

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 822 587**

51 Int. Cl.:

**G01S 17/95** (2006.01)  
**G01S 17/32** (2006.01)  
**G01S 7/4911** (2010.01)  
**B82Y 20/00** (2011.01)  
**G01N 33/00** (2006.01)  
**H01S 5/022** (2006.01)  
**H01S 5/024** (2006.01)  
**H01S 5/34** (2006.01)

12

## TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **22.02.2013** **PCT/GB2013/050448**  
87 Fecha y número de publicación internacional: **29.08.2013** **WO13124678**  
96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.02.2013** **E 13726245 (7)**  
97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **29.07.2020** **EP 2817658**

54 Título: **Sistema y método de detección de heterodinos**

30 Prioridad:

**22.02.2012 GB 201203042**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**04.05.2021**

73 Titular/es:

**ITI SCOTLAND LIMITED (100.0%)**  
**Scottish Enterprise Atrium Court 50 Waterloo**  
**Street**  
**Glasgow G2 6HQ, GB**

72 Inventor/es:

**WEIDMANN, DAMIEN**

74 Agente/Representante:

**SÁEZ MAESO, Ana**

**ES 2 822 587 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

Sistema y método de detección de heterodinos

## 5 Campo de la invención

La presente invención se refiere a un sistema de detección de heterodinos y a un método para usar la detección de heterodinos. En modalidades particulares, la invención proporciona la detección de señales en el infrarrojo, particularmente el infrarrojo de longitud de onda media y larga, adecuado para determinar los espectros vibracionales y rotacionales de moléculas presentes en pequeña concentración para permitir la detección remota de tales moléculas.

Antecedentes de la invención

15 Actualmente se dispone de una serie de técnicas para la detección y medición de constituyentes atmosféricos o en el aire mediante el uso de información de sus espectros ro-vibracionales. Las líneas de absorción espectral de interés para las moléculas pequeñas que forman dichos constituyentes se encuentran típicamente en la región infrarroja. Tales técnicas pueden ser pasivas, en el sentido de que la luz se origina en una fuente incoherente como el sol, o activas, en donde la luz de una fuente de luz se usa para iluminar un objetivo y la luz retrodispersada es detectada por un detector asociado.

20 La técnica activa más usada es LIDAR (detección y medición de alcance de la luz), que implica el uso de un láser para iluminar el objetivo con radiación coherente para la detección directa o heterodina de radiación retrodispersada. Tales técnicas se usan comercialmente y se describen ampliamente en la literatura académica, por ejemplo en "Laser Remote Sensing (Optical Science and Engineering), Tetsuo Fukuchi (editor) CRC Press (28 de junio de 2005)); y "Elastic Lidar", V.A. Kovalev y W.E. Eichinger, Wiley-Interscience 2004. Los sistemas LIDAR se usan ampliamente en la medición atmosférica, particularmente por la NASA. Los láseres de gas CO<sub>2</sub> proporcionan niveles aceptables de potencia en intervalos espectrales de interés y se han usado ampliamente como fuente de iluminación. Puede usarse un láser continuo o pulsado, aunque se ha descubierto que cada uno tiene ventajas y desventajas. Los sistemas continuos generalmente no han sido efectivos para objetivos en fase de vapor, pero tienen ventajas para la detección de heterodinos, mientras que los sistemas pulsados han sido efectivos para la detección directa de fases de vapor.

30 Las técnicas de detección de heterodinos implican el uso de un oscilador local cuya señal se combina con la luz detectada para permitir una sensibilidad significativamente mayor que la disponible a través de la detección directa. En efecto, las pulsaciones entre el oscilador local y la luz detectada se usan para amplificar la señal de interés, que luego puede reconstruirse mediante el cálculo apropiado. El oscilador local puede obtenerse en un sistema LIDAR continuo dividiendo la luz (por conveniencia, el término "luz" se usará de aquí en adelante para todos estos sistemas, aunque las técnicas usadas se pueden emplear en un amplio intervalo del espectro electromagnético) desde la fuente de láser para formar dos haces. Mientras que parte de la luz se usa para iluminar el objetivo y así proporcionar la señal que se va a evaluar, otra parte de la luz se desplaza en frecuencia por un componente como un modulador acústico-óptico (AOM) para que sirva como oscilador local y subsecuentemente combinado con la señal de retrodispersión para la detección. En los sistemas heterodinos LIDAR pulsados, este enfoque no ha sido efectivo y se ha usado un oscilador local separado que debe estabilizarse en frecuencia para garantizar la superposición de frecuencia con la radiación retrodispersada del objetivo. El perfil de pulso de los sistemas láser de pulso existentes también puede afectar la resolución temporal y hacer que las mediciones de relativamente corta distancia sean difíciles de lograr.

