación en la precisión del interferómetro 2 de acuerdo con la presente invención, es el aparente cambio de la longitud de onda dado por el periodo del interferograma de referencia comparada con la longitud de onda física, λ , del haz de referencia monocromático. Con un ángulo de incidencia de θ el retardo del haz de referencia es un factor $\cos(\theta)^{-1}$ mayor que el movimiento del espejo 6. De esta forma, el interferograma de referencia contendrá, con un factor de $\cos(\theta)^{-1}$, más pasos por cero (u otros rasgos que aparezcan de manera periódica) que para un haz de referencia con un ángulo de incidencia de cero grados y parecerá una fuente con una longitud de onda de $(\cos(\theta)\cdot\lambda)$.

30 Dado que, a partir del diseño del interferómetro, se conoce θ con una gran precisión, se puede calcular fácilmente un factor de corrección para compensar este aparente cambio en la longitud de onda.

35 En una realización de la presente invención se emplea este factor de corrección en el ordenador 30 cuando se determina el periodo de muestreo para el interferograma de observación.

40 Por ejemplo, de la Patente US2008/0290279, se conoce el corregir la escala de la longitud de onda de información espectral extraída del interferograma basándose en medidas de una muestra de referencia que tenga un patrón espectral que comprenda rasgos con longitud(es) de onda característica(s) conocida(s). En esa Patente se emplea con este fin el patrón espectral asociado con el CO_2 del aire dentro del interferómetro y se registra como un componente del interferograma de observación. De esta manera, de acuerdo con la presente invención la corrección de la escala de la longitud de onda dentro del ordenador 30 se puede hacer usando uno de los patrones espectrales o ambos a partir de muestras de referencia y de un factor dependiente del ángulo de incidencia, θ , del haz de referencia en el divisor del haz 4.

45 En la Figura 4 se ilustra una realización de ejemplo adicional de un instrumento 38 espectrométrico de acuerdo con la presente invención. El instrumento 38 espectrométrico es por lo general de construcción similar al instrumento 2 ilustrado en la Figura 1 y comprende un divisor del haz 40, un espejo 42 fijo y un espejo 44 móvil que están configurados en una geometría de interferómetro de tipo Michelson como la descrita anteriormente en relación con el instrumento 2 de la Figura 1. En la presente realización el divisor del haz 40 y los espejos 42, 44 están en el mismo plano que una fuente 46 de radiación óptica de observación (que en este caso comprende una fuente 48 de emisión y un elemento 50 de enfoque cóncavo que puede operar con ella) y una fuente 52 de radiación de referencia (como por ejemplo una fuente de radiación láser monocromática). En este caso las fuentes 46, 52 de radiación, junto con el detector 54 del haz de observación y el detector 56 del haz de referencia asociados (y, como se ilustra en la presente realización, junto con una cubeta 58 de muestra y un ordenador 30 adecuadamente programado) están situadas fuera de una carcasa 60 del interferómetro en el cual están situados el divisor del haz 40 y los espejos 42, 44. En una implementación de la presente realización de acuerdo con la Figura 2 una o más de las fuentes 46, 48 y detectores 54, 56 estarán ópticamente acoplados a la carcasa del interferómetro por medio de cables de fibra óptica

u otros guiondas apropiados (no mostrados) para permitir una configuración más flexible del instrumento 38 espectrométrico.

5 Como también se describe en relación con el instrumento 2 de la Figura 1, en este caso la fuente 52 de radiación de referencia monocromática genera un haz de referencia y lo lanza a lo largo de una trayectoria 62 de propagación en el interior de la carcasa 60 del interferómetro, la cual no es interrumpida por elementos ópticos adicionales que provocarían una desviación en la trayectoria 62 de propagación, para chocar inicialmente con una primera cara 40' del divisor del haz 40. La fuente 46 de radiación óptica de observación genera un haz 64 de observación divergente para que atraviese una trayectoria 66 de propagación y choque inicialmente con la primera cara 40' del divisor del haz 40 en presencia del haz de referencia. El haz 64 de observación que se lanza al interior del interferómetro (40, 10 42, 44) tiene un semiángulo α de divergencia con respecto a su trayectoria 66 de propagación y la trayectoria 62 de propagación del haz de referencia se proporciona a un ángulo θ con la trayectoria 66 de propagación del haz 64 de observación, donde de acuerdo con la presente invención $\theta > \alpha$.

