

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 671 574**

51 Int. Cl.:

G01N 21/35 (2014.01)

F23N 5/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **31.03.2004 PCT/US2004/010048**

87 Fecha y número de publicación internacional: **21.10.2004 WO04090496**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **31.03.2004 E 04749622 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **28.02.2018 EP 1616207**

54 Título: **Método y aparato para la monitorización y el control de combustión**

30 Prioridad:

31.03.2003 US 459108 P

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

07.06.2018

73 Titular/es:

**JOHN ZINK COMPANY, LLC (100.0%)
11920 East Apache St.
Tulsa, OK 74116, US**

72 Inventor/es:

**SAPPEY, ANDREW D.;
HOWELL, JAMES;
HOFVANDER, HENRIK y
MASTERSON, B. P.**

74 Agente/Representante:

MARTÍN DE LA CUESTA, Alicia María

ES 2 671 574 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 y aparato para la monitorización y el control de combustión

5 **Campo técnico**

La presente invención se refiere a un método y a un aparato para la monitorización y el control de un procedimiento de combustión, y más particularmente al uso de espectroscopía de absorción de láser de diodo sintonizable para monitorizar y controlar procedimientos de combustión.

10

Técnica anterior

Un gran porcentaje de la energía eléctrica generada en los Estados Unidos de América se crea en centrales eléctricas de combustión de carbón. El grueso de la producción de electricidad a nivel mundial se basa de manera similar en el carbón como fuente de energía primaria. Es probable que el carbón siga siendo una fuente de energía primaria en el futuro inmediato dadas las preocupaciones medioambientales a largo plazo con el almacenamiento de residuos de operaciones de generación de energía nuclear, y las ineficiencias asociadas con la generación de electricidad por energía solar. Además, existen grandes reservas de carbón a nivel mundial suficientes para al menos 200 años de producción de energía a los ritmos actuales.

20

Sin embargo, hay y seguirá habiendo una alta demanda de reducir las emisiones de contaminantes asociados con la generación de energía eléctrica alimentada por carbón, y de aumentar la eficiencia global del procedimiento de generación alimentado por carbón. De manera tradicional, en centrales eléctricas y otros entornos de combustión industriales, la eficiencia del procedimiento de combustión y el nivel de emisión de contaminación se han determinado de manera indirecta mediante medidas tomadas en muestras de gas extraídas con técnicas tales como fotometría por infrarrojos no dispersivos (NDIR). Los sistemas de toma de muestras por extracción no están particularmente bien adaptados al control en bucle cerrado de un procedimiento de combustión dado que puede introducirse un retraso significativo entre el tiempo de extracción de gas y el análisis final. Además, los procedimientos de extracción dan generalmente como resultado una medida en un único punto que puede ser representativa o no de la concentración real de las especies medidas dentro de lo que puede ser una cámara de procedimiento de combustión altamente variable y dinámica.

25

30

Recientemente se han implementado sensores de especies ópticos basados en láser para abordar las preocupaciones asociadas con técnicas de medición por extracción. Las técnicas de medición basadas en láser pueden implementarse *in situ* y ofrecen la ventaja adicional de una realimentación a alta velocidad adecuada para un control de procedimiento dinámico. Una técnica particularmente prometedora para medir la composición, temperatura y otros parámetros de combustión de gas de combustión es la espectroscopía de absorción con láser de diodo sintonizable (TDLAS). TDLAS se implementa normalmente con láseres de diodo que funcionan en las regiones espectrales del infrarrojo cercano y el infrarrojo medio. Se han desarrollado extensamente láseres adecuados para su uso en la industria de las telecomunicaciones y, por tanto, están fácilmente disponibles para aplicaciones de TDLAS. Se han desarrollado diversas técnicas de TDLAS que son más o menos adecuadas para la detección y el control de procedimientos de combustión. Técnicas comúnmente conocidas son espectroscopía de modulación de longitud de onda, espectroscopía de modulación de frecuencia y espectroscopía de absorción directa. Cada una de estas técnicas se basa en una relación predeterminada entre la cantidad y la naturaleza de luz de láser recibida por un detector tras haberse transmitido la luz a través de una cámara de procedimiento de combustión y haberse absorbido en bandas espectrales específicas que son características de los gases presentes en la cámara de procedimiento o de combustión. El espectro de absorción recibido por el detector se usa para determinar la cantidad de las especies de gas que están analizándose más parámetros de combustión asociados tales como la temperatura.

35

40

45

50

Por ejemplo, Von Drasek, *et al.*, solicitud de patente estadounidense con número de serie 2002/0031737A1, enseñan un método y un aparato de uso de láseres de diodo sintonizables para la monitorización y/o el control de procedimientos a alta temperatura. Von Drasek presenta el uso de espectroscopía de absorción directa para determinar la concentración relativa de numerosas especies de combustión, temperatura y otros parámetros. Calabro, patente estadounidense número 5.813.767, enseña un sistema similar para monitorizar la combustión y los contaminantes desarrollados en una cámara de combustión. Calabro usa una técnica de espectroscopía indirecta en la que un ensanchamiento por efecto Doppler observado de la forma de una característica de absorción sirve como base para el análisis de la temperatura.

55

60

65

Teichert, Fernholz y Ebert han extendido el uso de TDLAS como técnica de análisis de laboratorio conocida a una solución en campo viable adecuada para la detección de determinados parámetros de combustión dentro de la bola de fuego de caldera de una central eléctrica alimentada por carbón de tamaño completo. En su artículo, "Simultaneous *in situ* Measurement of CO, H₂O, and Gas Temperature in a Full-Sized, Coal-Fired Power Plant by Near-Infrared Diode Lasers" (Applied Optics, 42(12):2043, 20 de abril de 2003), los autores presentan una implementación satisfactoria de espectroscopía de absorción directa en una central eléctrica alimentada por carbón y comentan determinados desafíos técnicos resultantes de la escala extremadamente grande y la naturaleza

violenta del procedimiento de combustión de carbón. En particular, las centrales eléctricas alimentadas por carbón típicas tienen diámetros de cámara de combustión de 10-20 metros. Las centrales se alimentan con carbón pulverizado, lo cual da como resultado un procedimiento de combustión que tanto oscurece la transmisión de luz de láser debido a la alta carga de polvo como es extremadamente luminoso. Además, se encuentran diversas alteraciones fuertes en las condiciones de combustión de central eléctrica. La tasa de transmisión global de la luz a través de la cámara de procedimiento fluctuará drásticamente a lo largo del tiempo como resultado de la absorción de banda ancha, dispersión por partículas o direccionamiento de haz debido a fluctuaciones del índice de refracción. También hay una intensa radiación de fondo térmica procedente de las partículas de carbón en combustión que puede interferir con las señales de detector. El entorno fuera de la caldera de central eléctrica también hace que la implementación de un sistema de control o detección TDLAS sea problemática. Por ejemplo, cualquier electrónica, óptica u otro componente de espectroscopía sensible debe situarse lejos del calor intenso, o blindarse y refrigerarse de manera adecuada. Aunque la implementación de un sistema TDLAS es extremadamente difícil en estas condiciones, TDLAS está particularmente bien adaptado para monitorizar y controlar un procedimiento de combustión de carbón. La presente invención se refiere a superar uno o más de los problemas de implementación de TDLAS comentados anteriormente. Se indica que la publicación de ALLEN M G: "DIODE LASER ABSORPTION SENSORES FOR GAS-DYNAMIC AND COMBUSTION FLOWS", MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY, IOP, BRISTOL, GB, vol. 9, n.º 4, abril de 1998 (04-1998), páginas 545-562, XP000780563, ISSN: 0957-0233 da a conocer un aparato de espectroscopía de absorción de láser en el que varios láseres generan cada uno una salida de láser que tiene una longitud de onda, acoplándose cada salida de láser en una fibra individual cuya luz multiplexada se proyecta entonces a través de una cámara y se detecta para su análisis.

Sumario de la invención

Un aspecto de la invención es un aparato de detección según la reivindicación 1. Se proporciona más de un láser de diodo que tienen frecuencias de emisión de láser seleccionadas, y un multiplexor ópticamente acoplado a las salidas de los láseres de diodo estando el multiplexor además ópticamente acoplado a una fibra óptica de lado de paso. Se transmite luz de láser multiplexado a través de la fibra óptica de lado de paso a una óptica de paso operativamente asociada con una cámara de procedimiento que puede ser una cámara de combustión o la caldera de una central eléctrica alimentada por carbón o gas. La óptica de paso está orientada para proyectar la salida de láser multiplexado a través de la cámara de procedimiento. También operativamente orientada con la cámara de procedimiento, hay una óptica de captación en comunicación óptica con la óptica de paso para recibir la salida de láser multiplexado proyectada a través de la cámara de procedimiento. Tal como se usa en el presente documento, "acoplado", "ópticamente acoplado" o "en comunicación óptica con" se definen como una relación funcional entre equivalentes en la que puede pasar luz desde un primer componente hasta un segundo componente o bien a través o bien no a través de componentes intermedios o espacio libre. La óptica de captación está ópticamente acoplada a una fibra óptica que transmite la salida de láser multiplexado a un desmultiplexor. El desmultiplexor desmultiplexa la luz de láser y acopla ópticamente las frecuencias de luz de emisión de láser seleccionadas a un detector siendo el detector sensible a una de las frecuencias de emisión de láser seleccionadas. Opcionalmente, el aparato de detección puede acoplar ópticamente cada láser de diodo a una fibra óptica de entrada correspondiente distinta antes del multiplexor y acoplar ópticamente el detector a una fibra de salida del desmultiplexor. La fibra óptica de lado de paso es una fibra monomodo, y la fibra óptica de lado de captación puede ser una fibra multimodo. Opcionalmente, el aparato de detección puede consistir además en un dispositivo de direccionamiento óptico de lado de paso ópticamente acoplado a la fibra óptica de lado de paso y direccionar la salida de láser multiplexado a más de un par de ópticas de paso y de captación operativamente asociadas con la cámara de procedimiento. El dispositivo de direccionamiento óptico puede ser un conmutador óptico, un divisor óptico u otro aparato de direccionamiento óptico de telecomunicaciones comúnmente disponible en el comercio. Opcionalmente, el aparato de detección puede consistir además en un sistema de procesamiento de datos que recibe entrada del detector y que emplea técnicas de espectroscopía de láser comúnmente conocidas para determinar un parámetro de combustión a partir de los datos de detector. El aparato de detección también puede tener medios para afectar al parámetro de combustión basándose en la salida del sistema de procesamiento de datos. Por ejemplo, el aparato de detección puede proporcionar un control de bucle cerrado de una entrada de combustión tal como flujo de aire, flujo de combustible o adición de catalizador o agente químico cuyo control es sensible al sistema de procesamiento de datos según el parámetro de combustión determinado por el sistema de procesamiento de datos.

El aparato de detección puede usar una red escalonada en el multiplexor o desmultiplexor. Los componentes adicionales del multiplexor o desmultiplexor pueden incluir una guía de onda óptica y una óptica de enfoque colimadora. La red escalonada reflectante acoplada a la óptica colimadora/de enfoque tendrá normalmente una separación de ranuras y ángulo de inclinación (*blaze*) que proporcionan la desmultiplexación simultánea de una pluralidad de intervalos de longitudes de onda de luz ampliamente separadas. Una red escalonada apropiada podrá normalmente multiplexar o desmultiplexar desde longitudes de onda iguales o superiores a 670 nm hasta longitudes de onda iguales o inferiores a 5200 nm. Para lograr esto, la red escalonada funcionará a órdenes de difracción desde el segundo orden hasta al menos el decimocuarto orden. Una red escalonada de este tipo tendrá normalmente una separación de ranuras de aproximadamente 171,4 líneas por mm y un ángulo de inclinación de aproximadamente 52,75 grados.

El aparato de detección tiene el multiplexor ópticamente acoplado a menos de la totalidad de los láseres de diodo e

incluye además un acoplador óptico acoplado a la salida del multiplexor y la salida separada de cualquier láser de diodo no multiplexado. El acoplador óptico se comunicará ópticamente con la óptica de paso a través de una longitud seleccionada de fibra óptica de transmisión. La longitud de la fibra óptica de transmisión puede seleccionarse para minimizar el ruido de modo. Por ejemplo, la fibra óptica de transmisión puede implementarse a una longitud igual o inferior a 3 metros, y fabricarse de fibra óptica Corning SMF 28 lo que garantizará que longitudes de onda inferiores a 1240 nm, en particular 760 nm, no pasan a ser multimodales durante la transmisión a través de la fibra óptica de transmisión.

El aparato de detección también puede consistir en medios para manipular mecánicamente una sección de la fibra óptica de lado de captación para minimizar el ruido de modo de lado de captación. Un ejemplo de unos medios apropiados para manipular mecánicamente una sección de la fibra óptica de lado de captación consiste en un motor que tiene un árbol paralelo al eje longitudinal de la fibra óptica de lado de captación que está unido a la fibra y proporciona un movimiento de torsión alrededor del eje longitudinal. El movimiento de torsión puede consistir en un barrido a través de más 360 grados y menos 360 grados a una frecuencia de al menos 10 Hz para calcular eficazmente el promedio de la señal transmitida y de ese modo reducir el ruido de modo de lado de captación.

Opcionalmente, el aparato de detección puede consistir además en un mecanismo de alineación de lado de captación asociado con la óptica de captación que proporciona la alineación de la óptica de captación con respecto a la dirección de la proyección de la salida de láser multiplexado. El mecanismo de alineación puede aumentar la cantidad de luz de láser recibida por la óptica de captación desde la óptica de paso y de ese modo acoplada a la fibra óptica de lado de captación. El mecanismo de alineación puede consistir en un aparato que permite que la óptica de captación se incline a lo largo de un primer eje y un segundo eje ortogonal al primer eje siendo los ejes tanto primero como segundo sustancialmente ortogonales a la dirección de la proyección de la salida de láser multiplexado. Puede usarse un motor a pasos para inclinar la óptica de captación y puede asociarse adicionalmente un sistema de procesamiento de datos con el mecanismo de alineación de lado de captación y recibir datos del detector relacionados con la intensidad de la salida de láser multiplexado acoplada al detector y hacer que el mecanismo de alineación de lado de captación alinee la óptica de captación. Alternativamente, puede proyectarse un haz de alineación separado a la óptica de captación y usarse como referencia con fines de alineación. Puede implementarse un mecanismo de alineación similar en el lado de paso del aparato de detección para proporcionar la alineación de la óptica de paso y el ajuste de la dirección de la proyección de la salida de láser multiplexado.

Otro aspecto es un método de detección de un procedimiento de combustión, que no forma parte de la invención. El método puede incluir proporcionar luz de láser a múltiples frecuencias de emisión de láser seleccionadas, multiplexar la luz de láser y transmitir la luz de láser multiplexado en una fibra óptica de lado de paso a una ubicación de procedimiento. La ubicación de procedimiento puede ser una cámara de combustión tal como la caldera de una central eléctrica alimentada por gas o carbón. Tras transmitir la luz de láser multiplexado a la ubicación de procedimiento, el método consiste además en proyectar la luz de láser multiplexado a través de un procedimiento de combustión, recibir la luz de láser multiplexado en una fibra óptica de lado de captación, desmultiplexar la luz de láser multiplexado y transmitir una frecuencia de la luz de láser desmultiplexado a un detector. Opcionalmente, el método puede consistir además en determinar un parámetro de combustión a partir de una salida del detector y controlar el procedimiento de combustión según el parámetro de combustión determinado.