45 Los sistemas de detección activa de heterodinos que usan láseres de gas de CO<sub>2</sub> se han usado para la detección atmosférica de moléculas objetivo en intervalos significativos, pero estos sistemas aún presentan desafíos importantes, particularmente para su uso con objetivos gaseosos. Como puede verse en las Figuras 2a y 2b, la retrodispersión de un objetivo sólido es mucho mayor que la retrodispersión de un objetivo en aerosol, porque un evento de dispersión puede ocurrir en un espacio de dispersión ampliamente distribuido en lugar de la retrodispersión predominantemente hacia la fuente. Una técnica LIDAR particularmente efectiva para la detección es LIDAR de absorción diferencial (DIAL), que implica tomar mediciones dentro y fuera de la resonancia con la absorción de las especies del gas objetivo y medir la absorción diferencial entre las dos. Este principio se muestra en las Figuras 3a y 3b. La Figura 3a ilustra la diferencia de señal entre la resonancia activa y la resonancia desactivada y, como se muestra en la Figura 3b, la diferencia de potencia recibida es efectiva para la medición de distancia. Aunque este enfoque tiene el potencial de una gran sensibilidad, requiere un control muy preciso de las líneas láser usadas. El uso de láseres de gas de CO<sub>2</sub> también es problemático cuando se requiere una alta sensibilidad, ya que los resultados se ven afectados por la absorción del CO<sub>2</sub> atmosférico.

60 El documento US 2010/0029026 está dirigido a un método para construir un dispositivo de infrarrojos medio o lejano en un chip para analizar una escena. El dispositivo comprende un QCL y un QCD (Detector de Cascada Cuántica), preferentemente crecidos epitaxialmente juntos sobre el mismo sustrato. Se sugiere que el dispositivo podría construirse para permitir la detección de heterodinos dividiendo el haz QCL para usar una parte como oscilador local. Los detectores láser QCL y QCD están contruidos (mediante el uso de técnicas DFB) cada uno para operar a frecuencias específicas. Para cubrir múltiples frecuencias, se sugiere usar una matriz de láseres y detectores QCL, cada par ha sido optimizado para una frecuencia diferente. En esta disposición, cada fuente de láser se fija cuidadosamente en frecuencia, con técnicas de pulsación usadas para acceder a un intervalo de frecuencia fijo para permitir la detección de una sola vibración.

65

El documento WO 2011/058330 se dirige a la espectroscopia de absorción mediante el uso de un par de láseres con patrones de pulso coincidentes. Este enfoque puede usarse en el espacio libre con un retrorreflector adecuadamente posicionado. La detección de heterodinos está indicada como potencialmente aplicable al sistema descrito.

5 Mikaelian y otros: "A high-speed retro-reflector for free-space communication based on electro-optic phase modulation", Actas de la conferencia aeroespacial, 2002, describe una disposición en donde se usa la detección de heterodinos con retrorreflexión para lograr un canal de comunicación de frecuencia de GHz confiable con una plataforma móvil como un satélite.

10 Troccoli y otros: "High-Performance Quantum Cascade Lasers Grown by Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy and Their Applications to Trace Gas Sensing", Journal of Lightwave Technology, vol 26, núm. 21, páginas 3534-3555, enseña que los láseres de cascada cuántica son particularmente adecuados para aplicaciones de detección de gases traza.

15 El documento WO 2010/108705 está dirigido a un sistema de soporte óptico cerámico para su uso en un dispositivo de medición óptica. El sistema de soporte óptico se usa para ubicar un transceptor electroóptico.

