

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **3 013 668**

51 Int. Cl.:

G01N 21/39 (2006.01)

G01N 21/3504 (2014.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **30.03.2020** **PCT/CN2020/082019**

87 Fecha y número de publicación internacional: **03.12.2020** **WO20238386**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.03.2020** **E 20813712 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **19.02.2025** **EP 3978906**

54 Título: **Dispositivo de detección de gases traza**

30 Prioridad:

29.05.2019 CN 201910456370

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

14.04.2025

73 Titular/es:

**UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
OF CHINA (100.00%)**

**No 96, Jinzhai Road Baohe District Hefei
Anhui 230026, CN**

72 Inventor/es:

**HU, SHUIMING;
WANG, JIN y
SUN, YU**

74 Agente/Representante:

ISERN JARA, Jorge

ES 3 013 668 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

Dispositivo de detección de gases traza

5 **Campo**

La presente solicitud se refiere al campo técnico de la detección óptica, y más específicamente se refiere a un procedimiento y un dispositivo para detectar gases traza.

10 **ANTECEDENTES**

La espectroscopia de absorción molecular (MAS, por sus siglas en inglés) es una técnica para medir la concentración del gas diana, que se realiza específicamente mediante: la medición de las líneas de absorción de un determinado componente del gas diana en el gas que se va a probar, para obtener la absorbancia de la molécula de gas diana, y el uso de la relación correspondiente entre la absorbancia y la concentración de la molécula de gas diana probada, para obtener la concentración del gas diana probado en el gas que se va a probar.

En la actualidad, la técnica de espectroscopia de absorción molecular comúnmente utilizada es medir la absorbancia de una cierta línea de absorción de la molécula de gas diana (isótopo), lo que satisface la relación de Beer-Lambert. La base de datos HITRAN describe docenas de los parámetros de absorción de las principales moléculas atmosféricas y sus isótopos. Durante la medición, para evitar verse afectado por algunos efectos, por ejemplo, la deriva de potencia de la luz láser, las fluctuaciones de transmitancia del medio óptico, generalmente es necesario escanear la longitud de onda y registrar el espectro láser dentro de un cierto intervalo de longitud de onda, para obtener una envolvente completa de una línea espectral aislada de la molécula diana; y luego integrar la envolvente para obtener el área, y se obtiene la concentración del gas diana. El documento WO2014/170828A1 describe un aparato de espectrometría de anillo descendente en condición de saturación de absorción para medir la concentración de gases traza mediante espectroscopia Scar. Tian-Peng Hua y col., revisa tres procedimientos diferentes mejorados por cavidad, a saber, espectroscopia de absorción mejorada por cavidad, espectroscopia de anillo descendente por cavidad y espectroscopia molecular heterodina óptica mejorada por cavidad inmune al ruido, y compara la sensibilidad y precisión de estos procedimientos. Según este documento, un láser se bloquea a una frecuencia de resonancia de una cavidad óptica utilizando el procedimiento Pound-Drever-Hall y el escaneo de la frecuencia del láser se logra sintonizando la longitud de la cavidad óptica utilizando un PZT unido a un espejo de cavidad.

("Cavity-enhanced Saturation Spectroscopy of Molecules with sub-kHz Accuracy", Chinese-Journal of Chemical Physics, Vol.32, No.1, 01-02-2019, págs. 107-112).

Sin embargo, el ancho de ensanchamiento Doppler (ancho completo a la mitad del máximo) de las transiciones del infrarrojo cercano puede alcanzar cientos de MHz en condiciones de temperatura normal o alta temperatura, incluso a baja presión. Debido a la presencia de otras moléculas (o isótopos) en el gas de fondo, si las moléculas diana (isótopos) tienen un bajo contenido o una línea de absorción débil (es decir, cuando el gas diana es un gas traza), las líneas espectrales se cubren fácilmente por la absorción de otros gases de fondo. Como resultado, la señal de absorción de la línea diana se ocultará en el fondo y no podrá extraerse, lo que dará como resultado una medición no válida.

Por lo tanto, en la tecnología existente, se ha adoptado el procedimiento de medición del espectro de absorción molecular saturado del gas traza, esperando aprovechar las estrechas líneas espectrales de la espectroscopia de absorción molecular saturada, y que no se vea afectado por la absorción del gas de fondo, para realizar la medición de la concentración del gas a probar. Sin embargo, se ha descubierto que mediante el uso de láseres de onda continua, la transición molecular no se puede saturar fácilmente en condiciones de temperatura normal, por lo que no se puede lograr el propósito de usar láseres de onda continua convencionales para medir gases traza en condiciones de temperatura normal.

RESUMEN

Con el fin de resolver los problemas técnicos anteriores, esta solicitud proporciona un procedimiento y un sistema para detectar gases traza, para detectar la concentración de un gas traza o su isótopo, mediante el uso de la espectroscopia de absorción molecular saturada mejorada por cavidad libre de Doppler en condiciones de temperatura normal.

Para lograr el propósito técnico anterior, la invención proporciona un sistema según la reivindicación 1. Se describen realizaciones adicionales en las reivindicaciones dependientes.

Un procedimiento para detectar un gas traza comprende:

proporcionar una cavidad resonante, y llenar el interior de la cavidad resonante con un gas que se va a probar, donde el gas que se va a probar contiene un gas traza que se va a probar;