Otro aspecto es un aparato de detección de gas por espectroscopía de láser de diodo basado en red escalonada, que no forma parte de la invención. El aparato puede incluir más de un láser de diodo que tienen frecuencias de emisión de láser seleccionadas ópticamente acopladas a una red escalonada de entrada que tiene separación de líneas seleccionada y un ángulo de inclinación seleccionado que proporciona la multiplexación de luz de láser a las frecuencias de emisión de láser seleccionadas. El aparato puede consistir además en una fibra óptica ópticamente acoplada a la salida de la red escalonada y que recibe luz de láser multiplexado de la red escalonada. Además, una óptica de paso está ópticamente acoplada al extremo distal de la fibra óptica estando la óptica de paso operativamente asociada con una cámara de procedimiento que puede ser una cámara de combustión y estando la óptica de paso adicionalmente orientada para proyectar luz de láser a través de la cámara de procedimiento. El aparato consiste además en una red escalonada de salida en comunicación óptica con la óptica de paso teniendo la red escalonada de salida una separación de ranuras seleccionada y un ángulo de inclinación seleccionado para proporcionar la desmultiplexación de luz de láser a las frecuencias de emisión de láser seleccionadas. Además, más de un detector sensible a una de las frecuencias de emisión de láser seleccionadas está ópticamente acoplado a la red escalonada de salida. El aparato de este aspecto de la invención puede consistir además en una óptica de captación en comunicación óptica con la óptica de paso y en comunicación óptica con la red escalonada de salida. Además, una o más ópticas de colimación pueden estar ópticamente acopladas entre la salida de la red escalonada y un detector correspondiente. La red escalonada del aparato de detección de gas por espectroscopía de láser de diodo puede tener una separación de ranuras y un ángulo de inclinación que permiten la (des)multiplexación simultánea de una pluralidad de intervalos de longitudes de onda ampliamente separadas. Una red escalonada apropiada puede (des)multiplexar canales ópticos que tienen longitudes de onda iguales o superiores a 670 nm hasta longitudes de onda iguales o superiores a 5200 nm. Una red escalonada de este tipo funcionará desde el segundo hasta el decimocuarto orden de refracción, y puede tener una separación de ranuras de aproximadamente 171,4 líneas por mm y un ángulo de inclinación de aproximadamente 52,75 grados.

Otro aspecto es un método de detección de un procedimiento de combustión, que no forma parte de la invención. El método puede incluir proporcionar luz de láser a múltiples frecuencias de emisión de láser seleccionadas, multiplexar la luz de láser con una red escalonada, proyectar la luz de láser multiplexado a través de un procedimiento de combustión, desmultiplexar la luz de láser multiplexado con una red escalonada y transmitir una frecuencia de luz de láser desmultiplexado a un detector. Este método puede consistir además en determinar un parámetro de combustión a partir de una salida del detector y controlar el procedimiento de combustión según el parámetro de combustión determinado.

Otro aspecto es un sistema óptico de lado de paso para su uso en espectroscopía de láser de diodo, que no forma parte de la invención. El sistema puede incluir más de un láser de diodo que tienen frecuencias de emisión de láser seleccionadas estando cada láser de diodo acoplado a un extremo de una fibra óptica de entrada distinta. El sistema óptico de lado de paso consiste además en un multiplexor ópticamente acoplado al otro extremo de menos de la totalidad de las fibras ópticas de entrada emitiendo el multiplexor luz de láser multiplexado a una fibra óptica de lado de paso. Normalmente, los láseres de diodo y el multiplexor estarán alojados en una sala climatizada situada de manera remota con respecto a la cámara de procedimiento de combustión. El sistema óptico de lado de paso consiste además en un acoplador ópticamente acoplado al extremo alejado de la fibra óptica de lado de paso y al extremo alejado de una fibra óptica de entrada no multiplexada combinando el acoplador la luz de láser multiplexado y la luz de láser no multiplexado y emitiendo la luz combinada a una fibra óptica de transmisión. Normalmente, el acoplador está ubicado cerca del procedimiento de combustión. El sistema óptico de lado de paso consiste además en una óptica de paso acoplada a la fibra óptica de transmisión. Normalmente, todas las fibras ópticas usadas en el sistema óptico de lado de paso son fibras ópticas monomodo. La longitud de la fibra óptica de transmisión puede seleccionarse para minimizar el ruido óptico. En particular, si se ha multiplexado luz de láser de longitudes de onda relativamente más cortas, por ejemplo de 760 nm, con luz de láser de longitudes de onda relativamente más largas, por ejemplo de 1240 nm - 5200 nm, y se ha transmitido tal haz multiplexado en una fibra óptica de telecomunicaciones comercialmente disponible adecuada que no presenta una alta tasa de pérdidas por curvado y otras pérdidas de transmisión a lo largo de todo el espectro transmitido, las longitudes de onda relativamente más cortas pueden pasar a ser multimodales a lo largo de una distancia extendida. Por tanto, la longitud de la fibra de transmisión puede seleccionarse para minimizar la creación de ruido de modo. Por ejemplo, una longitud de fibra de transmisión de 3 metros o menos, siendo la fibra de transmisión fibra óptica Corning SMF 28, puede transmitir luz de láser con una longitud de onda de 760 nm desde el acoplador hasta la óptica de paso sin la introducción de un comportamiento multimodal significativo.

Otro aspecto es un sistema óptico de lado de captación para su uso en espectroscopía de láser de diodo, que no forma parte de la invención. La invención puede incluir una óptica de lado de captación ópticamente acoplada a una fibra óptica multimodo de lado de captación y medios para manipular mecánicamente una sección de la fibra óptica multimodo de lado de captación para minimizar el ruido de modo de lado de captación. La manipulación mecánica puede consistir en retorcer la fibra óptica multimodo de lado de captación alrededor de su eje longitudinal. Los medios para manipular mecánicamente la sección de la fibra óptica multimodo de lado de captación de la manera anterior pueden consistir en un motor asociado con la fibra óptica multimodo de lado de captación de tal manera que una sección de fibra se mantiene fija con respecto a un posición de árbol del motor y el árbol de motor se barre de manera repetida mediante un movimiento de +360 grados y -360 grados. La frecuencia del barrido de árbol de motor puede ser de al menos 10 Hz para permitir calcular eficazmente un promedio de la señal transmitida y de ese modo reducir el efecto del ruido de modo de lado de captación.

Otro aspecto es un aparato de detección de gas por espectroscopía de láser de diodo, que no forma parte de la invención. El aparato puede incluir tener un láser de diodo con una frecuencia de emisión de láser seleccionada, una óptica de paso acoplada al láser de diodo estando la óptica de paso operativamente asociada con una cámara de procedimiento y orientada para proyectar luz de láser a lo largo de un haz de proyección a través de la cámara de procedimiento. Este aspecto incluye adicionalmente una óptica de captación en comunicación óptica con la óptica de paso para recibir la luz de láser proyectada a través de la cámara de procedimiento y una fibra óptica ópticamente acoplada a la óptica de captación. Además, la óptica de captación está operativamente asociada con un mecanismo de alineación de lado de captación que proporciona la alineación de la óptica de captación con respecto al haz de proyección para aumentar una cantidad de luz de láser recibida por la óptica de captación desde la óptica de paso y acoplada a la fibra óptica y un detector sensible a la frecuencia de emisión de láser seleccionada ópticamente acoplada a la fibra óptica. El mecanismo de alineación de lado de captación puede consistir en medios para inclinar la óptica de captación a lo largo de un primer eje y un segundo eje ortogonal al primer eje siendo los ejes tanto primero como segundo aproximadamente ortogonales al haz de proyección. Los medios para inclinar la óptica de captación pueden ser un motor a pasos. El aparato de detección de gas por espectroscopía de láser de diodo también puede consistir en un haz de luz de alineación proyectado por la óptica de paso y recibido por la óptica de captación y un sistema de procesamiento de datos operativamente asociado con el detector y un mecanismo de alineación de lado de captación que recibe datos desde el detector relacionados con la intensidad del haz de alineación y provocando además que el mecanismo de alineación de lado de captación alinee la óptica de lado de captación con el haz de proyección para maximizar la intensidad del haz de alineación acoplado al detector. El aparato de detección de gas por espectroscopía de láser de diodo de este aspecto de la invención puede consistir además en un mecanismo de alineación de lado de paso que proporciona la alineación de la óptica de paso y el ajuste de la dirección del haz de proyección. La óptica de paso puede implementarse sustancialmente tal como se

describió anteriormente para la óptica de captación.

Otro aspecto es un método de alineación de un sistema óptico de detección de gas por espectroscopía de láser de diodo, que no forma parte de la invención. El método puede incluir proporcionar un haz de luz de alineación, proyectar el haz de alineación a través de una cámara de procedimiento, recibir el haz de alineación con una óptica de captación, estando la óptica de captación operativamente asociada con la cámara de procedimiento. El método consiste además en acoplar ópticamente el haz desde alineación de la óptica de captación hasta un detector a través de una fibra óptica y determinar la intensidad del haz de alineación acoplado desde la óptica de captación hasta la fibra óptica. Además, el método consiste en alinear la óptica de captación para maximizar la intensidad del haz de alineación acoplado desde la óptica de captación hasta la fibra óptica. El método de alineación de un sistema óptico de detección de gas por espectroscopía de láser de diodo puede consistir además en inclinar la óptica de captación a lo largo de un primer eje y un segundo eje ortogonal al primer eje. Alternativamente, el haz de alineación puede proyectarse por una óptica de paso y la óptica de paso puede alinearse igualmente para maximizar adicionalmente la intensidad del haz de alineación acoplado desde la óptica de captación hasta la fibra óptica.

Otro aspecto es un método de detección de NO en un procedimiento de combustión con espectroscopía de absorción de láser de diodo sintonizable, que no forma parte de la invención. El método de detección de NO puede incluir proporcionar luz de láser a una longitud de onda de aproximadamente 670 nm, transmitir la luz de láser en una fibra óptica de lado de paso hasta una ubicación de combustión, proyectar la luz de láser a través de un procedimiento de combustión y recibir la luz de láser en una fibra óptica de lado de captación. El método consiste además en transmitir la luz de láser en la fibra óptica de lado de captación hasta un detector y generar una señal desde el detector relacionada con la luz de láser transmitida al detector. Además, el método consiste en calcular una concentración de NO₂ a partir de la señal y determinar una concentración de NO a partir de la concentración de NO₂ calculada. El método de detección de NO puede implementarse proporcionando luz de láser a una longitud de onda de 670 nm al producir luz de láser con una longitud de onda de aproximadamente 1340 nm con un láser de diodo y doblar la frecuencia de la luz de láser en una guía de onda con combinación periódica con cuasi-coincidencia de fase. Una guía de onda adecuada es una guía de onda de niobato de litio con combinación periódica con cuasi-coincidencia de fase.

Breve descripción de los dibujos

La figura 1 es un diagrama esquemático de un aparato de detección.

La figura 2 es un diagrama esquemático de un aparato de detección de la presente invención que presenta componentes ubicados de manera remota ópticamente acoplados a componentes cerca de la cámara de combustión.

La figura 3 es una ilustración de un aspecto de la presente invención que presenta múltiples redes de detección.

La figura 4 es una ilustración de un aparato de detección de gas de un único haz de la técnica anterior.

La figura 5 es una ilustración de un aparato de detección de gas de múltiples haces de la técnica anterior.

La figura 6 es una ilustración del uso de una red escalonada en la presente invención.

La figura 7 es una ilustración de un aparato de detección de gas por espectroscopía de láser de diodo basado en red escalonada de la presente invención.

La figura 8 es una ilustración de un sistema óptico de lado de paso adecuado para minimizar el ruido de modo.

La figura 9 es una ilustración de un aparato de detección de gas acoplado a fibra.

La figura 10 es una ilustración de luz perdida entre ópticas de paso y de captación.

La figura 11 es una ilustración del cono de aceptación angular de un sistema de fibra óptica.

La figura 12 es un diagrama esquemático de un mecanismo de alineación de la presente invención.

Descripción detallada de la realización preferida

Aparato de detección

Tal como se muestra en la figura 1 de una realización, que no forma parte de la presente invención, se proporciona un aparato 10 de detección adecuado para la detección, monitorización y control de un procedimiento de combustión. El aparato 10 de detección realiza la espectroscopía de absorción de láser de diodo sintonizable (TDLAS) usando luz de láser desde una serie de láseres 12 de diodo sintonizables que emiten láser a frecuencias

seleccionadas en el espectro del infrarrojo cercano y el infrarrojo medio. La salida de cada láser 12 de diodo sintonizable se acopla a una fibra óptica individual que puede ser una fibra 14 óptica monomodo y dirigirse hacia un multiplexor 16. Tal como se usa en el presente documento, “acoplado”, “ópticamente acoplado” o “en comunicación óptica con” se definen como una relación funcional entre equivalentes en la que puede pasar luz desde un primer componente hasta un segundo componente o bien a través o bien no a través de componentes intermedios o espacio libre. Dentro del multiplexor 16 la luz de láser de algunas o todas de las frecuencias generadas se multiplexa para formar un haz de sonda multiplexado que tiene múltiples frecuencias seleccionadas. El haz de sonda multiplexado se acopla a una fibra 18 óptica de lado de paso y se transmite a una óptica 20 de paso o colimador operativamente asociado con una cámara de procedimiento que, en la figura 1, se muestra como una cámara 22 de combustión.