20 El documento US 7 986 397 B1 está dirigido a un método para la formación de imágenes LADAR de onda continua modulada en frecuencia. El método comprende las etapas de generar una señal de láser pulsada y una señal de láser de frecuencia constante, formando una señal de láser objetivo a partir de la señal de láser pulsada y la señal de láser de frecuencia constante. El método comprende además retrasar o desplazar la frecuencia de la señal láser del oscilador local y dirigir la señal láser objetivo a un objetivo.

25 Por lo tanto, es conveniente producir un sistema de detección heterodino adecuado para su uso en detectar la detección remota de moléculas objetivo en un amplio intervalo y con gran sensibilidad. Un sistema de tal tipo tendría ventajas particulares, por ejemplo, en la detección remota de rastros de vapor de objetos que sería difícil o inseguro inspeccionar directamente; esto permite la inspección remota de fugas de gas o la detección remota de materiales explosivos.

#### Resumen de la invención

30 En consecuencia, la invención proporciona un sistema de detección activa de heterodinos que comprende una fuente de láser sintonizable continuamente configurada para emitir radiación infrarroja, un detector adaptado para la detección de heterodinos en un intervalo espectral continuo, medios configurados para dividir la radiación infrarroja en una primera parte y una segunda parte, un medio configurado para proporcionar un cambio de frecuencia entre la primera parte y la segunda parte, en donde el medio de cambio de frecuencia es un modulador acústico-óptico, y en donde el cambio de frecuencia se aplica a la primera parte de la radiación infrarroja; medios configurados para dirigir un modo de primer orden del modulador acústico-óptico al objetivo; en donde la segunda parte de la radiación infrarroja se proporciona como un oscilador local; medios configurados para recoger un componente disperso de la primera parte de la radiación infrarroja del objetivo; y medios configurados para mezclar el componente disperso y el oscilador local y dirigir la señal mixta al detector.

40 Este enfoque proporciona una mejora significativa con respecto a los métodos convencionales como DIAL. En lugar de limitarse a una o un conjunto limitado de longitudes de onda de excitación, permite el uso de potentes técnicas de detección de heterodinos en un intervalo extendido para proporcionar una detección hiperespectral. Por lo tanto, este enfoque puede usarse para detectar, en un solo escaneo, una variedad de materiales diferentes.

45 Ventajosamente, la fuente de láser continuamente sintonizable es un láser de cascada cuántica. También pueden usarse otras fuentes continuamente sintonizables, como OPO y DFG. Las OPO y DFG se consideran fuentes de láser en el contexto de la presente solicitud, es decir, se emplea una interpretación amplia más que restrictiva del término fuente de láser.

50 Ventajosamente, se proporcionan medios de control de temperatura y medios de control de corriente para sintonizar la longitud de onda y estabilizar la frecuencia de la luz infrarroja.

Preferentemente, la fuente de láser se proporciona en una configuración de cavidad externa con una rejilla de difracción para la selección y sintonización de la longitud de onda.

El modo de orden cero del modulador acústico-óptico puede usarse entonces para monitorear la fuente láser

55 En una modalidad, la monitorización de la potencia de la fuente láser se usa para controlar un atenuador entre la fuente láser y el modulador acústico-óptico. Este atenuador puede ser un polarizador. El polarizador puede estar montado en una etapa de rotación de alta velocidad y el control puede ser por medio de un sistema PID (proporcional-integral-derivado).

60 La fuente de láser puede montarse en una placa fría enfriada por un enfriador Peltier, con el enfriador Peltier suspendido de la placa fría. Se encuentra que esto es particularmente efectivo para lograr una buena calidad de señal al desacoplar la fuente láser de cualquier movimiento del enfriador Peltier, al tiempo que permite un enfriamiento Peltier efectivo para estabilizar la temperatura. El enfriador Peltier puede comprender un intercambiador de calor.

65 Ventajosamente, un montaje para la fuente láser sintonizable continuamente puede estar provisto de un soporte con alto aislamiento y baja expansión térmica. El soporte puede comprender una o más abrazaderas de fibra de vidrio. Puede

proporcionarse una pluralidad de elementos cerámicos en una o más abrazaderas de fibra de vidrio para soportar el montaje en una pluralidad de contactos puntuales.

El medio para dirigir, recoger y mezclar comprende preferentemente un sistema óptico reflectante. Este puede comprender uno o más divisores del haz.