- proporcionar luz de sonda con diferentes frecuencias, donde la luz de sonda entra en el interior de la cavidad resonante desde un extremo de la cavidad resonante en una dirección de extensión de la cavidad resonante, y sale del otro extremo de la cavidad resonante en una dirección de extensión de la cavidad resonante, para capturar la luz de sonda que transporta información del gas traza que se va a probar, la cavidad de la cavidad resonante tiene un grado de libertad retráctil en la dirección de extensión de la cavidad resonante, de modo que una frecuencia de un modo longitudinal de la cavidad resonante coincide con una frecuencia de la luz de sonda entrante; y
- obtener un espectro de absorción molecular saturado del gas traza que se va a probar según la luz de la sonda que transporta la información del gas traza que se va a probar con diferentes frecuencias, y calcular la concentración del gas traza que se va a probar en el gas que se va a probar según el espectro de absorción molecular saturado del gas traza.
- La presente invención proporciona un sistema donde un dispositivo generador de luz láser, una cavidad resonante, un dispositivo de detección fotoeléctrica, un dispositivo de control de retroalimentación y un dispositivo de control de escaneo, donde
- el interior de la cavidad de la cavidad resonante está configurado para llenarse con un gas que se va a probar, donde el gas que se va a probar contiene un gas traza que se va a probar; y la cavidad de la cavidad resonante tiene un grado de libertad retráctil en la dirección de extensión de la cavidad resonante;
- el dispositivo generador de luz láser está configurado para proporcionar luz de sonda con diferentes frecuencias bajo el control del dispositivo de control de retroalimentación, donde la luz de sonda entra en el interior de la cavidad resonante desde un extremo de la cavidad resonante en una dirección de extensión de la cavidad resonante, y sale del otro extremo de la cavidad resonante en una dirección de extensión de la cavidad resonante, para capturar la luz de sonda que transporta información del gas traza que se va a probar;
- el dispositivo de detección fotoeléctrica está configurado para convertir la luz de sonda que transporta información del gas traza que se va a probar en información de detección en forma de señal eléctrica;
- el dispositivo de control de escaneo está configurado para registrar la información de detección en forma de señal eléctrica, y para controlar el dispositivo generador de luz láser para ajustar la frecuencia de la luz de sonda saliente de manera escalonada; y
- el dispositivo de control de retroalimentación está configurado para controlar la frecuencia de la luz de sonda saliente del dispositivo generador de luz láser para que coincida con una frecuencia de un modo longitudinal de la cavidad resonante.
- Según la presente invención, la cavidad resonante comprende:
- una carcasa, que tiene un extremo entrante y un extremo saliente que están dispuestos opuestos entre sí;
- un primer reflector ubicado dentro de la carcasa y cerca del lado del extremo entrante, donde se proporciona una película antirreflectante en un lado del primer reflector mirando hacia el extremo entrante;
- un segundo reflector ubicado dentro de la carcasa y cerca del lado del extremo saliente, donde las superficies reflectantes del primer reflector y el segundo reflector están dispuestas opuestas entre sí; y
- un dispositivo piezoeléctrico dispuesto adyacente al primer reflector y/o dispuesto adyacente al segundo reflector, donde el dispositivo piezoeléctrico está configurado para empujar el primer reflector y/o el segundo reflector adyacente al dispositivo piezoeléctrico para moverse según una señal eléctrica de control recibida, para proporcionar a la cavidad de la cavidad resonante un grado de libertad retráctil en la dirección de extensión de la cavidad resonante.
- Según la presente invención, el dispositivo de control de realimentación comprende: una fuente de señal de radiofrecuencia, un dispositivo de detección de fase y un dispositivo de amplificación PID, donde
- la fuente de señal de radiofrecuencia está configurada para generar una señal de radiofrecuencia sinusoidal;
- el dispositivo de detección de fase está configurado para convertir la información de detección en forma de señal eléctrica en una señal de error según la señal de radiofrecuencia sinusoidal; y
- el dispositivo de amplificación PID está configurado para convertir la señal de error en una señal de bloqueo de retroalimentación, de modo que la frecuencia de la luz de sonda que sale del dispositivo generador de luz láser coincida con la frecuencia del modo longitudinal de la cavidad resonante.

Opcionalmente, el dispositivo generador de luz láser comprende un láser, un dispositivo de modulación de frecuencia y una lente de acoplamiento, donde

el láser está configurado para generar una luz láser;

el dispositivo de modulación de frecuencia está configurado para modular la luz láser generada por el láser según la información de bloqueo de retroalimentación, para obtener luz de sonda con una frecuencia que coincide con la frecuencia del modo longitudinal de la cavidad resonante; y

la lente de acoplamiento está configurada para acoplar la luz de sonda y permitir que la luz de sonda acoplada entre en la cavidad resonante.

Opcionalmente, el dispositivo de modulación de frecuencia es un modulador electroóptico.

Según la presente invención, el dispositivo de control de escaneo comprende un dispositivo de almacenamiento de información y un dispositivo de escaneo de frecuencia, donde

el dispositivo de almacenamiento de información está configurado para registrar la información de detección en forma de señal eléctrica; y

el dispositivo de escaneo de frecuencia está configurado para generar una señal eléctrica de control y para transmitir la señal eléctrica de control al láser.

Según la presente invención, el dispositivo de control de escaneo está configurado además para obtener un espectro de absorción molecular saturada del gas traza que se va a probar según la información de detección registrada en forma de señal eléctrica, y para calcular la concentración del gas traza que se va a probar en el gas que se va a probar según el espectro de absorción molecular saturada del gas traza.

Opcionalmente, el dispositivo de detección fotoeléctrica comprende un módulo de coincidencia de lentes y un módulo de detección fotoeléctrica, donde

el módulo de coincidencia de lentes está configurado para coincidir con el patrón espacial de un campo de luz dentro del dispositivo de detección fotoeléctrica; y

el módulo de detección fotoeléctrica está configurado para convertir la luz de sonda que transporta la información del gas traza que se va a probar en la información de detección en forma de señal eléctrica.

Se puede ver a partir de la solución técnica descrita anteriormente que las realizaciones de esta solicitud proporcionan un sistema para detectar un gas traza. En un procedimiento para detectar un gas traza, el gas que se va a probar se introduce en la cavidad resonante. Por un lado, la cavidad resonante mejora la potencia del láser de la luz de la sonda que entra en la cavidad resonante para mejorar los parámetros de saturación de la transición molecular del gas traza que se va a probar y, por otro lado, mejora el rango de absorción efectiva del gas traza que se va a probar, de modo que aumenta la sensibilidad para detectar la absorción débil del gas traza que se va a probar y se obtiene el espectro de absorción molecular saturado del gas traza que se va a probar, lo que cumple el propósito de detectar la concentración de un gas traza mediante el uso de la luz de la sonda suministrada por un láser convencional en condiciones de temperatura normal.

Además, debido a la propiedad de ensanchamiento libre de Doppler del espectro de absorción molecular saturado, el espectro de absorción molecular saturado obtenido del gas traza que se va a probar puede separarse eficazmente de los espectros de absorción de las moléculas de gas de fondo en el gas que se va a probar, eliminando así la interferencia del gas de fondo y realizando la detección del gas traza que se va a probar. Dado que las frecuencias de los espectros de absorción saturada de los diferentes isótopos moleculares son significativamente diferentes, el procedimiento para detectar el gas traza proporcionado por la realización de la presente solicitud también es particularmente eficaz para detectar una molécula con un isótopo específico.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

En lo sucesivo, para ilustrar más claramente las soluciones técnicas en las realizaciones de la presente descripción o la tecnología existente, se hará una breve introducción a los dibujos que deben usarse en la descripción de las realizaciones o la tecnología existente. Es obvio que los dibujos descritos a continuación son solo algunos ejemplos de la presente descripción y que para los expertos en la materia, otros dibujos también pueden derivarse de ellos sin esfuerzo inventivo.

La FIG. 1 es un diagrama de flujo esquemático de un procedimiento para detectar un gas traza proporcionado por una realización de esta solicitud;

La FIG. 2 es un diagrama de estructura esquemático de una cavidad resonante proporcionada por una realización de esta solicitud; y

5 La Fig. 3 es un diagrama de estructura esquemático de un sistema para detectar un gas traza proporcionado por una realización de esta solicitud;

La FIG. 4 es un dibujo que muestra la relación entre la presión parcial del gas traza que se va a probar ($^{12}\text{C}^{16}\text{O}$) en el gas a probar y el área de inmersión de Lamb de la transición R(19) del mismo obtenida por simulación; y

10 La FIG. 5 es un espectro de absorción molecular saturada medido de la transición molecular R(19) mejorada por cavidad a $V=3-0$.