La óptica 20 de paso está orientada para proyectar el haz de sonda multiplexado a través de la cámara 22 de combustión. A través de la cámara 22 de combustión en comunicación óptica con la óptica 20 de paso hay una óptica 24 de captación. Preferiblemente, la óptica 24 de captación está sustancialmente opuesta a la óptica 20 de paso y está operativamente asociada con la cámara 22 de combustión. La óptica 24 de captación está situada y orientada para recibir el haz de sonda multiplexado proyectado a través de la cámara 22 de combustión. La óptica 24 de captación está ópticamente acoplada a una fibra 26 óptica de lado de captación que transmite la parte del haz de sonda multiplexado que se recibe por la óptica 24 de captación a un desmultiplexor 28. Dentro del desmultiplexor 28 se desmultiplexa la parte del haz de sonda multiplexado recibida por la óptica 24 de captación y se acopla cada longitud de onda de luz de láser desmultiplexado a una fibra 30 óptica de salida. Cada fibra 30 óptica de salida está a su vez ópticamente acoplada a un detector 32, que normalmente es un fotodetector sensible a una de las frecuencias seleccionadas de luz de láser generada y multiplexada para formar el haz de sonda. Los detectores 32 generan una señal eléctrica basándose en la naturaleza y cantidad de luz transmitida al detector 32 a la frecuencia de detector. La señal eléctrica de cada detector 32 se digitaliza normalmente y se analiza en un sistema 34 de procesamiento de datos. Tal como se comenta en detalle a continuación, los datos digitalizados y analizados pueden usarse para detectar parámetros físicos dentro de la cámara de procedimiento incluyendo, pero sin limitarse a, las concentraciones de diversas especies de gases y la temperatura de combustión dentro de la cámara 22 de combustión. El sistema 34 de procesamiento de datos puede usarse además para enviar señales a través de un bucle 36 de realimentación a un aparato 38 de control de combustión y de ese modo controlar de manera activa parámetros de procedimiento seleccionados. En el caso de un procedimiento de combustión, los parámetros de procedimiento controlados pueden incluir tasas de alimentación de combustible (por ejemplo, carbón pulverizado); tasas de alimentación de oxígeno y tasas de adición de catalizador o agente químico. El uso de acoplamiento de fibra óptica de los componentes electrónicos y ópticos en los lados tanto de paso como de captación del aparato 10 de detección permite ubicar aparatos delicados y sensibles a la temperatura tales como los láseres 12 de diodo sintonizables, los detectores 32 y el sistema 34 de procesamiento de datos en una sala de control que tiene un entorno de funcionamiento estable. Por tanto, sólo las ópticas 20, 24 de paso y de captación relativamente robustas necesitan estar situadas cerca del entorno hostil de la cámara 22 de combustión.

La figura 2 representa esquemáticamente la colocación de componentes global de un sistema 40 de detección multiplexado, acoplado con fibra. El sistema 40 de detección consiste generalmente en un bastidor 42 de sistema, una caja 44 de conexiones, un cabezal 46 de transmisor que tiene ópticas 48 de paso, un cabezal de receptor que tiene ópticas 52 de captación y fibras ópticas de conexión. El bastidor 42 de sistema está preferiblemente ubicado en una sala de control remota situada a una distancia, por ejemplo un kilómetro, de la cámara 54 de combustión. La sala de control tendrá normalmente un entorno moderado. El bastidor 42 de sistema contiene los láseres 56, detectores 58, multiplexores 60 de longitud de onda y desmultiplexores 62 de longitud de onda. El bastidor 42 de sistema también aloja la electrónica de sistema y el software de control (no mostrados en la figura 2). El bastidor 42 de sistema puede alojar opcionalmente una fuente 64 de luz de alineación.

Las fibras ópticas que conectan el bastidor 42 de sistema con la caja 44 de conexiones son normalmente fibra óptica de telecomunicaciones monomodo convencional. Este tipo de fibra es económico, está fácilmente disponible, presenta bajas pérdidas y permite dirigir la luz de láser a diversos componentes de telecomunicaciones comercialmente disponibles para manipular la luz, tales como ópticas de conmutador, divisores y multiplexores por división de longitud de onda. Sin acoplamiento por fibra óptica, la luz de láser tendría que dirigirse a través de espacio libre todo el trayecto hasta la cámara 54 de combustión, lo cual sería muy difícil de implementar o, alternativamente, tendrían que situarse componentes ópticos y electrónicos sensibles en estrecha proximidad de la cámara 54 de combustión.

También se muestra en la figura 2 una caja 44 de conexiones. La caja 44 de conexiones es un cerramiento reforzado ubicado cerca de la caldera. La caja 44 de conexiones contiene ópticas de conmutador, divisores y acopladores (de manera colectiva, 66) que pueden usarse tal como se comenta a continuación para dirigir las señales ópticas a múltiples pares de cabezales de transmisor-receptor.

Un tercer grupo de componentes de sistema tal como se muestra en la figura 2 son los cabezales 46, 50 de transmisor y receptor. Las ópticas y electrónicas en los cabezales 46, 50 de transmisor y receptor deben convertir la luz en la fibra 68 en un haz colimado, dirigir el haz de manera precisa a través de la cámara 54 de combustión, capturar el haz en el lado alejado de la cámara 54 de combustión y acoplar el haz en la fibra 70. La elección de

5 ópticas para lograr esto viene determinada por la distancia de transmisión, la turbulencia de la zona de combustión, su efecto sobre la calidad del haz transmitido y el tamaño de núcleo de la fibra 70. Preferiblemente, el diámetro de núcleo de fibra es de 50 micrómetros, lo cual es un compromiso: un núcleo mayor capturará más cantidad de la luz de láser pero también mucha más de la luz de fondo. El acoplamiento con fibra en el lado de captación (receptor) tiene varias ventajas. En particular, sólo se enfoca en la fibra 70 luz en la misma ubicación que la luz de láser y que se desplaza en la misma dirección. Esto reduce drásticamente la cantidad de luz de fondo que se detecta. En una realización alternativa, puede capturarse luz en una de varias fibras receptoras y un conmutador óptico u otro dispositivo de direccionamiento óptico puede seleccionar luz de una fibra para direccionarla a los detectores 58.

10 El uso de acoplamiento por fibra en el lado de captación requiere que las tolerancias de alineación de las ópticas tanto de transmisor como de receptor puedan mantenerse con precisión (menos de 0,5 miliradianes para el apuntamiento tanto de transmisor como de receptor). El sistema de alineación comentado a continuación hace que resulte viable cumplir estas tolerancias en un entorno duro de central eléctrica. Preferiblemente, las ópticas 48, 52 tanto de paso como de captación se diseñan de manera personalizada y se realiza la corrección de aberraciones para longitudes de onda desde 660 nm hasta 1650 nm de modo que pueden transmitirse y recibirse eficazmente múltiples señales de láser al mismo tiempo.

Aparato de detección con múltiples conjuntos de ópticas de detección

20 Haciendo de nuevo referencia a la figura 1, se representa esquemáticamente una realización que presenta más de un conjunto de ópticas 20 de paso y ópticas 24 de captación asociadas con una única cámara 22 de combustión. El haz de sonda multiplexado puede direccionarse mediante un dispositivo de direccionamiento que, tal como se muestra en la figura 1, puede ser un conmutador 72 óptico para cada conjunto de ópticas 20 de paso. Los dispositivos de direccionamiento adecuados incluyen conmutadores ópticos que pueden implementarse para

25 direccionar el haz de sonda con atenuación mínima a cada conjunto de ópticas de paso/de captación en una secuencia predeterminada o un divisor óptico que direcciona simultáneamente una parte fraccional del haz de sonda multiplexado a cada conjunto de ópticas.

Puede emplearse un dispositivo de direccionamiento óptico similar que, en la figura 1, se muestra como un conmutador 74 óptico multimodo en el lado de captación del sistema para direccionar la parte del haz de sonda multiplexado recibida por cada óptica 24 de captación al desmultiplexor 28 de lado de captación. Aunque la realización representada en la figura 1 sólo muestra dos conjuntos de ópticas de paso y de captación, el sistema puede emplear cualquier número de conjuntos ópticos de paso y de captación. El uso de acoplamiento por fibra y un haz de sonda (des)multiplexado en los lados tanto de paso como de captación del sistema permite implementar

30 múltiples conjuntos de ópticas de paso y de captación con un conjunto de láseres 12 y detectores 32. Sin la incorporación de técnicas de multiplexación óptica, se necesitarían conjuntos independientes de láseres, detectores y cables de fibra, todos ellos requiriendo calibración, para cada par de transmisor/receptor. Tal como se comenta en detalle a continuación, múltiples pares de transmisor/receptor permiten la implementación de una o más redes de detección bidimensionales por toda la cámara 22 de combustión o en otra parte, tal como para detectar un procedimiento de gas aguas abajo. En la figura 3 se muestra una ilustración esquemática de dos redes de detección altamente simplificadas, una red 76 de detección de bola de fuego y una red 78 de detección aguas abajo. Además, la naturaleza acoplada por fibra de la presente invención permite usar componentes de telecomunicaciones fácilmente disponibles con un efecto positivo. Por ejemplo, puede usarse un conmutador de fibras ópticas para direccionar el haz de sonda multiplexado a diferentes ubicaciones para su medición. Hay conmutadores ópticos 1 X N, siendo N hasta 8, fácilmente disponibles como componentes comercialmente de una variedad de proveedores. Pueden pedirse a medida conmutadores con N de hasta 16.

Pueden usarse conmutador y múltiples pares de ópticas de paso y de captación para el análisis por sonda en serie de una especie de gas en diferentes ubicaciones a través de toda la cámara de combustión. Para situaciones en las que resultados en promedio son suficientes, el análisis por sonda en serie de diferentes trayectorias de haz es aceptable. Sin embargo, determinadas aplicaciones requieren el análisis por sonda instantáneo de una red de detección completa. Por ejemplo, determinados flujos de procedimiento de combustión muestran fluctuaciones de alta frecuencia, o el flujo puede existir sólo durante un breve periodo de tiempo, por ejemplo tubos de choque o túneles. En tal caso puede usarse un divisor 1 X N para dividir el haz de sonda en N ramificaciones cada una de las cuales ocupa una posición diferente en la red. Dado que toda la red se ilumina simultáneamente, puede generarse un análisis bidimensional muy rápidamente. Sin embargo, el análisis bidimensional simultáneo puede requerir que se reproduzca cada componente en el lado de captación para cada trayectoria de haz incluyendo desmultiplexores, detectores, electrónicas tales como tarjetas A/D y, en cierta medida, ordenadores.

60 Por tanto, las realizaciones que presentan conmutadores o divisores facilitan una reconstrucción tomográfica algo basta de secciones transversales bidimensionales de la región analizada por sonda. Usar láseres de diodo para realizar la tomografía de concentraciones de gases es una técnica conocida, sin embargo se logra un beneficio adicional significativo con la presente invención como resultado del uso de un haz de sonda que se somete a multiplexación de longitud de onda. El haz multiplexado en longitud de onda permite el análisis espectroscópico

65 simultáneo de más de una línea de absorción. Por tanto, pueden realizarse técnicas de TDLAS, que se basan en más de una línea, tales como determinación de temperatura, tal como se comenta en detalle a continuación, a través

de toda la red de detección. Pueden mapearse concentraciones de gases tanto de temperatura como de gas de esta manera.

Aplicación específica de tomografía en SCR y SNCR

En la figura 3 se ilustra esquemáticamente una aplicación específica de tomografía basta tal como se describió anteriormente y se refiere a la optimización de inyección de amoniaco en SCR (reducción catalítica selectiva) y SNCR (reducción no catalítica selectiva) para la reducción de NOx a partir de efluente de caldera de generación de energía alimentada por carbón o gas. En esta aplicación, se coloca una matriz de inyectores 80 de amoniaco o urea en el flujo del efluente de caldera. Con el fin de minimizar la concentración de NOx, puede añadirse un exceso de amoniaco (o urea) al efluente. NOx es una familia muy regulada y altamente indeseable de contaminantes del aire. El amoniaco añadido reduce químicamente el NOx y forma gas nitrógeno inocuo y agua como productos. Sin embargo, la cantidad de amoniaco (o urea) en exceso añadida debe minimizarse porque estos productos químicos son en sí mismos contaminantes tóxicos del aire y son bastante caros. Normalmente, se desea una concentración en exceso de < 3-5 ppm de amoniaco. Sin embargo, la distribución de NOx en el efluente de combustión de central eléctrica no es uniforme, ni tampoco estable en el tiempo. Además, uno o más de los inyectores de amoniaco pueden obstruirse en cualquier momento dado provocando una disminución local de la concentración de amoniaco que conduce a una fuga local en la concentración de NOx. Con la capacidad de monitorizar la concentración espacial de amoniaco o NOx con una detección por red 78 de TDLAS aguas abajo tal como se describió anteriormente, la presente invención permite detectar y mitigar distribuciones de amoniaco no uniformes. Por tanto, la optimización de la red 76 de inyección de amoniaco con concentraciones de especies bidimensionales y el control individual sobre los inyectores permite la optimización del procedimiento de SCR/SNCR. Los detectores y los inyectores de amoniaco pueden vincularse a un sistema de procesamiento de datos que proporciona un control de realimentación automatizado de los inyectores de amoniaco.

Un sistema de detección de desviación de amoniaco optimizado, tal como el descrito en el presente documento, incluirá preferiblemente la capacidad de monitorizar la concentración de NOx. NOx incluye tanto NO como NO₂. Desafortunadamente, los láseres de diodo de NIR robustos sólo pueden acceder a la transición de segundo armónico de NO que se produce en la región de 1,7 - 1,8 micrómetros. Esta transición es demasiado débil como para detectar NO dadas las concentraciones relativamente bajas presentes en la mayoría de los flujos de efluente. Por tanto, no resulta práctico monitorizar directamente la concentración de NO. Sin embargo, se forma NO₂ mediante los mismos procedimientos que forman NO. Estos procedimientos, conocidos en las industrias de generación de energía como procedimiento de NOx térmico, producen tanto NO como NO₂, representando el NO aproximadamente el 95% de la concentración de NOx total y representando el NO₂ el 5% restante en condiciones típicas. La razón exacta depende normalmente de la temperatura y del potencial oxidante del entorno. Tal como se comentó anteriormente, esta técnica también permite la determinación de la temperatura del gas muestreado. Sin embargo, se espera que las concentraciones de NO y NO₂ se sigan una a la otra. Por tanto, puede usarse NO₂ como especie de análisis sustituta para detectar NO. La presente invención proporciona la capacidad de monitorizar NO₂ a una longitud de onda de 670 nm. Esta longitud de onda se produce usando un láser de realimentación distribuida (DFB) de 1340 nm sometido a doblado de frecuencia en una guía de onda de niobato de litio con combinación periódica, con coincidencia de fase. Aunque la concentración de NO₂ es tan sólo el 5% de la concentración de NO, la intensidad de absorción de NO₂ es órdenes de magnitud mayor. Por tanto, puede detectarse NO₂ fácilmente a las concentraciones presentes en calderas para facilitar la optimización de procedimientos de reducción de NOx.

Espectroscopía de absorción de láser de diodo sintonizable

La presente invención realiza TDLAS usando técnicas conocidas por los expertos en la técnica de espectroscopía de láser. Generalmente, TDLAS se realiza mediante la transmisión de luz de láser a través de un entorno objetivo, seguido por la detección de la absorción de la luz de láser a longitudes de onda específicas, debidas a gases objetivo tales como monóxido de carbono u oxígeno. El análisis espectral de la luz detectada permite la identificación del tipo y la cantidad de gas a lo largo de la trayectoria de láser. Los detalles de espectroscopía de absorción directa se comentan en Teichert, Fernholz y Ebert, "Simultaneous *in situ* Measurement of CO, H₂O, and Gas Temperature in a Full-Sized, Coal-Fired Power Plant by Near-Infrared Diode Lasers," (Applied Optics, 42(12):2043, 20 de abril de 2003). La naturaleza sin contacto de la espectroscopía de absorción de láser hace que sea muy adecuada para entornos duros tales como la zona de combustión de una central eléctrica alimentada por carbón, o entornos inflamables o tóxicos en los que no pueden usarse otras sondas. El uso de luz de láser proporciona el alto brillo necesario para obtener una transmisión detectable en presencia de atenuación intensa (normalmente más del 99,9% de pérdida de luz) que puede observarse en algunos de estos entornos. Para resistir mejor las duras condiciones de las aplicaciones objetivo, la luz de láser puede llevarse hasta el entorno objetivo a través de fibra óptica blindada.