5

En un aspecto adicional, la invención proporciona un método de detección activa de heterodinos que comprende: sintonizar una fuente de láser para que emita radiación infrarroja para explorar un intervalo espectral continuo; dividir la radiación infrarroja en una primera parte y una segunda parte; proporcionar, mediante un modulador acústico-óptico, un desplazamiento de frecuencia entre la primera parte y la segunda parte; aplicar el cambio de frecuencia a la primera parte y dirigir un modo de primer orden del modulador acústico-óptico al objetivo;

10

proporcionar la segunda parte de la radiación infrarroja como un oscilador local; recoger un componente disperso de la primera parte de la radiación infrarroja del objetivo; mezclar el componente disperso y el oscilador local y encaminar la señal mixta a un detector para la detección de heterodinos; y procesar una señal detectada para proporcionar una salida en un intervalo espectral continuo.

15

Ventajosamente, la sintonización de la fuente de láser comprende proporcionar una forma de onda de diente de sierra para modular una corriente de inyección de la fuente de láser. La etapa de procesamiento puede comprender el uso de un método de estimación óptimo para proporcionar una salida.

20

Breve descripción de los dibujos

A continuación, se describirán modalidades específicas de la invención, a manera de ejemplo, con referencia a los dibujos adjuntos, de los cuales:

25

La Figura 1 muestra esquemáticamente un sistema de detección activa de heterodinos de acuerdo con modalidades de la invención;

La Figura 2 muestra una comparación entre la dispersión desde (a) una superficie extendida y (b) un objetivo de aerosol; La Figura 3 ilustra el funcionamiento del lidar de absorción diferencial (DIAL), con la Figura 3a ilustrando el uso de longitudes de onda en resonancia y fuera de resonancia, y la Figura 3b mostrando la evolución de la potencia retrodispersada con la distancia;

30

La Figura 4 muestra esquemáticamente diferentes elementos funcionales de un sistema de detección heterodino de acuerdo con una modalidad de la invención;

La Figura 5 ilustra el funcionamiento de un modulador acústico-óptico como se usa en las modalidades de la invención;

La Figura 6a muestra una configuración óptica biestática y la Figura 6b muestra una configuración óptica monoestática adecuada para su uso en sistemas de detección activa de heterodinos de acuerdo con modalidades de la invención;

35

Las Figuras 7a y 7b muestran diseños alternativos para su uso en la mezcla de haces para la detección de heterodinos de acuerdo con modalidades de la invención;

La Figura 8 muestra un diseño óptico para la calibración de la frecuencia del oscilador local para su uso con modalidades de la invención;

40

La Figura 9 muestra un sistema óptico ilustrativo completo para un sistema de detección activa de heterodinos de acuerdo con una modalidad de la invención;

La Figura 10 muestra un montaje de láser para usar en modalidades de la invención;

La Figura 11 muestra un sistema óptico completo alternativo para un sistema de detección activa de heterodinos de acuerdo con una modalidad de la invención;

45

La Figura 12 muestra un sistema de control ilustrativo para proporcionar retroalimentación para controlar la potencia de la fuente láser;

Las Figuras 13a y 13b muestran resultados experimentales para un sistema de detección de acuerdo con una modalidad de la invención para la detección de muestras gaseosas en una celda de gas; y

Las Figuras 14a y 14b muestran resultados experimentales para un sistema de detección de acuerdo con una modalidad de la invención para la detección de muestras atmosféricas.

50

Descripción detallada de las modalidades específicas

Los elementos básicos de un sistema de detección activa de heterodinos de acuerdo con modalidades de la invención se muestran en la Figura 1.

55

Una fuente de láser sintonizable continuamente 1 emite radiación infrarroja. Hay varias fuentes de este tipo disponibles, incluidos osciladores paramétricos ópticos (OPO), dispositivos de generación de frecuencia de diferencia (DFG), pero una opción preferida es usar un láser de cascada cuántica con una cavidad externa. Los láseres de cascada cuántica (QCL) con una cavidad externa son fuentes de láser sintonizables continuamente, bien desarrolladas en la región espectral de 4 a 20  $\mu\text{m}$ . Los QCL disponibles comercialmente funcionan en modo de onda continua cerca de la temperatura ambiente con una potencia de salida de hasta 50 mW. Los QCL de infrarrojos medios ahora están ampliamente disponibles tanto de grandes proveedores internacionales como de empresas mucho más pequeñas.