El instrumento 38 espectrométrico de acuerdo con la segunda realización de la presente invención se ha implementado con los siguientes parámetros de diseño:

15 Fuente 46 de Observación: Longitud focal del espejo 50, $f = 14$ mm; Diámetro de la Fuente 48 de Emisión, $d = 2$ mm; Ángulo de Divergencia, $2\alpha = d/f = 8,20$; Semiángulo de Divergencia, $\alpha = 4,10$.

Fuente 52 de Referencia Monocromática, Láser: Ángulo de Incidencia, $\theta = 18^\circ$.

20 Interferómetro 40, 42, 44: Retardo óptico máximo, $\delta_{\max} = 2L = 2 * 0,24$ mm = 0,048 mm; Número de Ondas Máximo (Observación), $\nu_{\max} = 3300$ cm⁻¹; Divergencia limitada de Resolución, $\alpha_{\max} = (2 * 0,024 * 3300)^{-1/2} = 4,6^\circ$; Asumiendo $\epsilon = 10$, entonces de la ecuación (3), $d_{\text{ref}} = 1,5$ mm.

De esta forma $\alpha_{\max} > \alpha$ y el tamaño del punto láser es mayor de 1,5 mm tal como es requerido por la presente invención.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Un instrumento (2; 38) espectrométrico que comprende: un interferómetro (4, 6, 8; 40, 42, 44) de barrido que tiene un divisor del haz (4; 40) para dividir radiación óptica incidente en un haz reflejado y un haz transmitido; una fuente (12; 52) de radiación óptica monocromática para lanzar un haz de referencia al interior del interferómetro (4, 6, 8; 40, 42, 44) a lo largo de una primera trayectoria (14; 62) de propagación de manera que incida inicialmente sobre una primera cara (4', 40') del divisor del haz (4; 40); una fuente (16; 46) de radiación óptica de observación para lanzar un haz (18; 64) de observación al interior del interferómetro (4, 6, 8; 40, 42, 44) a lo largo de una segunda trayectoria (20; 66) de propagación de manera que incida inicialmente sobre la primera cara (4', 40') del divisor del haz (4; 40) y se solape con el haz de referencia en la primera cara (4', 40'); en el cual las fuentes (12; 16; 52; 46) de radiación operan de forma conjunta para generar un primer ángulo (θ) entre las respectivas trayectorias de propagación primera (14; 62) y segunda (20; 66) en la primera cara (4', 40') que es mayor que un semiángulo (α) de divergencia del haz (18; 64) de observación.
- 15 2. Un instrumento (2; 38) espectrométrico de acuerdo con la reivindicación 1 que comprende además un detector (26; 56) de referencia para detectar un interferograma de referencia generado a partir del haz de referencia lanzado y un detector (28; 54) de observación para detectar un interferograma de observación generado a partir del haz (18; 64) de observación lanzado, donde cada detector (26; 28; 56; 54) está situado fuera de la trayectoria (36; 34; 62; 64) del otro haz.
- 20 3. Un instrumento (2; 38) espectrométrico de acuerdo con la reivindicación 2 que comprende además un procesador (30) de datos conectado funcionalmente para recibir una salida procedente de cada uno de los detectores (26; 28; 56; 54) correspondiente a los interferogramas detectados, donde el procesador (30) de datos está adaptado específicamente para procesar las salidas recibidas para corregir errores en información espectral extraída del interferograma de observación detectado por el detector (28; 54) de observación que son el resultado de haber lanzado el haz de referencia con el primer ángulo (θ).
- 25 4. Un instrumento (2; 38) espectrométrico de acuerdo con la reivindicación 3, en el cual el haz de referencia tiene un diámetro del haz y la fuente (12; 52) de radiación monocromática está configurada para lanzar el haz de referencia con un primer ángulo (θ) correlacionado con el diámetro del haz para conseguir un grado de solape en la primera cara (4', 40') del divisor del haz (4; 40) seleccionado para proporcionar una mínima relación señal-ruido de la salida del detector (26) de referencia cuando el espejo (6) se traslada lo suficiente para permitir la determinación en el procesador (30) de datos de rasgos que se repiten periódicamente a partir del interferograma de referencia.
- 30 5. Un método de operar un instrumento (2; 38) espectrométrico de acuerdo con la reivindicación 1 que comprende el paso de: lanzar simultáneamente un haz de referencia desde la fuente (12; 52) de radiación monocromática y un haz (18; 64) de observación divergente desde la fuente (16; 46) de radiación óptica de observación a lo largo de respectivas trayectorias (14; 20; 62; 66) de propagación hacia la primera cara (4', 40') del divisor del haz (4; 40) del interferómetro (4, 6, 8; 40, 42, 44), lanzándose el haz de referencia a lo largo de su trayectoria (14; 62) de propagación de manera que incida en la primera cara (4', 40') con un primer ángulo (θ) con respecto a la trayectoria (20; 66) de propagación del haz de observación que es mayor que un semiángulo (α) de divergencia del haz (18; 64) de observación.
- 35 6. Un método de acuerdo con la reivindicación 5 que comprende además el paso de procesar en un procesador (30) de datos un interferograma obtenido a partir del haz (18; 64) de observación para corregir información espectral que se puede derivar del mismo en cuanto a errores que son resultado de haber lanzado el haz de referencia con el primer ángulo (θ).
- 40 7. Un método de acuerdo con la reivindicación 6, en el cual la corrección comprende compensar que el haz de referencia tenga una longitud de onda aparente que es diferente de una longitud de onda real en un factor de $\cos(\theta)$.
- 45 8. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 5 a 7 que comprende además los pasos de hacer pasar el haz (18; 64) de observación a través de un material de muestra; y procesar en el procesador (30) de datos el interferograma obtenido a partir del haz (18; 64) de observación para extraer información espectral característica del material de muestra.
- 50