La detección eficaz de temperatura o múltiples gases componentes de procedimiento de combustión requiere la realización de TDLAS con múltiples frecuencias de luz de láser ampliamente separadas. Las frecuencias seleccionadas deben coincidir con las líneas de absorción de las transiciones que están monitorizándose. Por ejemplo, tal como se comentó anteriormente, resulta útil monitorizar NO₂ a una longitud de onda de 670 nm para aproximarse a concentraciones de NO de emisión. También resulta bastante útil monitorizar el oxígeno, agua

(temperatura) y monóxido de carbono en una caldera de central alimentada por carbón. Pueden seleccionarse líneas de absorción adecuadas, y por tanto frecuencias de emisión de láser adecuadas, basándose en una suposición de que la longitud de trayectoria de sonda de láser a través de una cámara de combustión es igual a 10 metros y que la fracción molar de cada especie es CO (1%), O₂ (4%), CO₂ (10%) y H₂O (10%). Con fines de selección de frecuencia, puede suponerse que la temperatura de procedimiento es de 1800 K lo cual es ligeramente mayor que lo que se observa normalmente en una central alimentada por carbón, pero el margen sirve como factor de seguridad en los cálculos.

Por ejemplo, pueden seleccionarse tres líneas de absorción de agua para TDLAS que cumplen los siguientes criterios:

1. Energía de estado inferior de ~ 1000, 2000 y 3000 cm⁻¹ respectivamente
2. Proporciona una absorbancia conveniente de aproximadamente 0,1 - 0,4 que, a su vez, conduce a una absorción de haz de aproximadamente el 20% en la resonancia.
3. La situación óptima es usar transiciones en la región de 1250 a 1650 nm en la que están disponibles láseres de telecomunicaciones de diodo DFB, económicos y de alta potencia.
4. Las transiciones deben estar bien separadas para permitir una fácil multiplexación.
5. La longitud de onda seleccionada debe experimentar difracción eficazmente por las redes de (des)multiplexor existentes.

Se producen líneas de agua adecuadas a las siguientes longitudes de onda:

TABLA 1

Longitud de onda (nm)	Número de onda (cm ⁻¹)	Energía de estado inferior (cm ⁻¹)	Orden de red	Absorción a 1800 K y 10 M	Eficiencia de red UNP (modelo)
1349,0849	7412,432	1806,67	6,87	19,7%	81%
1376,4507	7265,062	3381,662	6,73	28,1%	77%
1394,5305	7170,872	1045,058	6,65	6,8%	72%

No se prevé ninguna interferencia de ningún otro gas de combustión. La especie que es más probable que interfiera, CO₂, se modeló y no había líneas de interferencia intensas en la región de 1,3 - 1,4 micrómetros.

De manera similar, puede seleccionarse una línea de monóxido de carbono adecuada basándose en el trabajo de Ebert al que se hizo referencia y se incorporó anteriormente. Una línea de monóxido de carbono adecuada se encuentra a 1559,562 nm usando la línea R(24) en una caldera de central alimentada por carbón. La selección de esta línea evita la interferencia de agua y dióxido de carbono. Las redes conocidas son bastante eficaces en esta región de longitud de onda dado que está en la banda C De comunicaciones ópticas. Se espera que la absorbancia a esta longitud de onda sea del 0,7%.

Además, puede medirse oxígeno a 760,0932 nm. Se calcula que la eficiencia de la red de (des)multiplexación preferida es de tan sólo el 40% en esta región, sin embargo debe haber una potencia de láser adecuada para una eficiencia de medición razonable.

Tal como se comenta en el presente documento, el uso de acoplamiento por fibra en los lados tanto de paso como de captación de un aparato de detección de TDLAS requiere la alineación crítica de las ópticas de paso y de captación. La alineación activa se logra preferiblemente con una longitud de onda de alineación seleccionada. Una longitud de onda de alineación posible es de 660 nm dado que hay diodos de alta potencia (45 mW) disponibles a esta frecuencia y 660 nm estará cerca del pico del funcionamiento de red de orden 14. Pueden determinarse otras longitudes de onda de alineación para ser igual de adecuadas o más.

En resumen, un conjunto razonable de longitudes de onda seleccionadas para la multiplexación a un haz de sonda para TDLAS tal como se implementa en la presente invención son tal como se muestran en la tabla 2. Debe observarse que este conjunto de longitudes de onda es para una realización de un aparato de detección de TDLAS adecuado para la detección y el control de una central eléctrica alimentada por carbón. Otros conjuntos de longitudes de onda pueden ser igualmente adecuados.

TABLA 2

Propósito	Longitud de onda (nm)
Alineación	660

Banda b-a de O ₂	760,0932
H ₂ O (línea de temp. moderada)	1349,0849
H ₂ O (línea de temp. alta)	1376,4507
H ₂ O (línea de temp. baja)	1394,5305
CO R(24) de (2,0) armónico	1559,562

Beneficios específicos de TDLAS usando haz multiplexado

5 Una ventaja particular de TDLAS con un haz de sonda multiplexado en longitud de onda es la precisión aumentada de las mediciones de temperatura. Con el fin de realizar mediciones precisas de la concentración con TDLAS, debe conocerse la temperatura del gas monitorizado. La intensidad de una absorción molecular es una función de la temperatura. Por tanto, para convertir la amplitud de una característica de absorción en concentración, debe conocerse la temperatura. Determinados intentos previos por medir la concentración de especies de combustión tales como CO presentan mediciones de temperatura de precisión insuficiente que conducen a errores en la
10 cuantificación. Esto es particularmente cierto para monitores de la desviación de amoníaco basados en láser de diodo que tradicionalmente no han incorporado ninguna medición de la temperatura en absoluto. En el sistema de detección de la presente invención, la temperatura puede determinarse midiendo la razón de la intensidad de dos o más líneas de agua molecular. La razón de la intensidad integrada de dos líneas es sólo una función de la temperatura (suponiendo que la presión de sistema total es constante). Por tanto, en principio, dos líneas proporcionan una temperatura precisa. Sin embargo, en el caso de una distribución de temperatura no uniforme (tal como se encuentra normalmente dentro de un procedimiento de combustión industrial), dos líneas no son suficientes para determinar la distribución de temperatura. En una distribución de temperatura no uniforme de este tipo, dos líneas sólo pueden determinar una temperatura “promediada en la trayectoria”. En cambio, la medición de la amplitud integrada de más de dos líneas (de la misma especie) permite analizar por sonda la no uniformidad de la temperatura. Un ejemplo de esta técnica se ha demostrado usando oxígeno como molécula de sonda por Sanders, Wang, Jeffries y Hanson en “Applied Optics” (vol. 40, núm. 24, 20 de agosto de 2001). La técnica preferida se basa en el hecho de que la distribución de intensidades de pico medidas a lo largo de una línea de visión no es la misma para una trayectoria a una temperatura promedio de 500 K, por ejemplo, como lo es cuando la mitad de la trayectoria está a 300 K y la otra mitad está a 700 K.

15 Además del beneficio de una medición de la temperatura más precisa, el uso de un haz de sonda multiplexado puede permitir la monitorización simultánea de más de una especie de gas de combustión, permitiendo un control más refinado sobre el procedimiento de combustión.

Aparato basado en red escalonada

20 La presente invención se beneficia del uso de componentes ópticos relativamente económicos y comúnmente disponibles diseñados para su uso en la industria de las telecomunicaciones. El aparato de telecomunicaciones sirve bien para acoplar por fibra los lados de paso y de captación del sistema. Las aplicaciones de telecomunicaciones usan normalmente multiplexores ópticos que aceptan múltiples haces de luz a longitudes de onda que están relativamente poco espaciadas y separadas por un valor constante (tal como 0,8 nm). Después se acoplan los haces de luz generalmente en una fibra óptica monomodo. Los desmultiplexores realizan el procedimiento inverso. Los equipos de telecomunicaciones están normalmente diseñados para funcionar a longitudes de onda de entre 1520 y 1620 nm, siendo la banda C óptica, 1528 - 1563 nm, la más usada.

25 En el caso de (des)multiplexores, puede usarse el mismo dispositivo físico o bien para multiplexar o bien para desmultiplexar, dependiendo de la dirección de la luz que pasa a través del mismo. Por consiguiente, se entenderá que el término “multiplexor” o “mux” tal como se usa en el presente documento incluye funciones tanto de multiplexación como de desmultiplexación.

30 Los multiplexores ópticos pueden usar cualquiera de varias tecnologías para lograr la función de multiplexación/desmultiplexación. Sin embargo, los multiplexores basados en red escalonada son ventajosos en cuanto a que pueden incorporarse en un diseño muy sencillo y compacto. Las redes escalonadas son redes de difracción relativamente bastas que funcionan en órdenes distintos del primer orden con ángulos de inclinación normalmente mayores de 45 grados. La separación basta de líneas en la red en combinación con el funcionamiento a orden alto da como resultado una gran dispersión angular que permite que el dispositivo sea compacto.

35 Algunas aplicaciones de telecomunicaciones pueden requerir que se dé servicio simultáneamente a otras longitudes de onda muy fuera de la banda C por multiplexores ópticos (por ejemplo, 1310 nm). Adicionalmente, aplicaciones fuera del campo de las telecomunicaciones tales como el aparato de detección y control de TDLAS de la presente invención pueden requerir la multiplexación de luz de láser a longitudes de onda ampliamente separadas, tales como separaciones de aproximadamente cientos de nm. Un ejemplo ilustrativo de los beneficios de un aparato de detección multiplexado basado en red escalonada se desarrolla en las figuras 4-7. La figura 4 ilustra un aparato 82 de detección de gas en el que se dirige luz 84 a través de una llama 86 desde un lado. Un sensor 88 en el otro lado de la llama detecta la luz transmitida y determina cuánta luz se absorbe por los gases en la llama 86. En el

dispositivo ilustrado en la figura 4, sólo se hace pasar un único haz de luz a través de la llama 86. La longitud de onda de la luz puede elegirse para corresponder a la longitud de onda de absorción de un gas particular. Alternativamente, la luz puede ser una luz blanca que, tras pasar a través de la llama 86, se divide en diversas longitudes de onda, tal como mediante un prisma. Entonces puede medirse la absorción a cada longitud de onda de interés.

En una alternativa de la técnica anterior ligeramente más sofisticada, puede usarse un dispositivo tal como el ilustrado en la figura 5 para hacer pasar un número n de haces 90A - 90n de luz separados a través de la llama 92. Cada haz 90A - 90n de luz está a una longitud de onda de interés diferente y sensores 94A - 94n en el otro lado de la llama 92 miden la absorción a cada longitud de onda, indicando cantidades relativas de gases de interés seleccionados. Hay varios inconvenientes de usar múltiples haces separados. En primer lugar, el acceso a la llama puede estar limitado e intentar proyectar los múltiples haces a través del espacio limitado puede resultar difícil, si no imposible. En segundo lugar, normalmente hay turbulencia en la llama así como huecos de no uniformidad. Los múltiples haces, aunque estén muy poco separados, pueden no pasar a través del mismo espacio de muestreo y, por tanto, no generar resultados sistemáticos o comparables. Finalmente, las ópticas de detección y proyección y detectores son más complejos y costosos en un aparato de múltiples haces en comparación con los de un aparato de un único haz.

El dispositivo de detección basado en multiplexor de red escalonada de la presente invención tiene ventajas significativas con respecto a la técnica anterior. Una red escalonada proporciona flexibilidad no habitual al poder funcionar en órdenes distintos del primer orden con ángulos de inclinación normalmente mayores de 45 grados. Por ejemplo, el dispositivo Zmux™ de Zolo Technologies, Inc. está optimizado para funcionar en una configuración de Littrow en el 6º orden a 1545 nm con una red con rayas mecánicas que tiene una separación de líneas de 171,4 líneas/mm y un ángulo de inclinación de 52,75 grados. La ecuación de red para un montaje de Littrow es:

$$m\lambda = 2d\text{sen}\Theta_b \tag{1}$$

donde m es el orden, λ es la longitud de onda, d es la separación entre rayas, y Θ_b es el ángulo de inclinación.

Para una red dada, mλ es una constante. Para la red Zmux a la que se hizo referencia anteriormente, mλ = 6(1,545) = 9,27 micrómetros. Una red de este tipo proporciona eficiencia óptima para 1,545 micrómetros en el 6º orden. Sin embargo, la red también proporciona una eficiencia muy alta para otros órdenes. Por ejemplo, el 7º orden se produce a 9,27/7 = 1,32 micrómetros. Por tanto, una red tal como Zmux puede multiplexar simultáneamente luz en la banda C así como luz a 1310 nm con alta eficiencia. La figura 6 ilustra una red 96 escalonada que multiplexa luz 98A - 98n que va a colimarse por un colimador 100 para dar un único haz 102.

Resultan de particular relevancia para la presente invención las aplicaciones fuera del campo de las telecomunicaciones para multiplexar luz de láser a longitudes de onda ampliamente separadas, con frecuencia por cientos de nm. En aplicaciones tales como el presente aparato de detección de gas basado en TDLAS, resulta crítico que todos los componentes de longitud de onda de un haz de sonda muestren la misma región de espacio y pueden necesitarse muchas longitudes de onda para detectar una única especie o para detectar múltiples especies. Para estas aplicaciones, los multiplexores/desmultiplexores basados en red escalonada proporcionan una solución única. Por ejemplo, el des/multiplexor basado en red escalonada descrito anteriormente puede multiplexar una región de longitud de onda región sustancial alrededor de las longitudes de onda centrales facilitadas en la tabla 3 a continuación, en la que cada región de longitud de onda corresponde a un orden de red diferente.

TABLA 3

Orden	Longitud de onda central (micrómetros)	Intervalo de longitud de onda aproximado (micrómetros)
2	4,63	4,40 - 4,80
3	3,09	2,90 - 3,30
4	2,32	2,15 - 2,40
5	1,85	1,70 - 1,95
6	1,55	1,50 - 1,57
7	1,32	1,24 - 1,39

También pueden multiplexarse órdenes superiores hasta y más allá del decimocuarto con intervalos de longitud de onda correspondientemente más estrechos. Merece la pena observar que la transmisión monomodo para todas estas longitudes de onda no es posible en fibra óptica fácilmente disponible. Un aspecto de un aparato 104 de detección de gas de la presente invención se ilustra esquemáticamente en la figura 7. Este aspecto destaca las ventajas que tiene TDLAS con una salida de láser multiplexado con respecto a las realizaciones de la técnica anterior comentadas anteriormente. En realización de la figura 7, un número n de fuentes 106A - 106n de láser que funcionan a longitudes de onda ampliamente separadas se multiplexa mediante una red 108 escalonada en una fibra 110 óptica individual. La luz de la fibra 110 individual se colima mediante un colimador u óptica 112 de paso y pasa a

través de la muestra 114 (tal como una llama) que va a analizarse. Tras pasar a través de la muestra 114, la luz se desmultiplexa mediante otra red 116 escalonada. La luz transmitida a cada longitud de onda se detecta mediante un fotodetector 118A - 118n correspondiente. Los láseres 106A - 106n se sintonizan sobre una región espectral estrecha (tal como de 1-2 nm) y se monitoriza la absorción por la muestra 114 en cada región espectral explorada. De esta manera, el gas que está sometándose a prueba puede identificarse y cuantificarse completamente. También pueden medirse otros parámetros tales como temperatura y presión de gas. Además de la detección de la combustión, la tecnología de multiplexación/desmultiplexación de red escalonada de longitudes de onda ampliamente separadas puede permitir que dispositivos médicos midan gases en el aliento exhalado y dispositivos de defensa de seguridad nacional para detectar agentes de guerra química. Otras aplicaciones son posibles en los campos de visualización y tecnología de visión microscópica usando los multiplexores basados en red escalonada y dispositivos acopladores de rojo/verde/azul.