DESCRIPCIÓN DETALLADA

15 Como se mencionó en los antecedentes, la espectroscopia de absorción láser comúnmente utilizada es medir la absorbancia de una línea de absorción de la molécula de gas diana (isótopo), que satisface la relación de Beer-Lambert:

$$T_v = I_v / I_0 = \exp(-k_v L),$$

20 donde T_v representa la transmitancia de un láser después de pasar por la longitud de la trayectoria óptica L en un medio, k_v es la absorbancia, que es una función de la concentración X_{gas} de una molécula de gas diana medida, la intensidad de la línea de absorción $S(T)$ y la función lineal $\varphi(v)$ bajo la presión de P y la función lineal satisface $\int \varphi(v) dv = 1$, donde v representa la frecuencia. La absorbancia k_v se puede expresar como:

$$25 \quad k_v = S(T) X_{\text{gas}} P \varphi(v),$$

30 donde $\varphi(v)$ es la función lineal obtenida por convolución del perfil de ensanchamiento Doppler gaussiano y el perfil de ensanchamiento de presión Lorentziano, y satisface $\int \varphi(v) dv = 1$. La base de datos HITRAN describe los parámetros de la línea de absorción de docenas de moléculas atmosféricas principales y sus isótopos (incluido el centro de las líneas espectrales, $S(T)$, etc.). Durante la medición, para evitar verse afectado por los efectos tales como la deriva de la energía de la luz láser, las fluctuaciones de la transmitancia del medio óptico, generalmente es necesario escanear la longitud de onda y registrar el espectro del láser dentro de un cierto intervalo de longitud de onda, para obtener una envolvente completa de una línea espectral aislada de la molécula de gas diana. Al eliminar la influencia

35 de la función lineal $\varphi(v)$ de manera integral, se obtiene la concentración del gas diana.

Sin embargo, el ensanchamiento Doppler (ancho completo a la mitad del máximo) de las transiciones moleculares del infrarrojo cercano puede alcanzar el nivel de cientos de MHz en condiciones de temperatura normal o alta temperatura, incluso a baja presión. Debido a la presencia de otras moléculas (o isótopos) en el gas de fondo, si las moléculas de gas diana (isótopos) tienen un bajo contenido o una línea de absorción débil, las líneas espectrales se cubren fácilmente por la absorción de otros gases de fondo. Como resultado, la señal de absorción de la línea diana se ocultará en el fondo y no podrá extraerse, lo que provocará un fallo de medición.

40 Un espectro de absorción molecular saturado se deriva de la reducción de las señales de absorción medidas por un haz de sonda como resultado de una disminución del número de moléculas distribuidas en un estado inferior cuando un haz de excitación con un ancho de línea estrecho excita algunas moléculas a un estado superior. En el caso de que el haz de excitación y el haz de sonda tengan la misma frecuencia pero direcciones opuestas, ambos solo interactúan con moléculas con velocidad lateral cero, y una inmersión de absorción libre de ensanchamiento Doppler con un ancho de línea muy estrecho se denomina inmersión de Lamb. Dado que el espectro de absorción molecular saturado generalmente tiene un ancho de línea más estrecho que el ensanchamiento Doppler en aproximadamente tres órdenes de magnitud, no se verá afectado por la absorción de otros gases de fondo, mejorando así en gran medida la selectividad de detección.

45 La profundidad $\Delta\alpha$ del pico de absorción molecular saturado (inmersión de Lamb) puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

55

$$\Delta\alpha = \frac{\alpha_m P_i}{\sqrt{1+S}} - \frac{\alpha_m P_i}{\sqrt{1+2S}};$$

donde P_i es una presión parcial de un gas que se va a probar, $\alpha_m P_i$ es el coeficiente de absorción de una molécula que se va a probar sin considerar el efecto de saturación, S es un parámetro de saturación que se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$S = \frac{I}{I_s} = \frac{I}{I_{s0} [1 + (\frac{\Gamma_p P}{\Gamma_r})^2]};$$

donde I_s es una energía de saturación, I_{s0} es una energía de saturación de un gas que se va a probar en el límite de presión cero, Γ_p es un coeficiente de ampliación de presión para representar la relación entre el ancho de línea de un espectro de absorción molecular saturado y una presión de gas, Γ_i es un tiempo de tránsito ampliado, y P es una presión total del gas de muestra. El área de inmersión de Lamb puede obtenerse mediante la siguiente ecuación:

$$A = \Delta\alpha \times \Gamma_{Lamb} = \alpha_m P_i (\Gamma_p P + \Gamma_r) \left(\frac{1}{\sqrt{1+S}} - \frac{1}{\sqrt{1+2S}} \right);$$

donde Γ_{Lamb} es el ancho completo a la mitad del máximo de la inmersión de Lamb. La concentración del gas que se va a probar se puede calcular según el área obtenida de la inmersión de Lamb.

Sin embargo, todavía hay muchas dificultades en el uso de espectros de absorción molecular saturada para detectar moléculas traza. La primera es que los momentos de transición vibracionales y rotacionales del infrarrojo cercano de una molécula son muy pequeños, y el ensanchamiento del tránsito molecular (aproximadamente cientos de kHz) es mucho más grande que el ensanchamiento natural (incluso más pequeño que sub-Hz) en condiciones de temperatura normal, de modo que la transición solo se puede saturar a una energía de láser muy alta (por encima de kW/cm²). El láser semiconductor de onda continua comúnmente utilizado en la detección de gases no puede cumplir con los requisitos. Además, la absorción saturada se ve más afectada por el ensanchamiento de la presión. Para obtener un espectro de absorción saturado con suficiente contraste, la medición debe realizarse a baja presión (10 Pa o menos), lo que requiere una mayor sensibilidad de la medición.

En vista de ello, una realización de esta solicitud proporciona un procedimiento para detectar un gas traza que comprende:

proporcionar una cavidad resonante, y llenar el interior de la cavidad resonante con un gas que se va a probar, donde el gas que se va a probar contiene un gas traza que se va a probar;

proporcionar luz de sonda con diferentes frecuencias, donde la luz de sonda entra en el interior de la cavidad resonante desde un extremo de la cavidad resonante en una dirección de extensión de la cavidad resonante, y sale del otro extremo de la cavidad resonante en una dirección de extensión de la cavidad resonante, para capturar la luz de sonda que transporta información del gas traza que se va a probar, la cavidad de la cavidad resonante tiene un grado de libertad retráctil en la dirección de extensión de la cavidad resonante, de modo que una frecuencia de un modo longitudinal de la cavidad resonante coincide con la frecuencia de la luz de sonda entrante; y

obtener un espectro de absorción molecular saturado del gas traza que se va a probar según la luz de la sonda que transporta la información del gas traza que se va a probar con diferentes frecuencias, y calcular la concentración del gas traza que se va a probar en el gas que se va a probar según el espectro de absorción molecular saturado del gas traza.

En el procedimiento para detectar un gas traza, el gas que se va a probar se introduce en la cavidad resonante. Por un lado, la cavidad resonante mejora la potencia del láser de la luz de la sonda que entra en la cavidad resonante para mejorar los parámetros de saturación de la transición molecular del gas traza que se va a probar y, por otro lado, mejora el rango de absorción efectiva del gas traza que se va a probar, de modo que aumenta la sensibilidad para detectar la absorción débil del gas traza que se va a probar y se obtiene el espectro de absorción molecular saturado del gas traza que se va a probar, lo que cumple el propósito de detectar la concentración de un gas traza mediante el uso de la luz de la sonda suministrada por un láser convencional en condiciones de temperatura normal.