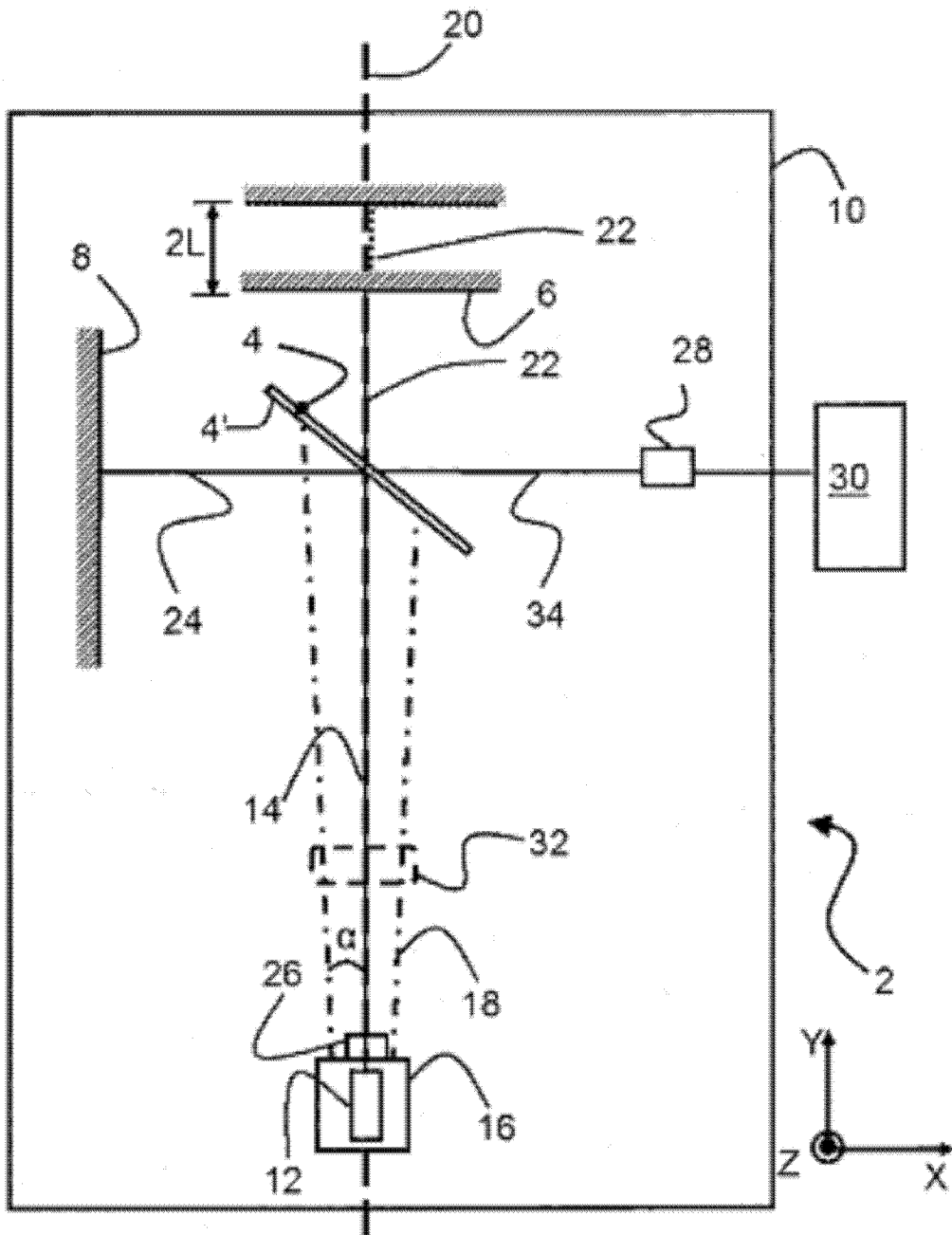


Fig. 1