60

La radiación infrarroja emitida 6 se usa para dos propósitos diferentes. Se proporcionan medios para dividir esta radiación en una primera y una segunda parte; en este caso, los medios son proporcionados por un primer divisor de haz 8. Una

65

primera parte de esta radiación es dirigida por un sistema óptico (en este caso que comprende un divisor de haz 8 adicional y un espejo 9) a un objetivo 2 remoto. Una segunda parte de esta radiación no se dirige en absoluto al objetivo.

5 Esta segunda parte de la radiación se dirige a un medio para cambiar una frecuencia de la segunda parte de la radiación infrarroja; en este caso, el medio de cambio de frecuencia es un modulador acústico-óptico 4. Esto proporciona el oscilador local para el sistema de detección activa de heterodinos.

10 La dispersión tiene lugar en el objetivo 2, y el sistema comprende además medios para recoger un componente dispersado (en la práctica, un componente retrodispersado) de la primera parte de la luz infrarroja del objetivo 2. Esta luz recibida 7 pasa a través del espejo 9 y el divisor de haz 8 como antes, pero toma una trayectoria diferente a través del divisor de haz 8b y pasa a través de una placa de mezcla 5.

15 La placa de mezcla 5 es un medio para mezclar el componente dispersado recibido del objetivo y la segunda parte de frecuencia desplazada de la radiación infrarroja para proporcionar una señal para la detección de heterodinos. Esta señal mixta se dirige a un detector 3 con la capacidad de cálculo asociada apropiada para la detección de heterodinos y el cálculo y análisis posteriores.

20 El enfoque teórico general se describirá ahora brevemente. El experto en la materia apreciará que se proporcionan más detalles en las referencias indicadas más abajo y en la bibliografía de detección de lidar, DIAL y heterodina. El análisis relacionado con LIDAR y DIAL se puede aplicar sin dificultad a disposiciones que involucran una fuente de láser sintonizable continuamente con observación en un intervalo espectral continuo, como apreciará el experto en la técnica, mientras que la necesidad de considerar un intervalo de longitudes de onda de fuente y un intervalo de longitudes de onda de detección puede aumentar la complejidad del procesamiento de la señal, pero no cambia fundamentalmente el análisis.

25 Lidar funciona mediante la retrodispersión de la potencia del láser en un detector desde un objeto remoto que puede incluir aerosoles o superficies extendidas. El funcionamiento básico de lidar se describe mediante las ecuaciones 1 a 5 a continuación:

30 
$$P(R, \lambda) = E(\lambda)G(R)\beta(R, \lambda)T(R, \lambda)$$

Ecuación 1 - La ecuación de Lidar

35 
$$E(\lambda) = P_T(\lambda)KA$$

Ecuación 2

40 
$$G(R) = \frac{O(R)}{R^2}$$

Ecuación 3

45 
$$\beta(\lambda, R) = \frac{\overline{N(R)}(d\sigma(\lambda, \pi))}{d\Omega}$$

Ecuación 4

50 
$$T(R, \lambda) = \exp(-2 \int_0^R \alpha(R, \lambda) dR)$$

Ecuación 5

55 La ecuación LIDAR (Ecuación 1) relaciona la cantidad de energía retrodispersada en el detector  $P(R, \lambda)$  con varios parámetros, incluida la geometría específica del instrumento y la composición de la atmósfera. Esta ecuación solo es válida para distancias mucho mayores que la abertura del receptor.  $E(\lambda)$  es un parámetro del sistema que incluye la potencia transmitida  $P_T(\lambda)$  y la eficiencia de recolección  $K$  y el área  $A$  de la óptica receptora (Ecuación 2). La ecuación 2 es aplicable tanto a láseres pulsados como continuos. El factor geométrico  $G(R)$  (Ecuación 3) incluye la superposición entre el haz transmitido y el campo de visión del receptor  $O(R)$  y una dependencia cuadrática de la distancia  $R$  entre el transmisor y el objetivo (es decir, la luz se dispersa uniformemente sobre una esfera de radio  $R$ ).