Ruido de modo

El tren óptico del sistema de TDLAS de la presente invención, e implementaciones similares que requieren una señal multiplexada a partir de longitudes de onda ampliamente separadas, presenta muchos retos de diseño debido a los requisitos de diseño opuestos en la reducción de ruido de modo y la recolección de luz de alta eficiencia. El ruido de modo se define en el presente documento como un cambio en el nivel de señal de luz detectada que resulta de la distribución de luz que varía en cuanto al tiempo y la longitud de onda no uniforme en el núcleo de una fibra usada para recopilar y transportar la luz hacia y desde la cámara de procedimiento que está midiéndose.

En una fibra multimodo, diferentes modos se propagan a diferentes velocidades debido a variaciones del índice de refracción. Entonces, la distribución de intensidad en la fibra es un patrón de puntos resultante de la interferencia de todos los modos de propagación que han experimentado diferentes longitudes de trayectoria eficaces. Si se recopila y se detecta toda la luz en el patrón de puntos, entonces la interferencia constructiva y destructiva se cancela de manera exacta y la potencia transmitida total no depende de la longitud de onda o longitud de fibra. Si se introduce pérdida por recorte, viñeteado u otra pérdida, la cancelación exacta no funciona y la potencia detectada cambia con la longitud de onda y/o el tiempo. Una expresión general para la potencia detectada tras una longitud, z, de fibra es:

$$P = P_0 + \sum_{ij} c_{ij} E_i E_j \cos[(2\pi v_0 \Delta n_{ij} z)/c + \Delta \phi_{ij}(T, \sigma)] \tag{2}$$

donde P₀ = potencia promedio independiente de la longitud de onda

E_i = amplitud de luz en el i-ésimo modo transversal

c_{ij} = integral de solapamiento entre el modo transversal i-ésimo y j-ésimo

Δn_{ij} = diferencia de índice de refracción entre los modos i-ésimo y j-ésimo

Δφ_{ij} = desplazamiento de fase entre los modos i-ésimo y j-ésimo debido a temperatura y tensión

Para un conjunto ortonormal de modos y sin pérdida, c_{ij} = 0. Sin embargo, con cualquier recorte o viñeteado de haz o cualquier otra pérdida dependiente de modo se provocará algún c_{ij} ≠ 0. Esto conducirá a ondas en la potencia transmitida promedio.

Para una fibra con índice de calidad típica con un núcleo de 50 micrómetros, el cambio de índice total, Δn, es ~1%, pero la mayoría de los modos pasan la mayor parte del tiempo de transmisión cerca del centro del núcleo de fibra, y por tanto, Δn_{ij} ≤ 0,0005, en general. La fibra óptica comúnmente disponible GIF50 soporta aproximadamente 135 modos, lo cual es suficientemente basto como para producir ruido de modo prominente durante una exploración de longitudes de onda dados niveles de recorte de haz que pueden obtenerse de manera razonable.

Como ejemplo de ruido de modo específico, puede considerarse el sistema más sencillo que presenta ruido de modo: una guía de onda rectangular que sólo soporta el modo más bajo en una dimensión y sólo los dos modos más bajos en la dimensión ortogonal:

Modo más bajo: E₁ = E₁⁰ [exp i(kz - ωt)]cos πx/2a

Siguiente modo: E₂ = E₂⁰ [exp i(kz - ωt)]sin πx/a

La intensidad en un punto z a lo largo de la fibra es:

$$I(x) = |E_1 + E_2|^2 \text{ y la potencia total es } P = \int |E_1 + E_2|^2 dx \tag{3}$$

donde la integral debe incluir los efectos de recorte y viñeteado.

En ausencia de recorte, $P \sim E_1^2 + E_2^2$ y no hay ninguna dependencia de la longitud de onda. Añadir recorte equivale a cambiar los límites de la integral. Puede mostrarse que el recorte da como resultado un término adicional $\sim E_1 E_2 \cos \Delta\phi$ donde $\Delta\phi = \Delta k L = 2\pi \Delta n L / \lambda$.

5 Si pudiera usarse fibra monomodo en el tren óptico de lado de captación de la presente invención, el ruido de modo no sería un problema. Sin embargo, normalmente debe usarse fibra multimodo en el tren óptico de lado de captación de la presente invención por dos motivos. En primer lugar, tras atravesar el volumen de medición (una cámara de combustión con una trayectoria de medición de más de 10 metros), el haz inicialmente monomodo (distribución espacial gaussiana) se ve significativamente degradado en cuanto a su calidad. Por tanto, la eficiencia de acoplamiento de este haz muy distorsionado en fibra monomodo sería muy mala. Esta es una situación inaceptable dado que el haz se atenúa 3 - 4 órdenes de magnitud cuando pasa a través del volumen de medición debido principalmente a dispersión y oscurecimiento por hollín y cenizas volantes. La atenuación adicional resultante de usar fibra monomodo impediría la medición. En segundo lugar, los efectos de direccionamiento de haz de refracción en la bola de fuego provocan que la posición y el apuntamiento del haz sean inestables. Dados estos efectos, sería difícil "impactar" en el núcleo de una fibra monomodo con cualquier regularidad.

Por otro lado, el núcleo de una fibra multimodo presenta al menos 25 veces el área en sección transversal objetivo de una fibra monomodo. Por tanto, los efectos de direccionamiento de haz pueden reducirse significativamente. Además, dado que la eficiencia de acoplamiento en fibra multimodo es independiente del modo espacial de la luz, la mala calidad de haz obtenida tras pasar a través de la bola de fuego no es un problema.

Sin embargo, las pérdidas dependientes de modo que se producen en el tren de fibra multimodo son un reto de diseño significativo. La distribución de luz que surge del núcleo de una fibra multimodo presenta un patrón de puntos aleatorio, es decir un patrón aleatorio de zonas de luz y oscuras provocado por interferencia constructiva y destructiva entre diferentes modos de la fibra. Si el patrón de puntos fuera totalmente invariable en función del tiempo y la longitud de onda, no presentaría un problema. Sin embargo, variaciones lentas en el patrón de puntos, particularmente en función de la longitud de onda, pueden provocar ruido de modo si el haz experimenta recorte en cualquier parte en el tren óptico de lado de captación multimodo tal como se describió anteriormente. Este recorte es imposible de evitar; sólo puede reducirse. Por tanto, deben implementarse medidas adicionales para reducir el ruido de modo para mejorar la sensibilidad de detección del sistema.

Hay varias maneras en las que puede mitigarse el ruido de modo. A partir de la ecuación 2 anterior, el ruido de modo puede reducirse:

- 35 1) reduciendo pérdidas dependientes de modo, es decir reduciendo el recorte manteniendo de ese modo el c_{ij} pequeño
- 2) reduciendo z , aumentando de ese modo el periodo del ruido de modelo para que sea mucho mayor que las líneas de absorción de interés
- 40 3) reduciendo Δn_{ij} usando fibra de baja dispersión
- 4) reorganizando al azar los modos; pero no todas las técnicas de reorganización de modos al azar son igual de eficaces, tal como se describe a continuación.

Preferiblemente, las ópticas de captación de la presente invención se diseñan e implementan para incorporar todo lo anterior con el fin de reducir el ruido de modo. Las ópticas se diseñan de tal manera que cualquier recorte de haz debe producirse a un nivel bajo dada la alineación casi perfecta del sistema. Deben realizarse esfuerzos por mantener la longitud de fibra multimodo al mínimo; sin embargo, para algunas aplicaciones z debe ser largo con el fin de tener la electrónica de control en una zona de entorno controlado. El valor de Δn_{ij} puede reducirse usando fibra multimodo de baja dispersión de calidad máxima. Además, pueden obtenerse resultados excelentes reorganizando al azar los modos mediante manipulación mecánica de una fibra multimodo de lado de captación.

El patrón de puntos presentado en una fibra multimodo varía en función del tiempo y la longitud de onda y también en función de la posición mecánica de la fibra. Doblar la fibra y manipularla de maneras específicas puede provocar que el patrón de puntos cambie. Si se realizan estas manipulaciones mecánicas de manera continua, a lo largo de un periodo de tiempo, la distribución espacial de luz que surge de la fibra representa en promedio un patrón relativamente uniforme. El punto crucial del reorganizador al azar de la presente invención es reducir el ruido de modo manipulando mecánicamente fibra multimodo para producir, en promedio, un haz de luz uniforme que no produce ruido de modo cuando se somete a recorte de haz de nivel bajo inevitable.

Algunos modos específicos de manipulación de fibra son más eficaces en la reducción del ruido de modo que otros. En particular, retorcer la fibra alrededor de su eje longitudinal (z) con respecto a algún otro punto en la fibra provoca que el patrón de puntos cambie. En particular, el cambio dominante obtenido es una rotación del patrón de puntos alrededor del eje z . Resulta de interés el hecho de que el patrón no rota tanto alrededor del eje como se hace rotar mecánicamente la fibra. Un efecto secundario es que la distribución de luz real se ve algo alterada por la rotación. La

rotación del patrón de puntos no se debe a cambios del índice de refracción inducidos por tensión en la fibra, aunque esto puede explicar pequeños cambios en el patrón de intensidad de puntos. En vez de eso, la rotación se debe a la incapacidad de la luz a seguir completamente la guía de ondas a medida que se manipula en un movimiento de torsión.

5 Esta observación puede usarse para eliminar prácticamente el ruido de modo provocado por el uso de fibra multimodo para el tren óptico de lado de captación. Una realización sumamente preferida de la presente invención usa un motor de árbol hueco a través del cual se coloca y se sujeta la fibra multimodo. Una sección remota de fibra se mantiene fija con respecto a la posición de árbol del motor, y el motor se barre de manera repetida mediante un movimiento de +360 grados y después -360 grados. La frecuencia de este movimiento es preferiblemente superior o igual a 10 hercios para permitir calcular eficazmente un promedio de la señal transmitida y reducir significativamente el efecto del ruido de modo de lado de captación.

15 El tren óptico de lado de paso de la presente invención también presenta un reto de diseño significativo debido a la necesidad de producir un haz monomodo para todas las longitudes de onda que van a transmitirse a través de la región de medición. Si pudiera usarse fibra monomodo a través del tren óptico de lado de paso, el ruido de modo no sería un problema. Sin embargo, la fibra sólo funciona como guía de onda monomodo a lo largo de un intervalo de longitud de onda limitado. Más allá del punto de corte de longitud de onda corta para una fibra particular, puede transportarse luz a través de la fibra en varios modos espaciales de orden superior. Estos modos de orden superior interferirán para producir un patrón de puntos cuando la luz sale de la fibra. El patrón de puntos varía con el tiempo y la longitud de onda. Entonces, incluso una pequeña cantidad de recorte de haz da lugar a ruido en la medición.

25 Por el contrario, si se selecciona una fibra que tiene un punto de corte monomodo que coincide con la longitud de onda más corta que se necesita transmitir, las longitudes de onda más largas experimentarán una pérdida sustancial al acoplarse en la fibra y la fibra presentará extensas pérdidas por curvado para las longitudes de onda más largas.

30 Este problema puede ser agudo en el dispositivo de detección y control de TDLAS multiplexado en longitud de onda, acoplado por fibra, de la presente invención debido a la necesidad de multiplexar longitudes de onda de hasta 1,67 micrómetros con longitudes de onda de tan sólo 760 nm o 670 nm. No se conoce ninguna fibra comercialmente disponible individual que proporcione funcionamiento monomodo, alta eficiencia de acoplamiento y bajas pérdidas por curvado para tal intervalo amplio de longitudes de onda. En el futuro, la fibra de cristal fotónico puede proporcionar una solución a este dilema, pero actualmente la tecnología de fibra de cristal fotónico se encuentra en sus inicios.

35 Tal como se muestra en la figura 8, la presente invención mitiga el problema de multiplexar y modificar el paso de luz en un haz monomodo desde 670 nm o 760 nm hasta 1,67 micrómetros usando una sección de transmisión muy corta de fibra 120 multimodo que no permite que se desarrollen los modos espaciales de orden superior para una longitud de onda más corta que el punto de corte monomodo. Haciendo referencia a la ecuación 2 anterior, si la longitud, L, de fibra multimodo es corta, entonces se minimizará el ruido de modo. En este caso, por ejemplo, si se acopla luz de 760 nm a una sección corta de fibra monomodo con una longitud de onda de punto de corte de 1280 nm (por ejemplo, Corning SMF 28), la luz de 760 nm sigue siendo monomodo para al menos algunos metros. Por tanto, una solución al ruido de modo de lado de paso es acoplar la luz de 760 nm en una fibra que es monomodo para longitudes de onda de más de 1280 nm pero que puede ser multimodo para 760 nm, con tan sólo una corta distancia a recorrer antes de colimarse para transmitirse a través de la zona de medición.

45 En la figura 8 y la figura 2 se muestra un diagrama esquemático de un sistema de este tipo. Haciendo referencia en primer lugar a la figura 8, se acoplan múltiples fuentes 120 de láser de diodo que emiten láser a frecuencias de emisión de láser ampliamente separadas a fibras 122A - 122n ópticas monomodo diferenciadas. Los láseres de diodo que emiten láser a longitudes de onda de entre 1349 nm y 1670 nm se multiplexan con el multiplexor 124. La salida del multiplexor 124 se acopla a una fibra 126 óptica de lado de paso que tiene dimensiones adecuadas para transmitir luz con longitudes de onda que oscilan entre 1349 nm - 1670 nm, tanto sin pérdidas por transmisión sustanciales como sin la introducción de ruido de modo. Una fibra óptica adecuada para estas longitudes de onda es Corning SMF28. Sin embargo, la entrada de 760 nm, si se multiplexa y se acopla a una fibra óptica SMF28, tras una transmisión a través de una distancia relativamente corta se volverá multimodal. Por consiguiente, la salida del láser de 760 nm se acopla a una fibra que es monomodo para longitudes de onda inferiores a 1280 nm tales como SMF750. La luz de láser transmitida en la fibra 122n de entrada y la luz de láser multiplexado transmitida en la fibra 126 óptica de lado de paso pueden acoplarse cerca de la óptica 128 de paso. Preferiblemente, el acoplador 130 y la óptica 128 de paso se conectan ópticamente mediante una longitud corta de fibra 132 óptica de transmisión seleccionándose la fibra 132 óptica de transmisión para transmitir todas las longitudes de onda acopladas y multiplexadas sin pérdida significativa. Una fibra óptica de transmisión adecuada para el sistema representado en la figura 8 será Corning SMF28. Siempre que la fibra óptica de transmisión sea relativamente corta, la luz de láser de 760 nm acoplada a la fibra 132 óptica de transmisión no presentará comportamiento multimodal. Para el sistema y las fibras representados en la figura 8, se ha determinado que la fibra óptica de transmisión debe mantenerse a una longitud de 3 metros o menos para evitar la introducción de ruido multimodal significativo.