Además, debido a la propiedad de ensanchamiento libre de Doppler del espectro de absorción molecular saturado, el espectro de absorción molecular saturado obtenido del gas traza que se va a probar puede separarse eficazmente de los espectros de absorción de las moléculas de gas de fondo en el gas que se va a probar, eliminando así la interferencia del gas de fondo y realizando la detección del gas traza que se va a probar. Dado que las frecuencias de los espectros de absorción saturada de los diferentes isótopos moleculares son significativamente diferentes, el procedimiento para detectar el gas traza proporcionado por la realización de la presente solicitud también es particularmente eficaz para detectar una molécula con un isótopo específico.

En lo sucesivo, las soluciones técnicas en las realizaciones de esta solicitud se describirán de forma clara y completa, junto con los dibujos en los ejemplos de esta solicitud. Obviamente, las realizaciones descritas son solo una parte de las realizaciones de esta solicitud, en lugar de todas las realizaciones. Basándose en las realizaciones en esta solicitud, todas las demás realizaciones que obtenga un experto en la materia sin trabajo creativo deben estar dentro del alcance de protección de esta solicitud.

Como se muestra en la FIG. 1, una realización de esta solicitud proporciona un procedimiento para detectar un gas traza que comprende:

S101: proporcionar una cavidad resonante, y llenar el interior de la cavidad resonante con un gas que se va a probar, donde el gas que se va a probar contiene un gas traza que se va a probar;

S102: proporcionar luz de sonda con diferentes frecuencias, donde la luz de sonda entra en el interior de la cavidad resonante desde un extremo de la cavidad resonante en una dirección de extensión de la cavidad resonante, y sale del otro extremo de la cavidad resonante en una dirección de extensión de la cavidad resonante, para capturar la luz de sonda que transporta información del gas traza que se va a probar, la cavidad de la cavidad resonante tiene un grado de libertad retráctil en la dirección de extensión de la cavidad resonante, de modo que una frecuencia de un modo longitudinal de la cavidad resonante coincide con la frecuencia de la luz de sonda entrante; y

S103: obtener un espectro de absorción molecular saturado del gas traza que se va a probar según la luz de la sonda que transporta la información del gas traza que se va a probar con diferentes frecuencias, y calcular la concentración del gas traza que se va a probar en el gas que se va a probar según el espectro de absorción molecular saturado del gas traza.

Cabe señalar que el gas traza se refiere a un componente de gas con un contenido de componente muy bajo (nivel de ppm o inferior) en una muestra de gas a una cierta presión. Por ejemplo, el dióxido de carbono o el metano y su gas isótopo en el aire pueden considerarse como el gas traza.

Un ejemplo de esta solicitud proporciona una posible estructura de la cavidad resonante. Con referencia a la FIG. 2, en este ejemplo, la cavidad resonante incluye una carcasa, un primer reflector 22, un segundo reflector 23 y al menos un dispositivo piezoeléctrico (no mostrado en la FIG. 2) que están dispuestos en la carcasa 21, donde la carcasa 21 comprende un extremo entrante y un extremo saliente que están dispuestos opuestos entre sí; el primer reflector 22 y el segundo reflector 23 están dispuestos respectivamente cerca del extremo entrante y el extremo saliente; y la superficie reflectante del primer reflector 22 y el segundo reflector 23 son opuestos entre sí; el primer reflector 22 dispuesto cerca del extremo entrante puede estar unido con una película antirreflectante en su lado orientado hacia el extremo entrante, para aumentar la transmitancia de la luz de la sonda entrante.

En este ejemplo, en el procedimiento para detectar un gas traza, el gas que se va a probar se introduce en la cavidad resonante. Por un lado, la cavidad resonante mejora la potencia del láser de la luz de la sonda que entra en la cavidad resonante para mejorar los parámetros de saturación de la transición molecular del gas traza que se va a probar y, por otro lado, mejora el rango de absorción efectiva del gas traza que se va a probar, de modo que aumenta la sensibilidad para detectar la absorción débil del gas traza que se va a probar y se obtiene el espectro de absorción molecular saturado del gas traza que se va a probar, lo que cumple el propósito de detectar la concentración de un gas traza mediante el uso de la luz de la sonda suministrada por un láser convencional en condiciones de temperatura normal.

Además, debido a la propiedad de ensanchamiento libre de Doppler del espectro de absorción molecular saturado, el espectro de absorción molecular saturado obtenido del gas traza que se va a probar puede separarse eficazmente de los espectros de absorción de las moléculas de gas de fondo en el gas que se va a probar, eliminando así la interferencia del gas de fondo y realizando la detección del gas traza que se va a probar. Dado que las frecuencias de los espectros de absorción saturada de los diferentes isótopos moleculares son significativamente diferentes, el procedimiento para detectar el gas traza proporcionado por la realización de la presente solicitud también es particularmente eficaz para detectar una molécula con un isótopo específico.

En lo sucesivo, un ejemplo de esta solicitud proporciona un sistema para detectar gas traza que permite implementar el procedimiento para detectar un gas traza. Como se muestra en la FIG. 3, el sistema para detectar gas traza comprende: un dispositivo generador de luz láser 10, una cavidad resonante 20, un dispositivo de detección fotoeléctrica 30, un dispositivo de control de retroalimentación 40 y un dispositivo de control de escaneo 50; donde

el interior de la cavidad de la cavidad resonante 20 está configurado para llenarse con un gas que se va a probar, donde el gas que se va a probar contiene un gas traza que se va a probar; y la cavidad de la cavidad resonante 20 tiene un grado de libertad retráctil en la dirección de extensión de la cavidad resonante 20;

el dispositivo generador de luz láser 10 está configurado para proporcionar luz de sonda con diferentes frecuencias bajo el control del dispositivo de control de retroalimentación 40, donde la luz de sonda entra en el interior de la cavidad resonante 20 desde un extremo de la cavidad resonante 20 en una dirección de extensión de la cavidad resonante, y sale del otro extremo de la cavidad resonante 20 en una dirección de extensión de la cavidad resonante, para capturar la luz de sonda que transporta información del gas traza que se va a probar;

el dispositivo de detección fotoeléctrica 30 está configurado para convertir la luz de sonda que transporta información del gas traza que se va a probar en información de detección en forma de señal eléctrica;

el dispositivo de control de escaneo 50 está configurado para registrar la información de detección en forma de señal eléctrica, y para controlar el dispositivo generador de luz láser 10 para ajustar la frecuencia de la luz de sonda saliente de manera escalonada; y

el dispositivo de control de retroalimentación 40 está configurado para controlar la frecuencia de la luz de sonda saliente del dispositivo generador de luz láser 10 para que coincida con una frecuencia de un modo longitudinal de la cavidad resonante 20.