60 Los términos  $\beta(R, \lambda)$  y  $T(R, \lambda)$  en la Ecuación 2 se relacionan con las propiedades del objetivo (ya sea de superficie o aerosol) y de la atmósfera. El término de retrodispersión  $\beta(R, \lambda)$  incluye términos para la retrodispersión; para superficies extendidas, esto es simplemente la reflectancia difusa del objetivo. Dado que la retrodispersión por superficies extendidas es generalmente mucho mayor que para los objetivos de aerosol, solo se considera la dispersión de la superficie extendida en este caso específico. Para la dispersión por aerosoles atmosféricos solamente (dispersión de Mie), el coeficiente de retrodispersión es una suma (o una integral) sobre toda la trayectoria del haz transmitido del producto de la densidad

numérica de un tipo de partícula particular y la constante de dispersión para ese tipo de partícula particular ( Ecuación 4 donde  $N(R)$  es la concentración promedio de partículas a la distancia  $R$ , y  $d\sigma/d\Omega$  la sección transversal de retrodispersión por unidad de ángulo sólido). Dada una distribución particular de partículas, es posible calcular el término de retrodispersión. En la región espectral infrarroja, se supone que la dispersión de Mie (es decir, la dispersión de partículas) domina sobre la dispersión molecular (dispersión de Rayleigh).

El término de extinción atmosférica  $T(R, \lambda)$  es una medida de la transmisión de la atmósfera a una longitud de onda particular (Ecuación 5 donde  $\alpha(R, \lambda)$  es el coeficiente de extinción) donde la integral se extiende a lo largo de toda la trayectoria del haz. El coeficiente de extinción incluye la influencia de todas las especies presentes a lo largo de la trayectoria atmosférica y es una suma de la absorción por moléculas y la dispersión/absorción de aerosoles y partículas (se puede despreciar la dispersión de Rayleigh por moléculas en el infrarrojo). Para una atmósfera sin variación en el coeficiente de extinción sobre la trayectoria del haz (es decir,  $\alpha(R, \lambda) = \alpha(\lambda)$ ), el término en la integral se reduce a  $\alpha(\lambda)R$ ; Se pueden considerar composiciones atmosféricas más complejas (es decir, columnas de humo, capas de nubes, etc.) si se conoce la dependencia del coeficiente de extinción con la distancia. Cuando se considera la dispersión de aerosoles, se usa el siguiente enfoque (mediante el uso de un análisis derivado del documento de BN Whiteside y RM Schotland, "Development of a 9.3  $\mu\text{m}$  CW lidar for the study of atmospheric aerosol", Informe técnico final NASA NAG8-766 N93-29105 1993,). El láser se enfoca a una distancia desde el detector hasta un tamaño de cintura  $w_0$ ; la distancia de Rayleigh  $Z_R$  (Ecuación 6) define la distancia sobre la cual el haz está aproximadamente colimado. Más allá de este volumen, la intensidad del rayo cae rápidamente a medida que aumenta el tamaño del rayo, lo que resulta en menos retrodispersión. Además, las restricciones del campo de visión inherentes a la detección de heterodinos reducen en gran medida la señal detectada de la retrodispersión que se produce más allá del volumen. En efecto, enfocar el láser (y la capacidad de cambiar las condiciones focales) permite una resolución de intervalo con un láser continuo. La ecuación 7 da que la potencia retrodispersada en el detector,  $P_T$  es la potencia láser transmitida ( $W$ ),  $\beta$  es la constante de retrodispersión de volumen ( $\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$ ),  $Z_R$  es la longitud de Rayleigh ( $\text{m}$ ),  $A_R$  es el área del receptor ( $\text{m}^2$ ),  $K$  es la eficiencia de recolección del sistema óptico,  $R$  es la distancia al punto focal ( $\text{m}$ ) y  $\alpha(\lambda)$  es el coeficiente de extinción atmosférica dependiente de la longitud de onda ( $\text{m}^{-1}$ ) a la longitud de onda del láser. La ecuación 7 se puede derivar de la ecuación 1 si el parámetro del sistema ( $E$ ) está definido por  $P_T \text{UNA}_R K$ , el parámetro geométrico  $G(R)$  por  $2Z_R/R^2$ , el coeficiente de retrodispersión  $\beta_R$  por  $\beta$  (es decir, constante de dispersión con la distancia) y la atenuación atmosférica  $T(R)$  por  $\exp(-2\alpha(\lambda)R)$  válida para el caso de una atmósfera homogénea.