65 En la figura 2 se muestra un sistema similar en el que el acoplador 134 recibe la entrada tanto de un láser de diodo

de 760 nm como de un haz multiplexado de láseres de diodo que tienen longitudes de onda sustancialmente más largas.

Sistema de alineación

5 Preferiblemente, el sistema de detección de la presente invención incorpora una característica de autoalineación que permite que las ópticas de paso y de captación mantengan una alineación óptima aunque ambas estén sujetas con pernos a una caldera u otra cámara de procedimiento hostil que, en sí misma, se ve sometida a un movimiento debido a efectos térmicos, viento y vibración. En una realización sumamente preferida del presente sistema, las
10 ópticas tanto de paso como de captación se montan en fases de volteo/inclinación controladas por retroalimentación. El requisito de que las ópticas tanto de paso como de captación se monten en fases de volteo/inclinación resulta del hecho de que el sensor está totalmente acoplado por fibra. Por tanto, se lanza luz multiplexada a través de la región de medición mediante una óptica de paso de colimación unida directamente a una fibra de entrada, y la óptica de captación acopla la luz transmitida directamente en una fibra de salida que normalmente es una fibra multimodo. Por
15 consiguiente, la óptica de captación debe orientarse de modo que sea colineal con el haz que surge de las ópticas de paso. Esto es necesario de modo que el haz transmitido enfocado llegue dentro del cono de aceptación de la fibra de captación multimodo.

20 Con el fin de distinguir luz de láser transmitida de luz de fondo intensa (por ejemplo, de las llamas en un horno de carbón), el campo de visión y el enfoque del detector pueden limitarse para detectar sólo luz con la misma dirección y posición que la luz de láser de entrada. Esto puede realizarse convenientemente enfocando luz detectada en una fibra óptica acoplada a un detector adecuado. El diseño de sistema óptico básico de una realización de la presente invención se muestra esquemáticamente en la figura 9. El transmisor 136 de la figura 9 consiste en una óptica 138 de paso o colimador tal como una lente de colimación de una o más de una capa y electrónicas y estructuras de
25 montaje y alineación asociadas. De manera similar, el receptor 140 de la figura 9 consiste en una óptica 142 de captación o colimador de construcción similar o variada con respecto a la óptica de paso y electrónicas de montaje y alineación asociadas. La eficiencia y distinción de fondo de un par de transmisor-receptor están vinculadas a la tolerancia de alineación. Para la mayor eficiencia y discriminación, las tolerancias de alineación tanto para el transmisor como para el receptor son estrictas. El transmisor debe apuntarse con suficiente precisión como para que la mayor parte de la luz transmitida incida en la abertura transparente de la óptica 146 de captación, tal como se
30 indica en la figura 10. Para un sistema típico, esto representa una tolerancia de 1 cm con respecto a una distancia de transmisión típica de 10 metros, o 1 miliradian. (Con distancias objetivo de entre 5 y 30 metros y tamaños de punto lanzado de entre 1 y 3 cm, la difracción supone una contribución pequeña).

35 Tal como se ilustra gráficamente en la figura 11, la aceptación angular del receptor se determina por el diámetro del núcleo 148 de fibra dividido entre la longitud focal de la óptica 150 de captación. Una longitud focal más corta aumentará la aceptación angular, pero la abertura transparente del receptor se vuelve correspondientemente más pequeña. Un compromiso que tiene una abertura transparente y aceptación angular adecuadas es usar una lente con longitud focal de 50 mm y una fibra con núcleo de 50 micrómetros. Esto da como resultado una abertura
40 transparente de 2 cm y un cono de aceptación angular de 1 miliradian.

Por tanto, un sistema de alineación preferido debe posicionar dos ópticas para apuntarse una a otra con tolerancias de 1 miliradian tanto en el volteo como en la inclinación, para un total de cuatro grados de libertad. Estos cuatro
45 grados de libertad pueden lograrse posiblemente mediante una alineación bruta de un lado seguido por una alineación en cuatro dimensiones (volteo, inclinación, y posición lateral en x e y) del otro lado, pero esto supone que son permisibles movimientos lateral grandes. Dado que los orificios de acceso para entornos objetivo pueden ser de tan sólo 1 pulgada, esto es posiblemente una solución problemática. Alternativamente, la alineación de apuntado activa en ambos extremos puede garantizar una alineación apropiada cuando se dispone de espacio limitado para el movimiento lateral.

50 La alineación crítica de las ópticas de paso y de captación debe mantenerse en un entorno duro y variable. La vibración, carga de viento, cambio de temperatura y otros desplazamientos estructurales pueden conducir, todos ellos, a alineaciones erróneas, al igual que la deformación mecánica en la optomecánica de transmisor y receptor. También puede esperarse alineación errónea tras el mantenimiento periódico, cuando se retiran los cabezales de
55 transmisor y receptor para la limpieza y después vuelven a montarse. De manera ideal, el sistema óptico de la presente invención podrá mantener su alineación óptica de 1 miliradian frente a alineaciones erróneas de sistema que pueden aproximarse a 50 miliradianes. El sistema de alineación también debe retener la posición durante cortes de alimentación y tolerar una pérdida total de señal, y desactivarse sin perder la alineación. Finalmente, el propio sistema debe ser preferiblemente lo suficientemente resistente como para funcionar de manera continua durante un
60 periodo de tiempo prolongado en un entorno industrial expuesto.

La figura 12 ilustra esquemáticamente una realización de ópticas de paso o de captación alineables. El transmisor y el receptor son de diseño similar: el transmisor genera un haz colimado de luz de láser a partir de luz que surge de una fibra óptica, y el receptor captura un haz colimado de luz de láser y lo enfoca en una fibra. (Es posible enviar luz
65 hacia atrás a través de este sistema óptico, y la mayoría de los elementos del transmisor y receptor son idénticos). Las ópticas de transmisor y de receptor pueden montarse en cerramientos NEMA-4 para protegerlas del entorno. La

siguiente descripción se aplica a cualquiera del módulo de transmisor o receptor.

Tal como se muestra en la figura 12, el par 152 de fibra/lente precolimado se une a una fase 154 de inclinación cinemática situada para permitir el volteo y la inclinación perpendicular al eje óptico. Dos motores 156 a pasos de accionamiento directo logran el volteo y la inclinación. Estos motores se controlan por ordenador mediante una conexión de Ethernet o similar. Esta conexión puede realizarse a través de fibra óptica con el fin de evitar la interferencia eléctrica. Los motores 156 a pasos mantienen su posición cuando se retira la alimentación, de modo que la alineación óptica no se ve afectada por cortes de energía eléctrica.

Durante la alineación de sistema periódica o continua, el ordenador de control monitoriza la cantidad de luz de láser que se transmite y se detecta. Preferiblemente, puede proporcionarse una longitud de onda de alineación diferenciada para procedimientos de alineación continua o periódica tales como la fuente 64 de luz visible de la figura 2. Cualquier alineación errónea reducirá esta señal detectada. En el modo de autoalineación, el ordenador mide la señal detectada, dirige uno de los dos motores a pasos para moverse una pequeña cantidad en una dirección, después vuelve a medir la señal detectada. Si la señal aumenta, entonces el ordenador dirige el motor a pasos para moverse de nuevo en la misma dirección hasta que la señal no aumenta. Entonces, el ordenador dirige el otro motor a pasos para moverse a lo largo del eje ortogonal para maximizar la señal detectada, después repite todo el procedimiento para el otro cabezal de sensor. A medida que la señal detectada aumenta, la ganancia de amplificador de detector disminuye automáticamente de modo que el procedimiento de autoalineación procede a lo largo de varias décadas de tamaño de señal. El sistema de autoalineación puede funcionar con potencias detectadas de desde nanovatios hasta milivatios.

Este algoritmo de "ascenso de colinas" puede alinear el sistema tras la pérdida casi total de señal, en presencia de ruido sustancial, y tolera bloqueos de haz, cortes de alimentación, choques mecánicos y otras alteraciones que pueden provocar que otros sistemas de alineación alineen de manera errónea los límites de la electrónica de control. Lo único que se requiere para la autoalineación es una señal finita con un máximo global en el espacio de posición. Dependiendo de las condiciones de instalación específicas, puede producirse autoalineación periódicamente a intervalos establecidos tales como cada hora o según se necesite tras un periodo prolongado tal como días de funcionamiento. El ordenador de control puede monitorizar la señal detectada y realizar la autoalineación únicamente cuando la señal disminuya por debajo de un umbral preestablecido.

Los módulos de transmisor y receptor pueden incorporar varias otras características útiles para aplicaciones industriales. Sensores opcionales pueden detectar cuándo se mueven los módulos fuera de su posición para limpieza o mantenimiento, y se apagan todos los láseres por seguridad. Tal como se muestra la figura 12, todas las conexiones eléctricas y ópticas se realizan a través de una bisagra 158 de modo que ninguna de tales conexiones se ve alterada por operaciones de mantenimiento. El cerramiento 160 protege las ópticas internas sensibles frente a contaminantes y preferiblemente puede cerrarse. El rango de movimiento de la bisagra puede verse restringido para evitar lesiones del operario. Preferiblemente, cada cabezal de sensor requerirá menos de 10 vatios de energía eléctrica de entrada durante la autoalineación, y menos de 0,1 vatios tras completarse la autoalineación.

Diseños alternativos pueden ser adecuados para diferentes aplicaciones. Una reducción considerable de tamaño y peso es posible si no se requiere clasificación de NEMA-4. Diferentes distancias de transmisión pueden permitir ópticas de diferente longitud focal y abertura transparente para optimizar la señal capturada. Como alternativa a la fase de inclinación accionada por motor a pasos descrita anteriormente para controlar el apuntado mediante movimiento de todo el conjunto de fibra-lente, la fibra puede moverse lateralmente con respecto a la lente para realizar el mismo cambio de apuntado al tiempo que se mueve una masa mucho más pequeña. También pueden usarse diferentes medios electromecánicos tales como elementos piezoeléctricos o bobinas de voz para aumentar la velocidad del sistema de autoalineación.

Además de las preocupaciones de alineación comentadas anteriormente, la elección específica de ópticas de paso y de captación puede afectar al rendimiento del sistema de detección de TDLAS de la presente invención de varias maneras:

(1) La intensidad de señal acoplada a los detectores depende de la eficiencia de paso/captación.

(2) La cantidad de emisión de fondo no deseable acoplada a los detectores depende de la extensión de ópticas de captación.

(3) Los efectos de poco ruido de modo a 760 nm son muy sensibles a la configuración de paso/captación.

(4) Se espera que las características de ruido (pequeño pero más estacionario o mayor con grandes oscilaciones) dependan del tamaño de haz lanzado. Se prefiere un haz de lanzamiento mayor.

(5) La sensibilidad a la alineación errónea del sistema es una función directa de longitudes focales de paso y de captación y tamaños de fibra asociados.

Una imagen muy simplista de una zona de combustión de central eléctrica alimentada por carbón típica puede adoptarse para el análisis de selección de componentes ópticos. El propósito de tal análisis es centrarse en los efectos generales sobre un haz de láser que pasa a través de la bola de fuego con tan poco conocimiento sobre los detalles de bola de fuego como sea posible. Atravesar la bola de fuego tiene tres efectos sobre un haz de luz:

(1) Las partículas de hollín absorben algo de la luz.

(2) La dispersión o refracción de ángulo grande impide que algo de la luz alcance la óptica de captación.

(3) La luz pasa a través de numerosos gradientes térmicos pequeños y, por tanto, se dirige aleatoriamente, pero todavía alcanza la óptica de captación.

Sólo la tercera categoría de luz está disponible para su recolección. Suponiendo que un rayo de luz típico experimenta múltiples acontecimientos de refracción mientras atraviesa la bola de fuego, la dirección del rayo sigue una trayectoria aleatoria, y puede desviarse de su dirección inicial. Si el rayo es parte de un haz más grande compuesto por otros rayos que experimentan desviaciones similares, pero no idénticas, entonces el efecto de la bola de fuego sobre el haz provoca cuatro tipos diferenciados de cambios:

(1) Cambio en la dirección global del haz completo

(2) Cambio en la posición del centroide del haz

(3) Cambio en el tamaño de haz

(4) Cambio en la divergencia / planicidad de frente de ondas del haz

Estos cuatro tipos de cambios son parámetros que incluyen todos los efectos principales sobre el haz que afectarán a la eficiencia de recolección, independientemente de la física que conduzca a estos efectos.

Si las direcciones de los rayos de luz en la bola de fuego están experimentando desviación aleatoria, entonces las direcciones de rayos pueden difundirse alejándose de la dirección inicial (nominalmente óptima) según una dependencia de difusión convencional. Sin embargo, la distancia de un rayo de luz desde el eje original depende de sus direcciones previas. Por tanto, para una cantidad dada de dirección de haz de rms, determinada por los detalles de la bola de fuego, puede esperarse una cantidad directamente proporcional de desplazamiento de haz. Si un haz de láser que atraviesa la bola de fuego aumenta hasta varias veces su tamaño original, entonces la misma relación será cierta entre el tamaño de haz final y la divergencia de haz final.

La eficiencia de recolección de luz puede estimarse si se conoce el ángulo, la ubicación y el tamaño de haz de la luz incidente sobre las ópticas de captación. La estimación supone ópticas de rayos sencillas, intensidades de parte superior plana y una estimación sencilla de la cantidad de luz incidente sobre la óptica de captación que está dentro de la abertura numérica NA de la fibra y que está calibrada para impactar en el núcleo de la fibra. El resultado final es una "colina" en el espacio de ángulo desplazado. Suponiendo una alineación óptima, la eficiencia de recolección está cerca de la cima de la colina, pero puede moverse rápidamente sobre y alrededor de la colina a medida que el ángulo y la posición de haz fluctúan. Preferiblemente, la colina de eficiencia de recolección será tanto tan alta como tan ancha como sea posible. Merece la pena indicar varios puntos sobre la colina:

(1) La altura máxima de la colina de eficiencia de recolección (para inclinación y desplazamiento de haz nulos) es proporcional al cuadrado de la extensión de óptica de captación (longitud focal multiplicado por NA) a menos que la óptica de captación sea lo suficientemente grande como para capturar todo el haz incidente, en cuyo caso la eficiencia de captación es del 100%.

(2) La colina es elíptica, y cambiar la longitud focal de captación hace que un eje sea más largo y el otro más corto.