En este ejemplo, debido a que el dispositivo de control de retroalimentación 40 puede controlar la frecuencia de la luz de sonda saliente del dispositivo generador de luz láser 10 para que coincida con la frecuencia del modo longitudinal de la cavidad resonante 20, el dispositivo de control de escaneo 50 solo puede configurarse para controlar el dispositivo generador de luz láser 10 para ajustar la frecuencia de la luz de sonda saliente de manera escalonada. Cuando la frecuencia de la luz de sonda saliente del dispositivo generador de luz láser 10 se ha cambiado bajo el control del dispositivo de control de escaneo 50, el dispositivo de control de retroalimentación 40 ajusta la frecuencia del modo longitudinal de la cavidad resonante 20 y/o la frecuencia de la luz de sonda saliente del dispositivo generador de luz láser 10 en tiempo real, para permitir que la frecuencia de la luz de sonda saliente del dispositivo generador de luz láser 10 coincida con la frecuencia del modo longitudinal de la cavidad resonante 20.

Además, el propósito del dispositivo de control de escaneo 50 que controla el dispositivo generador de luz láser 10 para ajustar la frecuencia de la luz de sonda saliente de manera escalonada es permitir que el dispositivo de control de escaneo 50 registre la información de detección en una forma de señal eléctrica correspondiente a la información del gas traza que se va a probar transportado por la luz de sonda con diferentes frecuencias, de modo que el espectro de absorción molecular saturado del gas de traza que se va a probar se puede obtener según la información de detección registrada en una forma de señal eléctrica, y la concentración del gas traza que se va a probar en el gas que se va a probar se puede calcular según el espectro de absorción molecular saturado del gas traza.

Opcionalmente, en un ejemplo de esta solicitud, el dispositivo de control de escaneo 50 está configurado además para obtener un espectro de absorción molecular saturada del gas traza que se va a probar según la información de detección registrada en forma de señal eléctrica, y para calcular la concentración del gas traza que se va a probar en el gas que se va a probar según el espectro de absorción molecular saturada del gas traza.

Con referencia a la FIG. 2, la cavidad resonante 20 comprende:

una carcasa 21, que tiene un extremo entrante y un extremo saliente que están dispuestos opuestos entre sí;

un primer reflector 22 ubicado dentro de la carcasa 21 y cerca del lado del extremo entrante, donde se proporciona una película antirreflectante en un lado del primer reflector 22 mirando hacia el extremo entrante;

un segundo reflector 23 ubicado dentro de la carcasa 21 y cerca del lado del extremo saliente, donde las superficies reflectantes del primer reflector 22 y el segundo reflector 23 están dispuestas opuestas entre sí; y

un dispositivo piezoeléctrico dispuesto adyacente al primer reflector 22 y/o el segundo reflector 23, donde el dispositivo piezoeléctrico está configurado para empujar el primer reflector 22 y/o el segundo reflector 23 adyacente al dispositivo piezoeléctrico para moverse según una señal eléctrica de control recibida, para proporcionar a la cavidad de la cavidad resonante 20 un grado de libertad retráctil en la dirección de extensión de la cavidad resonante 20.

En este ejemplo, la cavidad de la cavidad resonante 20 se construye entre el primer reflector 22 y el segundo reflector 23, de modo que el láser de sonda pueda obtener una mejora de la cavidad en la cavidad.

La película antirreflectante ubicada en el lado del primer reflector 22 orientado hacia el extremo entrante está configurada para aumentar la transmitancia de la luz de sonda que incide en el primer reflector 22 y para mejorar la

tasa de utilización de energía luminosa de la luz de sonda.

Opcionalmente, el dispositivo de control de retroalimentación 40 comprende: una fuente de señal de radiofrecuencia, un dispositivo de detección de fase y un dispositivo de amplificación PID (Proporcional-Integral-Derivada); donde

la fuente de señal de radiofrecuencia está configurada para generar una señal de radiofrecuencia sinusoidal;

el dispositivo de detección de fase está configurado para convertir la información de detección en forma de señal eléctrica en una señal de error según la señal de radiofrecuencia sinusoidal; y

el dispositivo de amplificación PID está configurado para convertir la señal de error en una señal de bloqueo de retroalimentación, de modo que la frecuencia de la luz de sonda que sale del dispositivo generador de luz láser 10 coincida con la frecuencia del modo longitudinal de la cavidad resonante 20.

En este ejemplo, la fuente de señal de radiofrecuencia en el dispositivo de control de retroalimentación 40 se utiliza para proporcionar una señal de referencia para el funcionamiento del dispositivo de detección de fase. El dispositivo de detección de fase convierte la información de detección en forma de señal eléctrica en la señal de error. El dispositivo de amplificación PID convierte la señal de error en la señal de bloqueo de retroalimentación, y la transmite al dispositivo piezoeléctrico, de modo que el dispositivo piezoeléctrico ajusta la longitud de la cavidad de la cavidad resonante 20 en la dirección de extensión de la cavidad resonante 20 según la señal de bloqueo de retroalimentación, con el fin de ajustar la frecuencia del modo longitudinal de la cavidad resonante 20 para que coincida con la frecuencia de la luz de sonda que sale del dispositivo generador de luz láser 10.

De manera correspondiente, el dispositivo de control de escaneo 50 solo necesita controlar el dispositivo generador de luz láser 10 para ajustar la frecuencia de la luz de sonda saliente de manera escalonada. El dispositivo de control de retroalimentación 40 permite que la frecuencia del modo longitudinal de la cavidad resonante 20 coincida con la frecuencia de la luz de sonda que sale del dispositivo generador de luz láser 10 ajustando la longitud de la cavidad de la cavidad resonante 20.

Cabe señalar que cuanto menor sea el cambio de tamaño de escalón de la frecuencia de la luz de sonda del dispositivo generador de luz láser 10 controlado por el dispositivo de control de escaneo 50, más precisa será la concentración del gas que se probará obtenida finalmente mediante el cálculo. La frecuencia de la luz de sonda del dispositivo generador de luz láser 10 controlada por el dispositivo de control de escaneo 50 puede cambiar en el orden de megahercios o en el orden de cientos de megahercios. Los valores específicos del cambio de tamaño de escalón de la luz de sonda y el intervalo específico del cambio de frecuencia no están particularmente limitados en esta solicitud, y pueden determinarse dependiendo de la situación real.

Opcionalmente, el dispositivo generador de luz láser 10 comprende: un láser, un dispositivo de modulación de frecuencia y una lente de acoplamiento;

el láser está configurado para generar una luz láser;

el dispositivo de modulación de frecuencia está configurado para modular la luz láser generada por el láser según la información de bloqueo de retroalimentación, para obtener luz de sonda con una frecuencia que coincide con la frecuencia del modo longitudinal de la cavidad resonante 20; y

la lente de acoplamiento está configurada para acoplar la luz de sonda y permitir que la luz de sonda acoplada entre en la cavidad resonante 20.

El láser puede ser un láser convencional, por ejemplo, un láser semiconductor, un láser de fibra o un láser de estado sólido. No está particularmente limitado en esta solicitud, y puede determinarse dependiendo de la situación real.

Opcionalmente, el dispositivo de modulación de frecuencia es un modulador electroóptico.