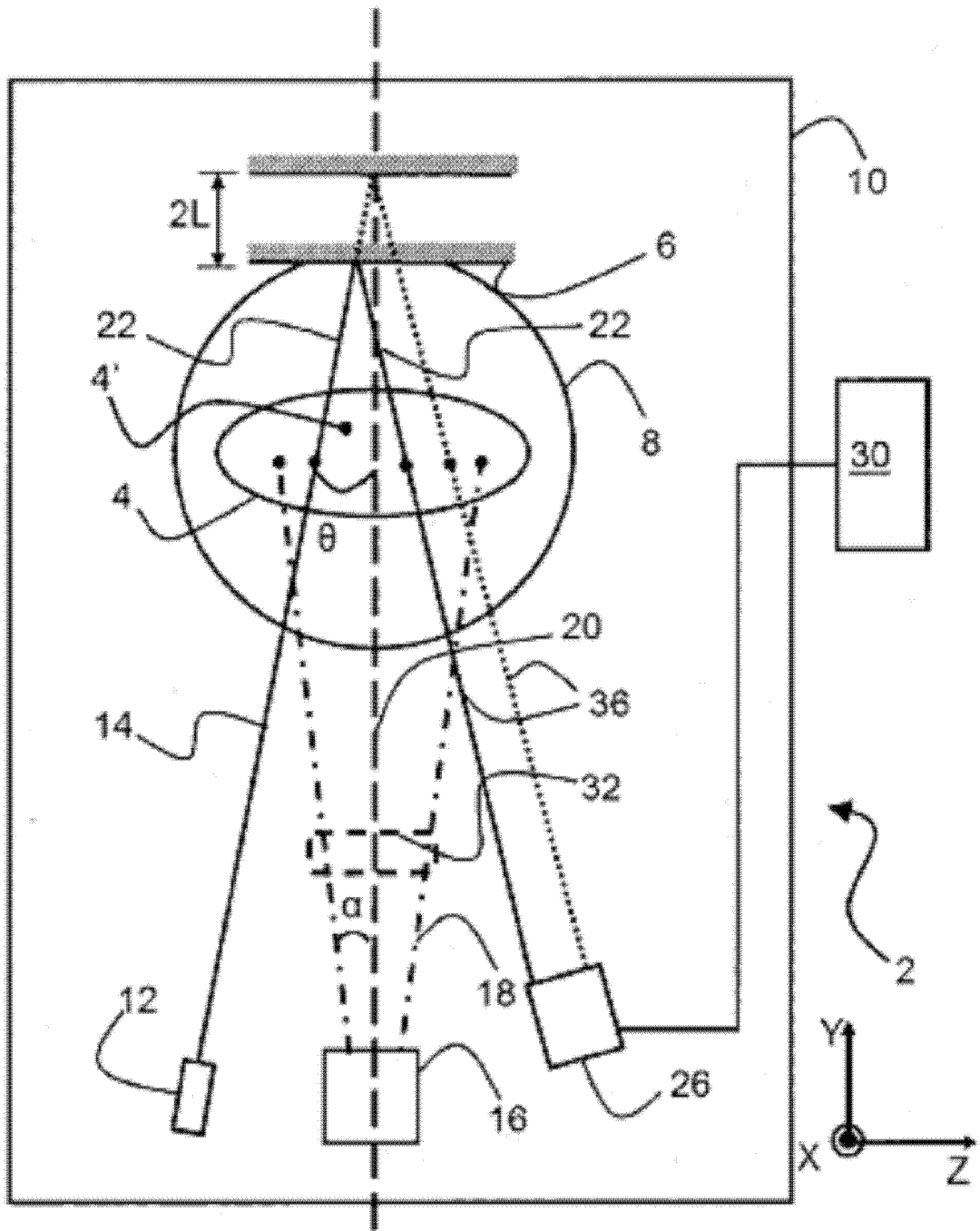


Fig. 2