(3) La fluctuación en la eficiencia de recolección de luz debido a fluctuación de haz es una fuente de ruido.

Basándose en las técnicas de análisis anteriores, puede compararse la relación señal-ruido de diferentes combinaciones de paso/captación. Suponiendo que el ruido multiplicativo es el mismo, diferentes ópticas de captación sólo difieren en el rendimiento final si el ruido de fondo de bola de fuego o el ruido de detector son dominantes.

Los objetivos de la invención se han realizado completamente mediante las realizaciones dadas a conocer en el presente documento. Los expertos en la técnica apreciarán que los diversos aspectos de la invención pueden lograrse mediante diferentes realizaciones sin alejarse de la función esencial de la invención. Las realizaciones particulares son ilustrativas y no se pretende que limiten el alcance de la invención tal como se expone en las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Aparato (10) de detección que comprende:
 - 5 más de un láser (120) de diodo que tienen cada uno una frecuencia de emisión de láser seleccionada;
 - un multiplexor (124; 60) ópticamente acoplado a más de uno pero menos que la totalidad de los láseres (120) de diodo, emitiendo el multiplexor (124) una luz de láser multiplexado, estando la luz de láser multiplexado ópticamente acoplada a un extremo proximal de una fibra (126; 66) óptica de lado de paso;
 - 10 una fibra (122n; 66) de entrada ópticamente acoplada a un láser de diodo que no está ópticamente acoplado al multiplexor (124);
 - un acoplador (130; 134) óptico ópticamente acoplado a un extremo distal de la fibra (126) óptica de lado de paso y un extremo distal de la fibra (122n) de entrada;
 - 15 una fibra (132) de transmisión ópticamente acoplada al acoplador (130) óptico;
 - 20 una óptica (128; 48) de paso ópticamente acoplada a un extremo distal de la fibra (132; 68) de transmisión, estando la óptica de paso operativamente asociada con una cámara (22; 54) de combustión y orientada para proyectar una salida de láser multiplexado a través de la cámara de combustión;
 - 25 en el que longitudes de onda de la luz de láser multiplexado oscilan entre 1240 nm y 5200 nm y longitudes de onda de la luz de láser no multiplexado son inferiores a 1240 nm;
 - en el que la fibra (122n; 66) de entrada es una fibra monomodo;
 - en el que la fibra (126) óptica de lado de paso proporciona transmisión monomodo de la luz de láser multiplexado;
 - 30 en el que la luz de láser de diodo pasará a ser multimodal tras la transmisión a través de la fibra (126) óptica de lado de paso; y
 - 35 en el que la fibra (132) óptica de transmisión es una sección de transmisión muy corta de fibra multimodo que no permite que se desarrollen los modos espaciales de orden superior para la luz de láser de diodo;
 - incluyendo además el aparato de detección:
 - 40 una óptica (52) de captación operativamente asociada con la cámara (22; 54) de combustión en comunicación óptica con la óptica (128; 48) de paso para recibir la salida de láser multiplexado proyectada a través de la cámara de combustión;
 - 45 una fibra (70) óptica de lado de captación ópticamente acoplada a la óptica de captación en un extremo proximal;
 - un desmultiplexor (62) ópticamente acoplado a un extremo distal de la fibra óptica de lado de captación, desmultiplexando el desmultiplexor luz de láser de cada una de las frecuencias de emisión de láser seleccionadas; y
 - 50 un detector (58) ópticamente acoplado con el desmultiplexor, siendo el detector sensible a una de las frecuencias de emisión de láser seleccionadas.
 - 55
 2. Aparato de detección según la reivindicación 1, en el que la longitud de la fibra óptica de transmisión se selecciona para mantener el ruido de modo por debajo de un nivel seleccionado.
 3. Aparato de detección según la reivindicación 1, en el que la fibra óptica de entrada no multiplexada es una fibra SM 750 y la fibra óptica de transmisión es una fibra óptica SMF 28.
 4. Aparato de detección según la reivindicación 2, en el que la longitud de la fibra óptica de transmisión es igual o inferior a tres metros.
 5. Aparato de detección según las reivindicaciones 1 a 4, que comprende además un motor que tiene un árbol sustancialmente paralelo a la fibra óptica multimodo de lado de captación, que está unido a dicha fibra para proporcionar un movimiento de torsión alrededor del eje longitudinal para minimizar el ruido de modo de lado de captación.

6. Aparato de detección según la reivindicación 5, en el que la fibra óptica multimodo de lado de captación tiene un eje longitudinal paralelo a la longitud de fibra y la manipulación mecánica comprende retorcer la fibra óptica multimodo de lado de captación alrededor del eje longitudinal.
- 5 7. Aparato de detección según la reivindicación 5, en el que los medios para manipular mecánicamente la sección de la fibra óptica multimodo de lado de captación comprenden un motor operativamente asociado con la fibra óptica multimodo de lado de captación de tal manera que la sección de fibra se une con respecto a una posición de árbol del motor, y el árbol de motor se barre de manera repetida mediante un movimiento de +360 grados y -360 grados.
- 10 8. Aparato de detección según la reivindicación 7, en el que la frecuencia del barrido de árbol de motor permite calcular eficazmente un promedio de la señal transmitida y, de ese modo, reducir el efecto del ruido de modo de lado de captación.
- 15 9. Aparato de detección según la reivindicación 8, en el que la frecuencia del árbol de barrido es igual o superior a 10 hercios.
- 20 10. Aparato de detección según las reivindicaciones 1 a 4, que comprende además un mecanismo de alineación de lado de captación operativamente asociado con la óptica de captación que proporciona la alineación de la óptica de captación con respecto a una dirección de la proyección de la salida de láser multiplexado para aumentar una cantidad de luz de láser acoplada a la fibra óptica de lado de captación.
- 25 11. Aparato de detección según la reivindicación 10, en el que el mecanismo de alineación de lado de captación comprende medios para inclinar la óptica de captación a lo largo de ejes ortogonales primero y segundo, siendo los ejes tanto primero como segundo sustancialmente ortogonales al haz de proyección.
- 30 12. Aparato de detección según la reivindicación 11, en el que los medios para inclinar la óptica de captación comprenden un motor a pasos.
- 35 13. Aparato de detección según la reivindicación 10, que comprende además: un haz de luz de alineación proyectado por la óptica de paso y recibido por la óptica de captación; y un sistema de procesamiento de datos operativamente asociado con el detector y el mecanismo de alineación de lado de captación, recibiendo el sistema de procesamiento de datos datos procedentes del detector relacionados con la intensidad del haz de alineación acoplado al detector y provocando además que el mecanismo de alineación de lado de captación alinee las ópticas de lado de captación con el haz de proyección para maximizar la intensidad del haz de alineación acoplado al detector.
- 40 14. Aparato de detección según la reivindicación 10, que comprende además un mecanismo de alineación de lado de paso que proporciona la alineación de la óptica de paso y el ajuste de la dirección del haz de proyección.
- 45 15. Aparato de detección según la reivindicación 14, en el que el mecanismo de alineación de lado de paso comprende medios para inclinar la óptica de paso a lo largo de ejes ortogonales primero y segundo, siendo los ejes tanto primero como segundo sustancialmente ortogonales al haz de proyección.
- 50 16. Aparato de detección según la reivindicación 15, en el que los medios para inclinar la óptica de paso comprenden un motor a pasos.
17. Aparato de detección según la reivindicación 13, en el que el sistema de procesamiento de datos provoca además que el mecanismo de alineación de lado de paso alinee la dirección del haz de proyección para maximizar la intensidad del haz de alineación recibido por la óptica de captación y acoplado al detector.