Opcionalmente, el dispositivo de control de escaneo 50 comprende: un dispositivo de almacenamiento de información y un dispositivo de escaneo de frecuencia, donde

el dispositivo de almacenamiento de información está configurado para registrar la información de detección en forma de señal eléctrica; y

el dispositivo de escaneo de frecuencia está configurado para generar una señal eléctrica de control y para transmitir la señal eléctrica de control al láser.

En este ejemplo, el dispositivo de control de escaneo 50 controla la frecuencia de la luz láser generada por el láser para cambiar en un cierto tamaño de escalón.

Opcionalmente, el dispositivo de detección fotoeléctrica 30 comprende un módulo de coincidencia de lentes y un módulo de detección fotoeléctrica, donde

5 el módulo de coincidencia de lentes está configurado para coincidir con el patrón espacial de un campo de luz dentro del dispositivo de detección fotoeléctrica 30; y

el módulo de detección fotoeléctrica está configurado para convertir la luz de sonda que transporta la información del gas traza que se va a probar en la información de detección en forma de señal eléctrica.

10 Los efectos de implementación específicos del sistema para detectar gases traza proporcionados por una realización de esta solicitud se ilustran a continuación junto con ejemplos específicos.

15 En este ejemplo, el gas traza que se va a probar fueron moléculas de gas $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$. El propósito era medir la espectroscopia de absorción molecular saturada de la transición vibracional infrarroja de las moléculas de gas $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$, y obtener la presión parcial de gas de las moléculas de gas $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ según el área del pico.

Opcionalmente, el láser era un láser semiconductor de cavidad externa. Su luz láser de salida fue modulada por un modulador electroóptico y acoplada por una lente de acoplamiento antes de entrar en la cavidad resonante 20. El interior de la cavidad resonante 20 se llenó con el gas que se va a probar que contenía el gas $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$. La presión total del gas que se va a probar fue P, que se midió mediante un manómetro conectado con la cavidad resonante 20. La cavidad resonante 20 estaba provista del primer reflector 22 y del segundo reflector 23, y la reflectividad del primer reflector 22 y del segundo reflector 23 era de hasta el 99,995 %. El primer reflector 22 y el segundo reflector 23 constituyen una cavidad resonante óptica 20. Las superficies posteriores del primer reflector 22 o el segundo reflector 23 se conectaron con un dispositivo piezoeléctrico, que era capaz de hacer que la lente se moviera ligeramente a lo largo de la trayectoria óptica (dirección de extensión de la cavidad resonante 20).

El dispositivo de detección fotoeléctrica 30 convirtió la información que transportaba la luz de sonda del gas traza que se iba a probar saliendo de la cavidad resonante 20 en la información de detección en forma de señal eléctrica. Después de que las señales de detección en forma de señal eléctrica se amplificaron mediante filtrado, se dividieron en dos grupos de señales, donde un grupo de señales se envió al dispositivo de control de retroalimentación 40, y produjo una señal de bloqueo de retroalimentación después de ser demodulada por el dispositivo de control de retroalimentación 40, de modo que la frecuencia de un modo longitudinal de la cavidad resonante 20 coincidió con la frecuencia de la luz de sonda saliente del dispositivo generador de luz láser 10; el otro grupo de señales se envió al dispositivo de control de escaneo 50 y se registró, mientras tanto, el dispositivo de control de escaneo 50 controló el dispositivo generador de luz láser para realizar un escaneo de frecuencia de manera escalonada.

A través del procedimiento de escaneo anterior del láser de sonda, se obtuvo el espectro de absorción molecular saturado del gas traza que se va a probar. Con referencia a la FIG. 4 y la FIG. 5, la FIG. 4 es un dibujo que muestra la relación entre la presión parcial del gas traza que se va a probar ($^{12}\text{C}^{16}\text{O}$) en el gas que se va a probar y el área de inmersión de Lamb de la transición R(19) del mismo obtenida mediante simulación, donde la abscisa de la FIG. 4 es la presión parcial del gas $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ en una unidad de Pascal (Pa), y la ordenada es el área de inmersión de Lamb en una unidad de 10^{-9}cm^{-1} MHz. La FIG. 5 es un espectro de absorción molecular saturada medido de la transición molecular R(19) mejorada de la cavidad a V=3-0, donde la abscisa de la FIG. 5 es la frecuencia relativa en una unidad de megahercios (MHz); y la ordenada es el coeficiente de absorción en una unidad de 10^{-9}cm^{-1} . Se puede ver en la FIG. 4 que la presión parcial del gas traza que se va a probar ($^{12}\text{C}^{16}\text{O}$) y el área de inmersión de Lamb de la transición R(19) del mismo tienen una buena relación lineal correspondiente en un amplio intervalo, que es adecuado para la medición cuantitativa. Al ajustar el espectro de absorción molecular saturada que se muestra en la FIG. 5, se obtuvieron la altura del pico, el ancho del pico y el área del pico del mismo, de modo que se determinó la presión parcial del gas traza que se va a probar ($^{12}\text{C}^{16}\text{O}$) en el gas que se va a probar.

En resumen, las realizaciones de la presente solicitud proporcionan un sistema para detectar un gas traza. En un procedimiento para detectar un gas traza, el gas que se va a probar se introduce en la cavidad resonante. Por un lado, la cavidad resonante mejora la potencia del láser de la luz de la sonda que entra en la cavidad resonante para mejorar los parámetros de saturación de la transición molecular del gas traza que se va a probar y, por otro lado, mejora el rango de absorción efectiva del gas traza que se va a probar, de modo que aumenta la sensibilidad para detectar la absorción débil del gas traza que se va a probar y se obtiene el espectro de absorción molecular saturado del gas traza que se va a probar, lo que cumple el propósito de detectar la concentración de un gas traza mediante el uso de la luz de la sonda suministrada por un láser convencional en condiciones de temperatura normal.

Además, debido a la propiedad de ensanchamiento libre de Doppler del espectro de absorción molecular saturado, el espectro de absorción molecular saturado obtenido del gas traza que se va a probar puede separarse eficazmente de los espectros de absorción de las moléculas de gas de fondo en el gas que se va a probar, eliminando así la interferencia del gas de fondo y realizando la detección del gas traza que se va a probar. Dado que las frecuencias de los espectros de absorción saturada de los diferentes isótopos moleculares son significativamente diferentes, el

procedimiento para detectar el gas traza proporcionado por la realización de la presente solicitud también es particularmente eficaz para detectar una molécula con un isótopo específico.