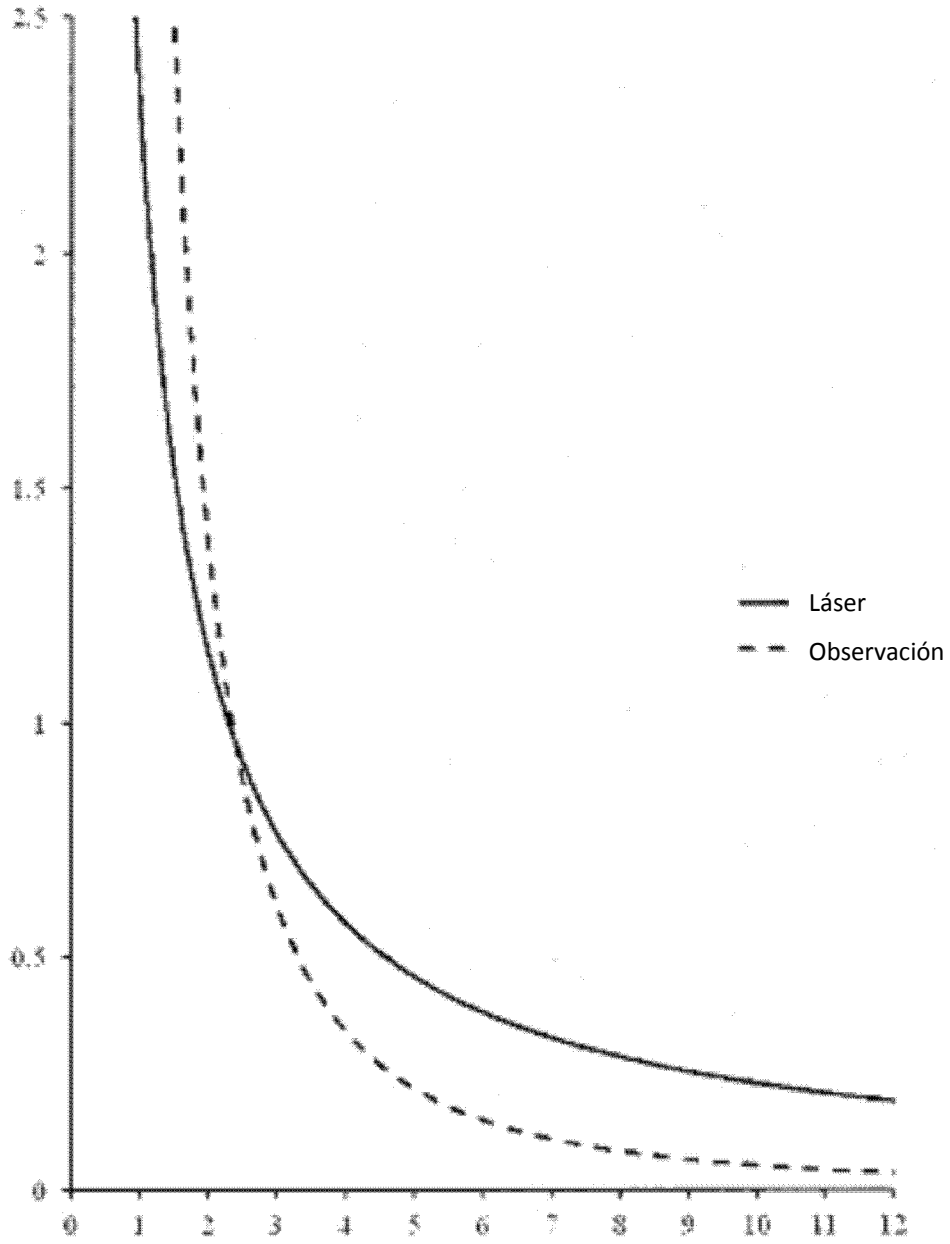


Fig. 3