$$Z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$$

Ecuación 6 – Distancia de Rayleigh

$$P = \frac{2P_T \beta Z_R A_R K}{R^2} \exp(-2\alpha(\lambda)R)$$

Ecuación 7 – Potencia retrodispersada por aerosol

$$P = 2P_T \beta K \lambda \exp(-2\alpha(\lambda)R)$$

Ecuación 8

$$FoV = \frac{4\lambda}{\pi D_R}$$

Ecuación 9 – Campo de visión para la detección de heterodinos

La ecuación 7 puede usarse para calcular la potencia retrodispersada en el receptor. Sin embargo, el campo de visión inherentemente restringido de los sistemas de detección heterodinos (Ecuación 9 - el campo de visión de un detector heterodino (en radianes) viene dado por la Ecuación 9 donde  $D_R$  es el diámetro de la óptica receptora y  $\lambda$  es la longitud de onda del láser (esto está inherentemente limitado por la naturaleza coherente del proceso de detección) significa que solo se detecta realmente una fracción de la radiación total retrodispersada (es decir,  $O(R) < 1$ ). El impacto de esto es que la cintura del haz debe coincidir con el campo de visión en todas las distancias con una influencia correspondiente en la longitud de Rayleigh (Ecuación 6). Para un tamaño fijo del receptor, el campo de visión es constante y la extensión espacial del área muestreada escala con la distancia. Por lo tanto, el tamaño de la cintura aumenta linealmente con la distancia, mientras que la longitud de Rayleigh se escala con el cuadrado de la distancia (Ecuación 6). Esto conduce al resultado de que la potencia retrodispersada detectada es aproximadamente constante con la distancia (Ecuación 8), ya que la longitud de Rayleigh y el término de distancia se cancelan de manera efectiva. De manera similar, la dependencia del tamaño del receptor  $A_R$  también se elimina; el diámetro del receptor solo influye en la longitud de Rayleigh y, por lo tanto, en la resolución de intervalo del instrumento. Si la longitud de onda se elige con cuidado, la atenuación atmosférica (el término exponencial en las ecuaciones 7 y 8) tiene solo un efecto mínimo en distancias relativamente cortas ( $< 100 \text{ m}$ ) con pequeños coeficientes de extinción (ca.  $10^{-4} \text{ metro}^{-1}$ ).

La constante de retrodispersión de volumen  $\beta$  es la suma para todas las partículas dispersantes. Bajo ciertos supuestos limitantes (por ejemplo, partículas esféricas con una distribución de tamaño definida) es posible calcular este parámetro o ajustar los datos experimentales a un modelo. Para una atmósfera moderadamente limpia,  $\beta$  es del orden de  $10^{-7}$  metro<sup>-1</sup>sr<sup>-1</sup> a nivel del suelo. Las erupciones volcánicas o la contaminación industrial pueden aumentar enormemente este valor a escala local o regional. El coeficiente de extinción atmosférica  $\alpha(\lambda)$  es una medida de la transmisión de la atmósfera e incluye la absorción por los gases atmosféricos (incluida la absorción continua) y la atenuación (dispersión y absorción) por los aerosoles.

De la ecuación 8, está claro que (para una longitud de onda dada) la potencia retrodispersada hacia el detector es proporcional a la potencia láser transmitida  $P_T$ , el coeficiente de retrodispersión  $\beta$  y la eficiencia de captación del sistema óptico  $K$  y muestra una dependencia exponencial negativa de las propiedades de extinción de la atmósfera y la distancia. El aumento del coeficiente de extinción en un orden de magnitud tiene un efecto dramático en la cantidad de energía retrodispersada en el detector. La detección de esta diferencia que permite obtener información cuantitativa sobre la concentración de las especies de interés.