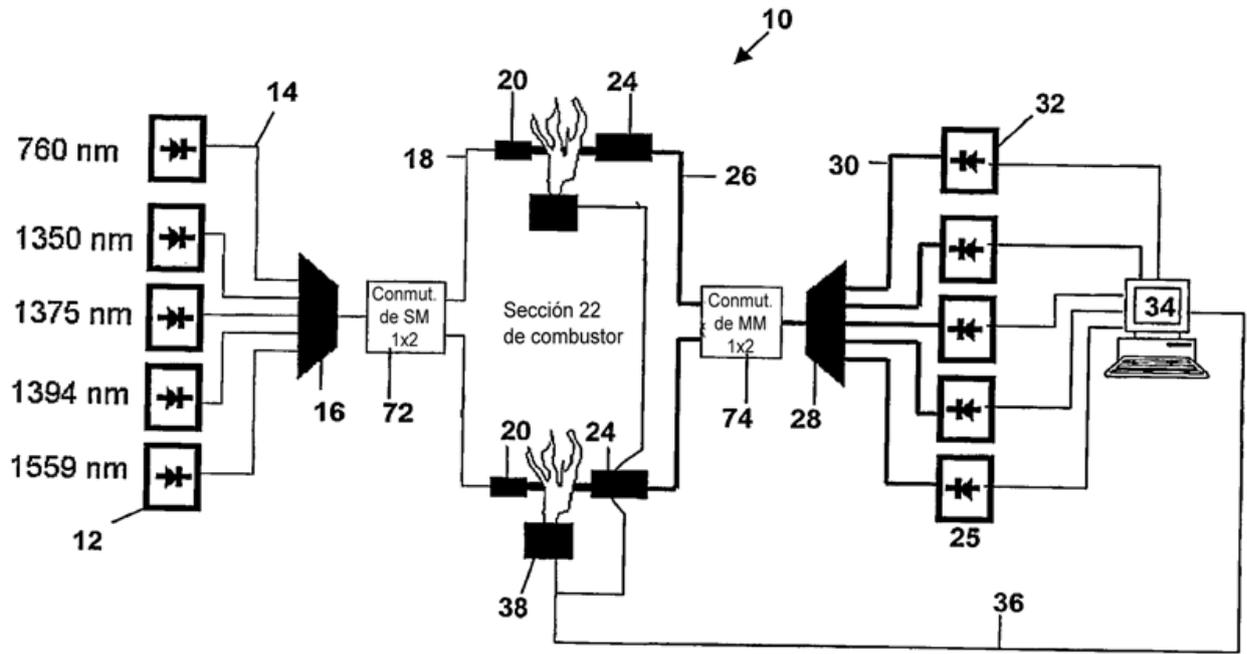


FIG. 1

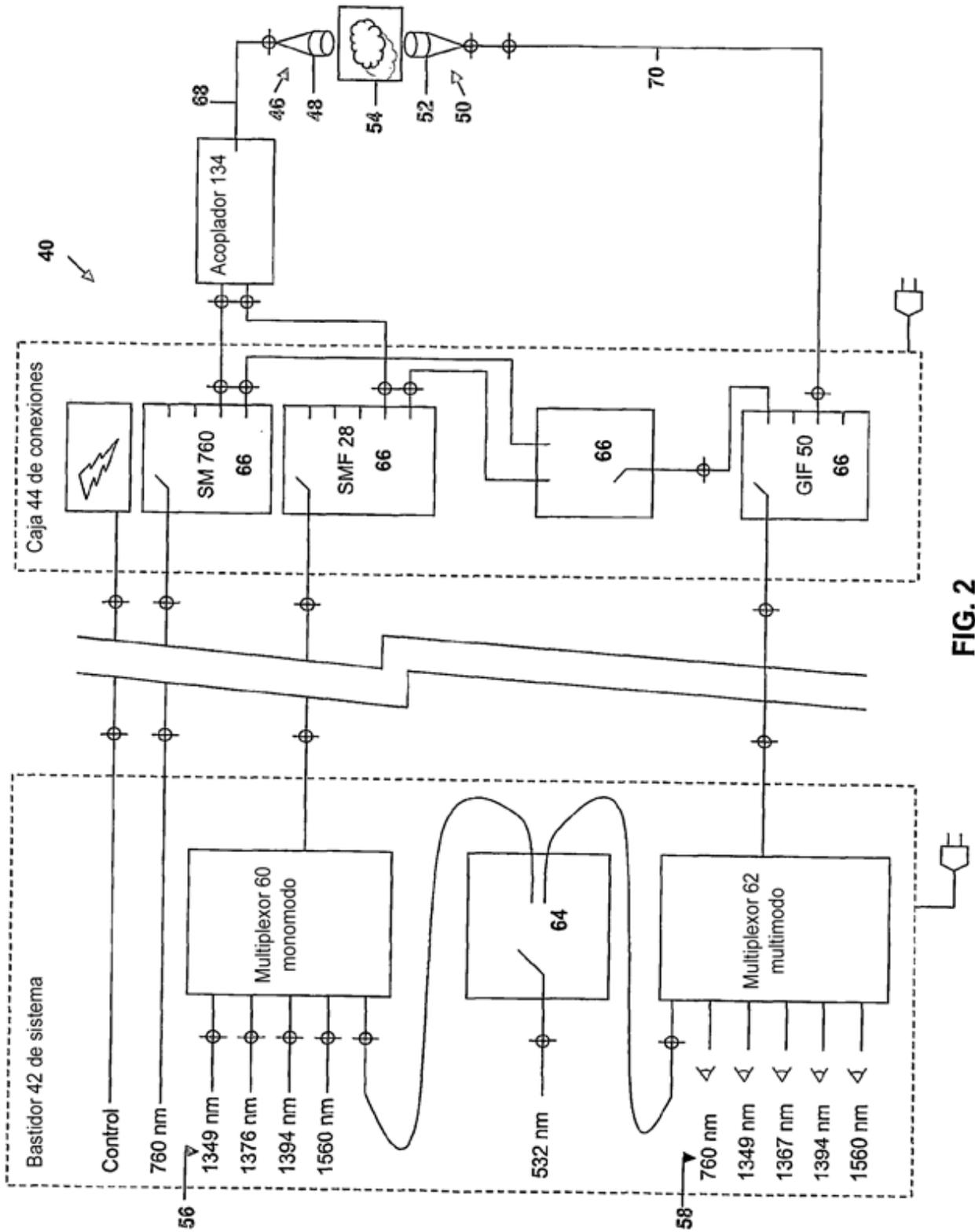


FIG. 2

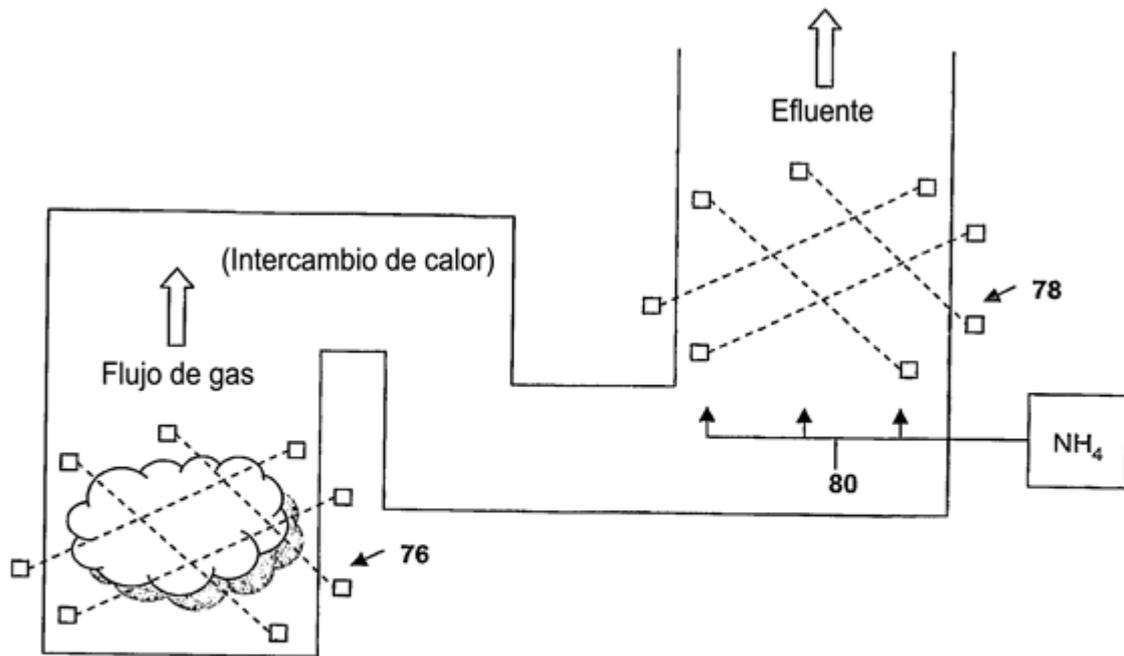


FIG. 3

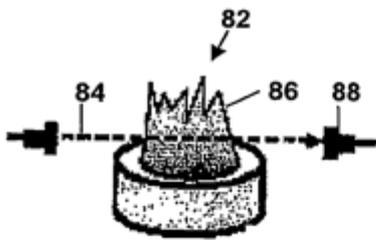


FIG. 4

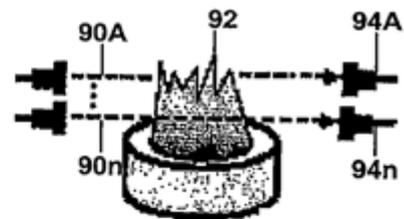


FIG. 5

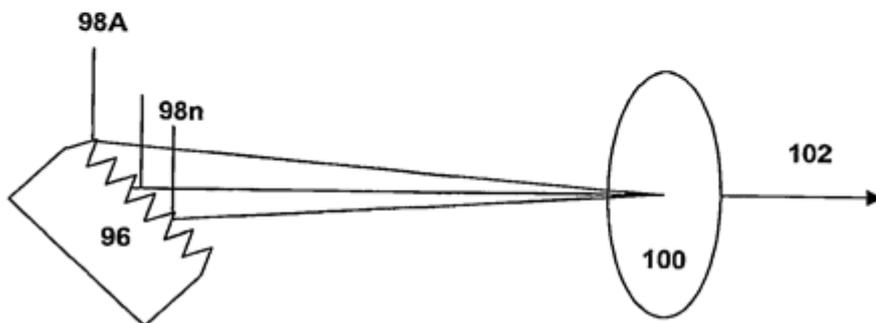


FIG. 6

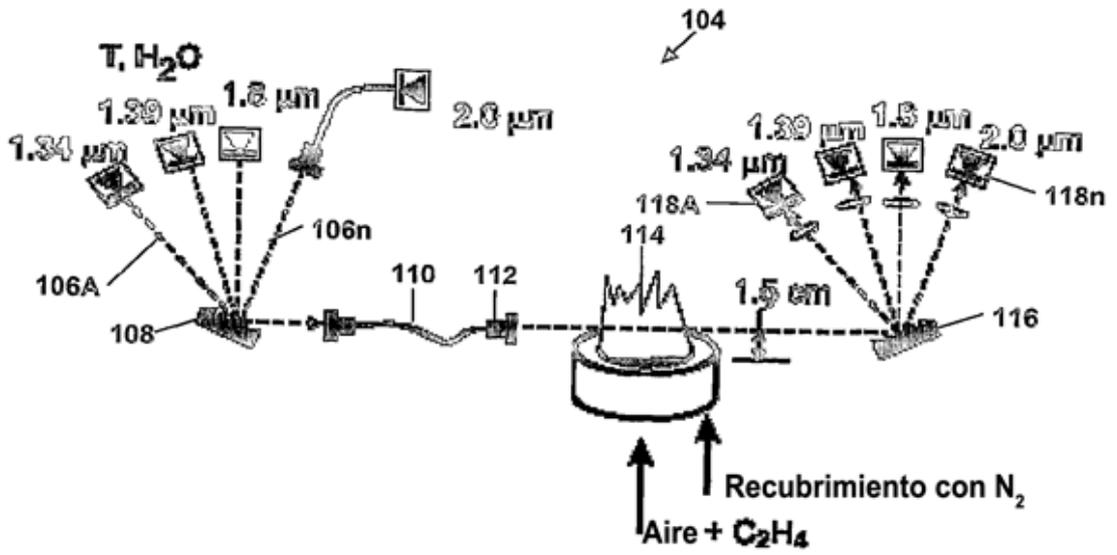


FIG. 7

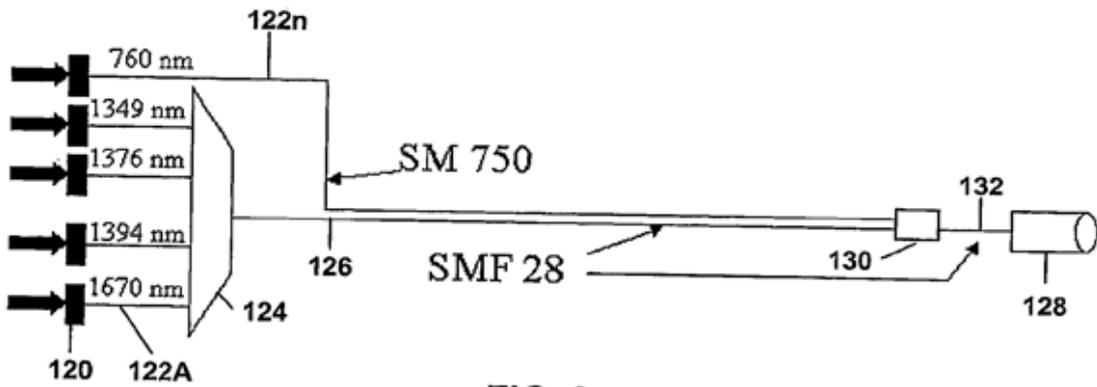


FIG. 8

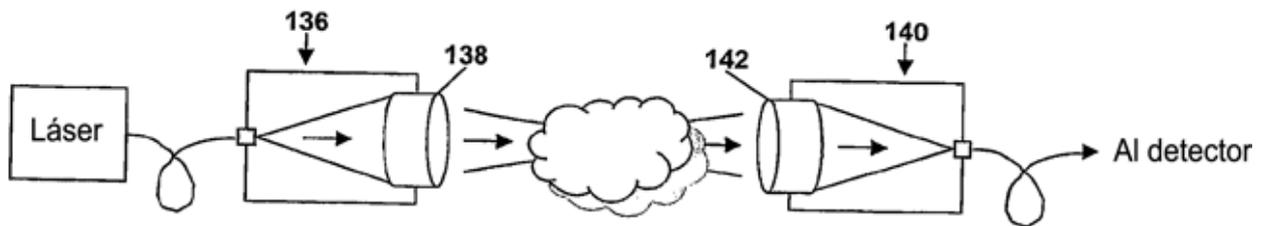


FIG. 9

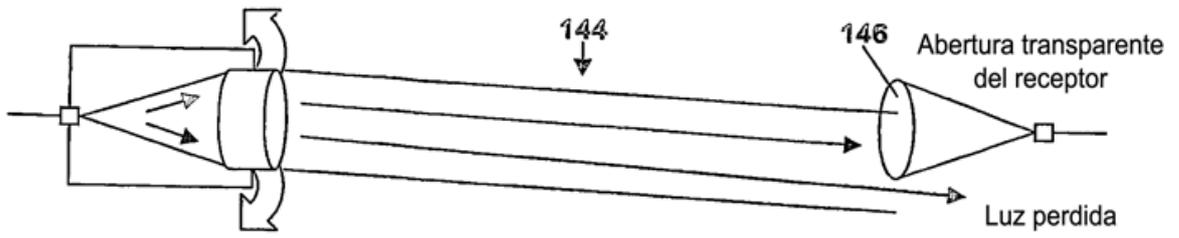


FIG. 10

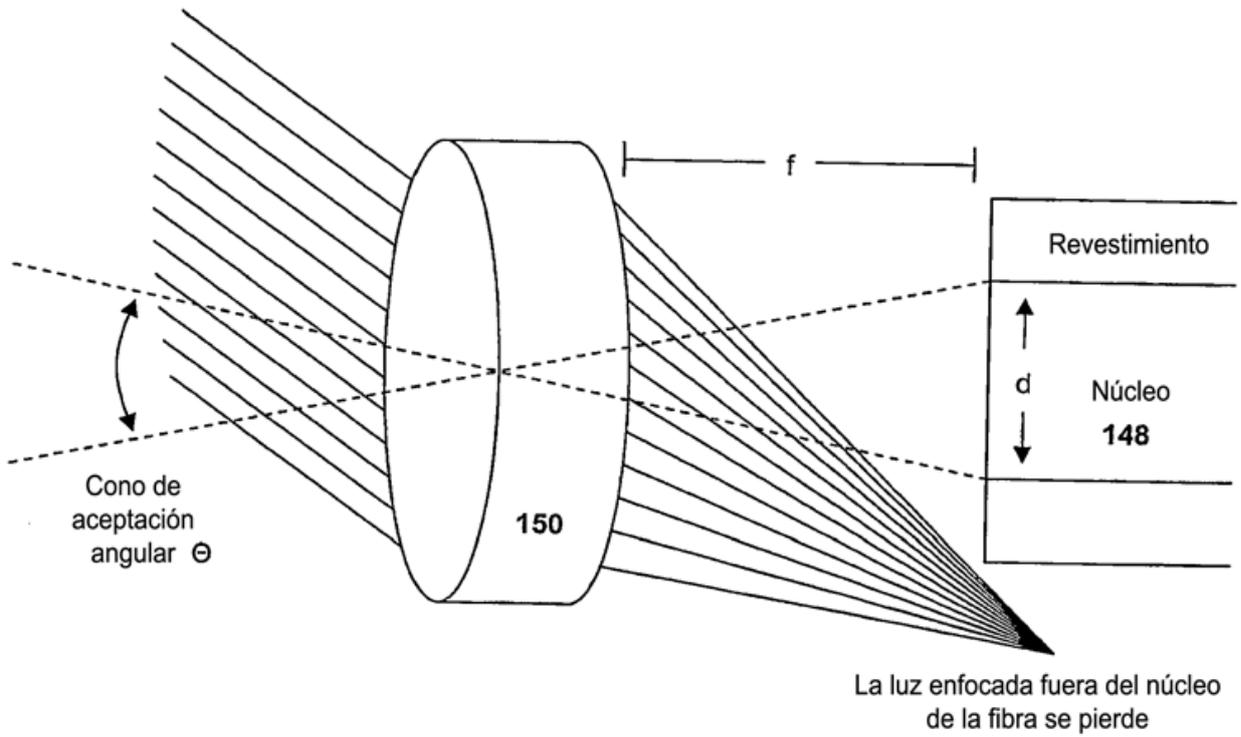


FIG. 11

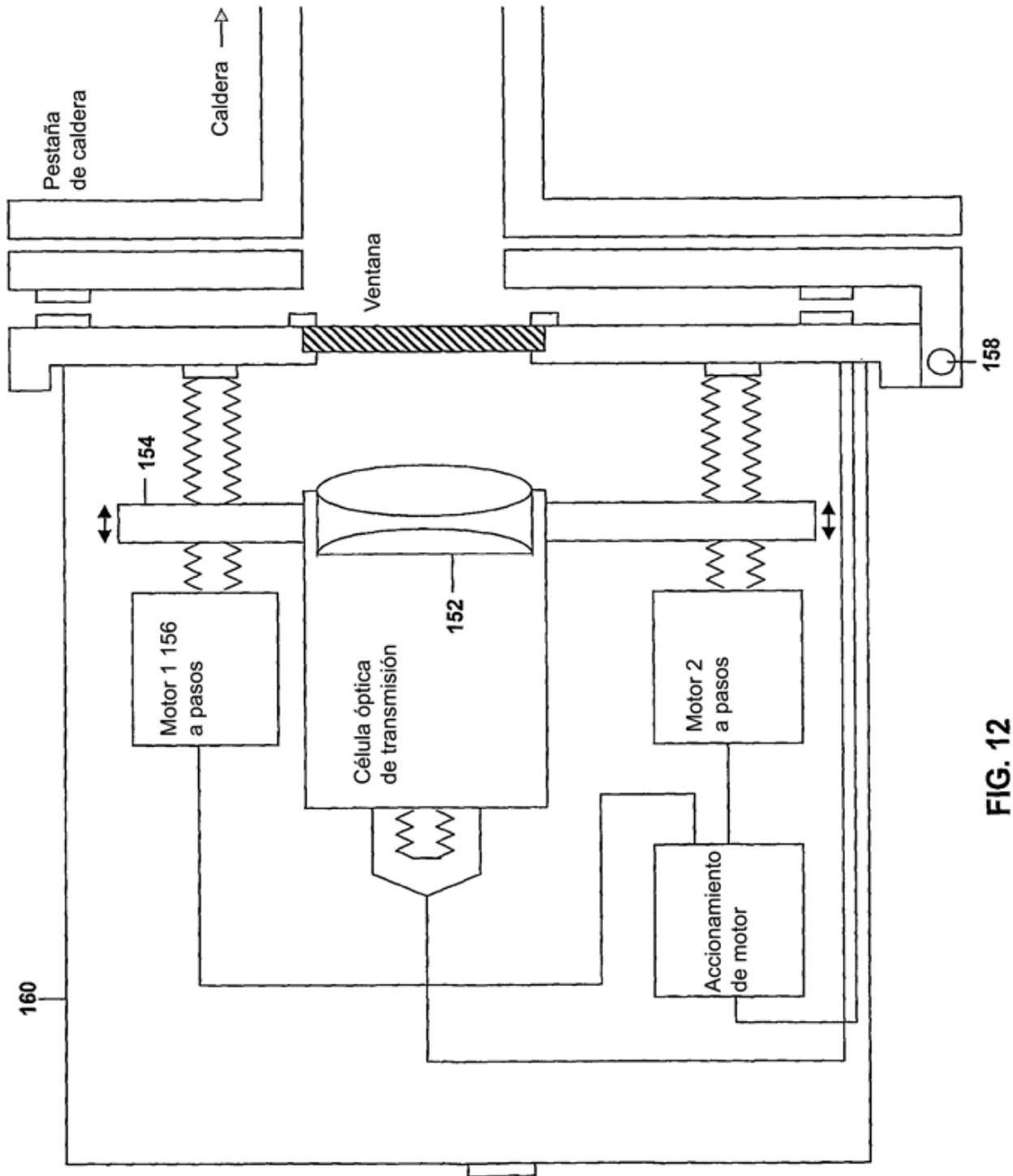


FIG. 12