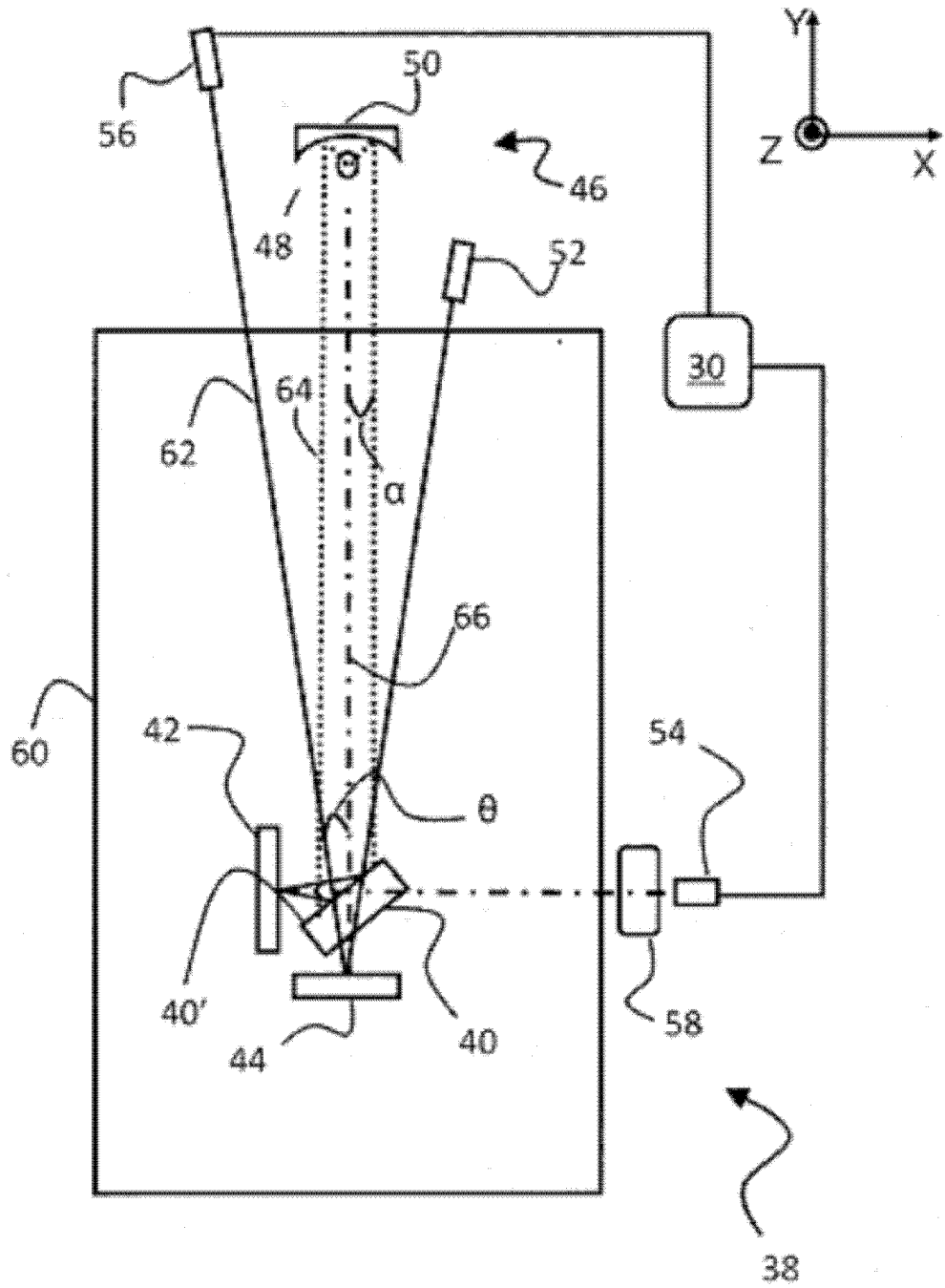


Fig. 4