- 5 En esta memoria descriptiva, los diversos ejemplos se describen de manera progresiva. Cada realización se centra en sus diferencias con otras realizaciones, y las partes iguales o similares entre las diversas realizaciones pueden referirse entre sí.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema para detectar un gas traza, que comprende un dispositivo generador de luz láser (10), una cavidad resonante (20), un dispositivo de detección fotoeléctrica (30), un dispositivo de control de retroalimentación (40) y un dispositivo de control de escaneo (50), donde:

el interior de la cavidad de la cavidad resonante (20) está configurado para llenarse con un gas que se va a probar, y la cavidad resonante (20) comprende una carcasa (21) que tiene un extremo de entrada y un extremo de salida que están dispuestos opuestos entre sí, un primer reflector (22) ubicado dentro de la carcasa (21) y cerca del lado del extremo de entrada, un segundo reflector (23) ubicado dentro de la carcasa (21) y cerca del lado del extremo de salida, y un dispositivo piezoeléctrico dispuesto adyacente al primer reflector (22) y/o dispuesto adyacente al segundo reflector (23),

donde el gas que se va a probar contiene un gas traza que se va a probar, la cavidad de la cavidad resonante (20) tiene un grado de libertad retráctil en la dirección de extensión de la cavidad resonante (20), se proporciona una película antirreflectante en un lado del primer reflector (22) orientado hacia el extremo entrante, las superficies reflectantes del primer reflector (22) y el segundo reflector (23) están dispuestas opuestas entre sí, y el dispositivo piezoeléctrico está configurado para empujar el primer reflector (22) y/o el segundo reflector (23) adyacente al dispositivo piezoeléctrico para moverse según una señal eléctrica de control recibida, para proporcionar a la cavidad de la cavidad resonante (20) un grado de libertad retráctil en la dirección de extensión de la cavidad resonante (20);

el dispositivo generador de luz láser (10) está configurado para proporcionar luz de sonda con diferentes frecuencias bajo el control del dispositivo de control de retroalimentación (40), donde la luz de sonda entra en el interior de la cavidad resonante (20) desde un extremo de la cavidad resonante (20) en una dirección de extensión de la cavidad resonante (20), y sale del otro extremo de la cavidad resonante (20) en una dirección de extensión de la cavidad resonante (20), para capturar la luz de sonda que transporta información del gas traza que se va a probar;

el dispositivo de detección fotoeléctrica (30) está configurado para convertir la luz de sonda que transporta la información del gas traza que se va a probar en información de detección en forma de señal eléctrica;

el dispositivo de control de escaneo (50) está configurado para registrar la información de detección en forma de señal eléctrica, y para controlar el dispositivo generador de luz láser (10) para ajustar la frecuencia de la luz de sonda saliente de manera escalonada, y el dispositivo de control de escaneo (50) comprende un dispositivo de almacenamiento de información y un dispositivo de escaneo de frecuencia,

donde el dispositivo de almacenamiento de información está configurado para registrar la información de detección en forma de señal eléctrica, y el dispositivo de escaneo de frecuencia está configurado para generar una señal eléctrica de control y para transmitir la señal eléctrica de control al láser;

el dispositivo de control de retroalimentación (40) está configurado para controlar la frecuencia de la luz de sonda saliente del dispositivo generador de luz láser (10) para que coincida con una frecuencia de un modo longitudinal de la cavidad resonante (20), y el dispositivo de control de retroalimentación (40) comprende una fuente de señal de radiofrecuencia, un dispositivo de detección de fase y un dispositivo de amplificación de derivada integral proporcional, PID,

donde la fuente de señal de radiofrecuencia está configurada para generar una señal de radiofrecuencia sinusoidal, el dispositivo de detección de fase está configurado para convertir la información de detección en forma de señal eléctrica en una señal de error según la señal de radiofrecuencia sinusoidal, y el dispositivo de amplificación PID está configurado para convertir la señal de error en una señal de bloqueo de retroalimentación, de modo que la frecuencia de la luz de sonda que sale del dispositivo generador de luz láser (10) coincide con la frecuencia del modo longitudinal de la cavidad resonante (20).

2. El sistema según la reivindicación 1, donde el dispositivo generador de luz láser (10) comprende un láser, un dispositivo de modulación de frecuencia y una lente de acoplamiento:

el láser está configurado para generar una luz láser;

el dispositivo de modulación de frecuencia está configurado para modular la luz láser generada por el láser según la información de bloqueo de retroalimentación, para obtener luz de sonda con una frecuencia que coincide con la frecuencia del modo longitudinal de la cavidad resonante (20); y

la lente de acoplamiento está configurada para acoplar la luz de sonda y, a continuación, permitir que la luz de sonda acoplada entre en la cavidad resonante (20).

3. El sistema según la reivindicación 2, donde el dispositivo de modulación de frecuencia es un modulador

electroóptico.

4. El sistema según la reivindicación 1, donde el dispositivo de control de escaneo (50) está configurado además para obtener un espectro de absorción molecular saturado del gas traza que se va a probar según la información de
5 detección registrada en forma de señal eléctrica, y para calcular la concentración del gas traza que se va a probar en el gas que se va a probar según el espectro de absorción molecular saturada del gas traza.
5. El sistema según la reivindicación 1, donde el dispositivo de detección fotoeléctrica (30) comprende un módulo de coincidencia de lentes y un módulo de detección fotoeléctrica, donde
10 el módulo de coincidencia de lentes está configurado para coincidir con el patrón espacial de un campo de luz dentro del dispositivo de detección fotoeléctrica (30); y
- 15 el módulo de detección fotoeléctrica está configurado para convertir la luz de sonda que transporta la información del gas traza que se va a probar en la información de detección en forma de señal eléctrica.

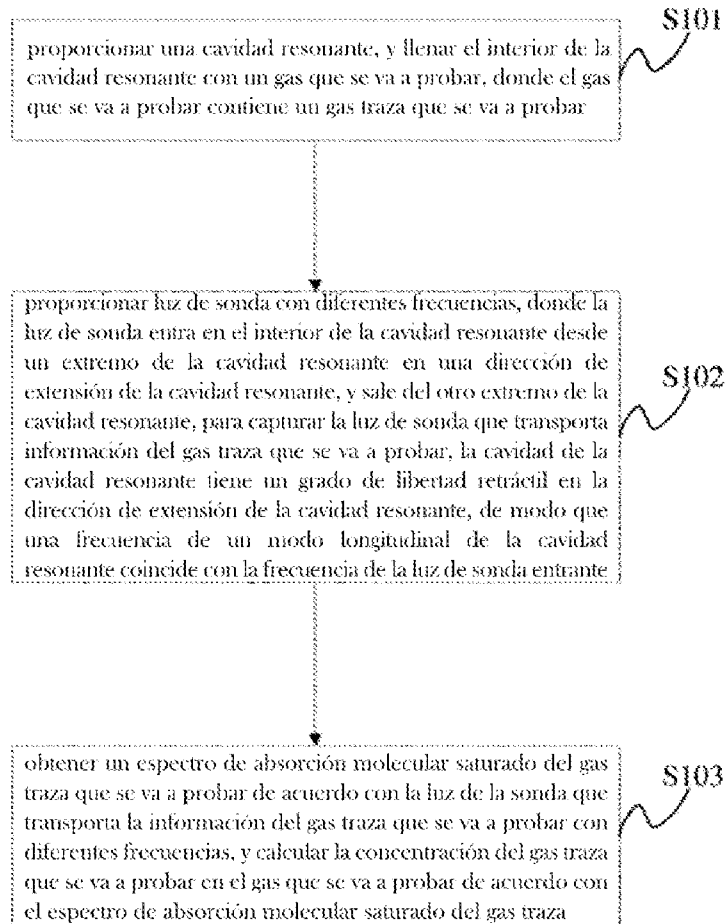


FIG. 1

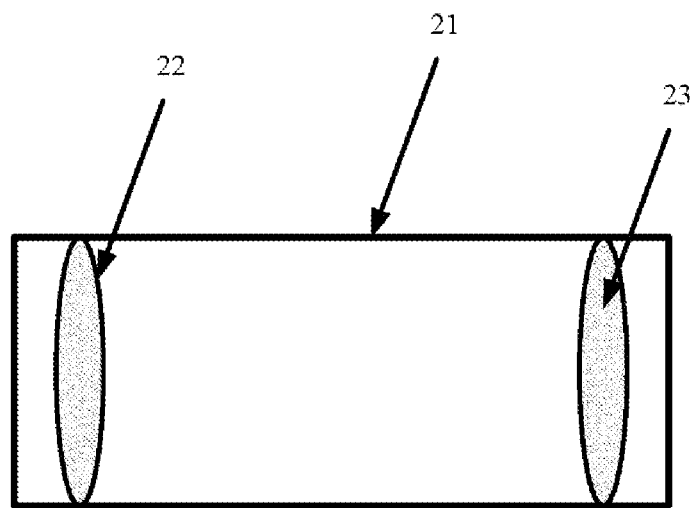


FIG. 2

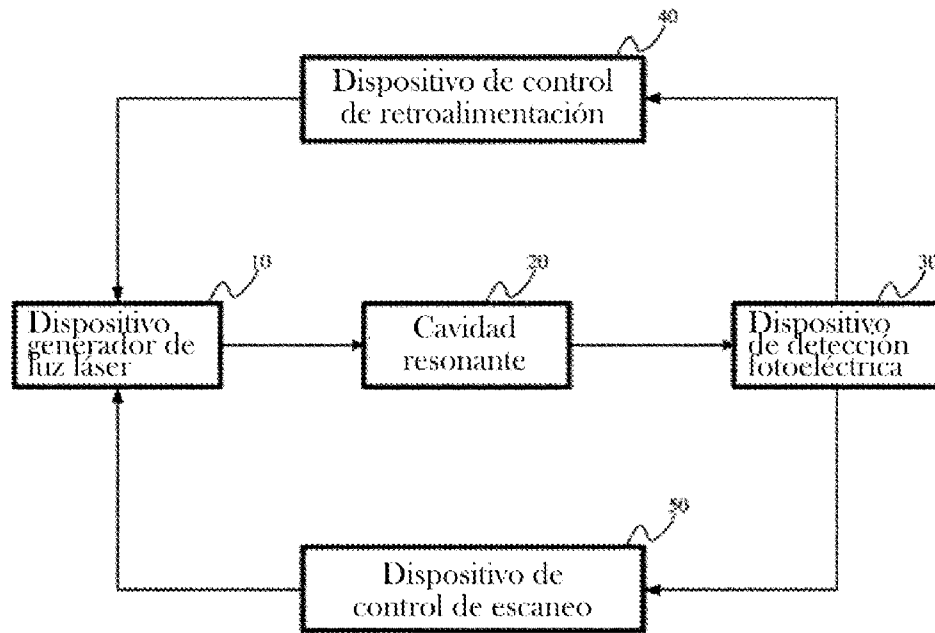


FIG. 3

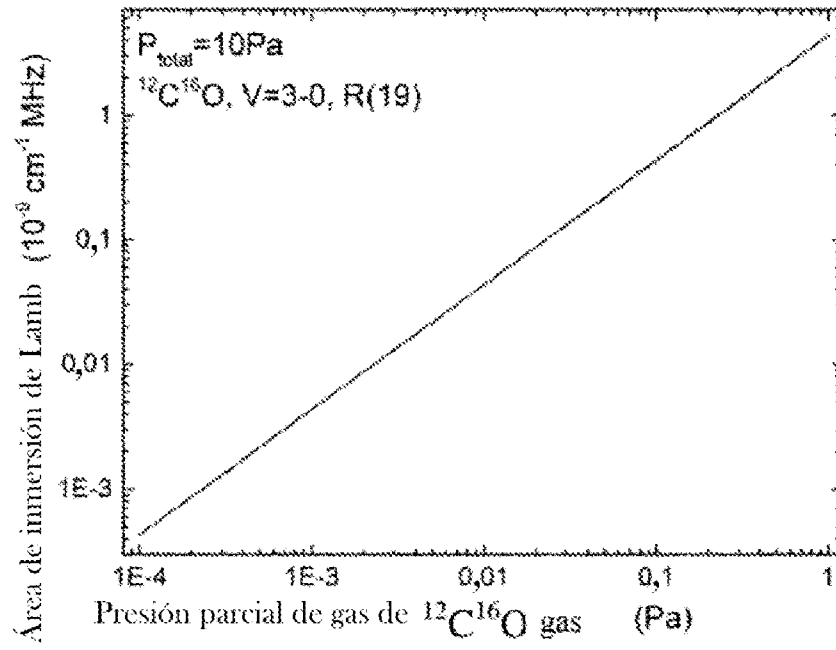


FIG. 4

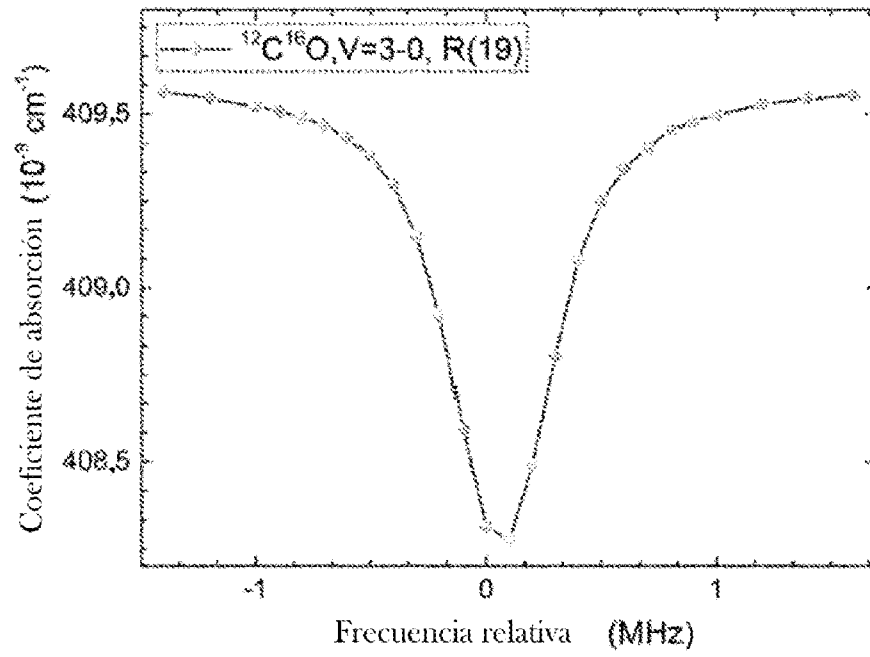


FIG. 5