La retrodispersión de una superficie extendida se describe teóricamente en términos muy similares a la dispersión de aerosol; La ecuación 10 da la potencia retrodispersada en el detector para una superficie extendida a una distancia  $R$  con una reflectividad difusa de  $\rho$ . Los otros términos son idénticos a los definidos en la Ecuación 7. La reflectividad superficial reemplaza la constante de retrodispersión de volumen ( $\rho/2\pi$  versus  $2\beta Z_R$ ) con el resultado de que la dispersión desde una superficie extendida produce significativamente más potencia en el detector para valores típicos de  $\rho$  y  $\beta$  (una reflectividad de aproximadamente 0,01 a 0,1 en comparación con un coeficiente de retrodispersión de volumen de  $10^{-7}$ ). La ecuación 10 asume que el diámetro de la radiación láser que incide sobre el objetivo es similar (o más pequeño) al campo de visión del detector (es decir,  $O(R) = 1$ ). Esta es una suposición completamente razonable en el caso de la detección de heterodinos. Una superficie extendida proporcionará una potencia mucho mayor que un objetivo de aerosol, pero con la misma dependencia del coeficiente de extinción.

$$P = \frac{P_T \rho A_R K}{2\pi R^2} \exp(-2\alpha(\lambda)R)$$

Ecuación 10 – Potencia retrodispersada por la superficie extendida

El enfoque básico usado para la detección es el del LIDAR de absorción diferencial (DIAL); el principio básico se muestra en la Figura 3. Se seleccionan dos longitudes de onda, resonancia activada y desactivada con una línea de absorción fuerte que pertenece a la especie química de interés. Las longitudes de onda se seleccionan para minimizar la interferencia espectroscópica de otras especies. El coeficiente de extinción para cada longitud de onda puede usarse en las Ecuaciones 7 y 10 anteriores para calcular la potencia retrodispersada hacia el detector (Figura 3b). La diferencia en la señal detectada en las dos longitudes de onda ( $\Delta P = P_{\text{apagado}} - P_{\text{encendido}}$ ) se puede relacionar con la diferencia entre los coeficientes de extinción  $\Delta\alpha$  en las dos longitudes de onda (ecuaciones 11 y 12 para el aerosol y la superficie extendida respectivamente).

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta P R}{4P_T \beta Z_R A_R K}$$

Ecuación 11

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta P \pi R}{\rho P_T A_R K}$$

Ecuación 12

De la Figura 3, se hace una suposición adicional de que la absorción de fondo es constante e igual a  $\alpha(v_{\text{apagado}})$ ; por lo tanto, la diferencia en el coeficiente de absorción entre las dos longitudes de onda es igual al coeficiente de absorción de la molécula en la longitud de onda de resonancia ( $\Delta\alpha = \alpha(v_{\text{abs}})$ ). El coeficiente de extinción fuera de resonancia es la suma de todas las demás especies presentes. Este análisis se basa en los términos de absorción (es decir,  $\alpha(v_{\text{apagado}})$  y  $\alpha(v_{\text{encendido}})$ ) siendo relativamente débil, por lo que el término exponencial se puede expresar como una serie lineal ( $\exp(-2\alpha R) \sim 1 - 2\alpha R$ ).

Las ecuaciones 11 y 12 igualan la cantidad experimental deseada (los coeficientes de extinción que se relacionan directamente con la concentración de la especie de interés) con el parámetro medido experimentalmente, la diferencia en la señal retrodispersada entre dos longitudes de onda a una distancia dada. A la inversa, la diferencia en la señal retrodispersada entre las dos longitudes de onda puede expresarse en términos de parámetros instrumentales (por ejemplo, potencia transmitida, eficiencia de recolección, área del detector, reflectividad difusa/retrodispersión de aerosol, longitud de Rayleigh, coeficientes de extinción y distancia). En última instancia, el valor más pequeño de  $\Delta P$  que se puede medir es el nivel de ruido del instrumento. Este valor, a su vez, define la diferencia de coeficiente de extinción más pequeña

posible que se puede medir y la sensibilidad final del instrumento a la molécula de interés. Las ecuaciones 11 y 12 se pueden aplicar tanto a la detección directa como a la heterodina si se incluyen los términos de ruido apropiados. Para la detección activa de heterodinos, el ruido está dominado por una combinación de ruido de partículas y ruido de disparo del oscilador local. Para un alto poder de retrodispersión, domina el ruido de partículas y para un bajo poder de retrodispersión, domina el ruido de disparo.

Como se indicó anteriormente, el principio básico de la detección de heterodinos es que una señal de interés se mezcla de forma no lineal con un oscilador local a una frecuencia ligeramente diferente. El resultado de la mezcla proporciona una señal de pulso que oscila a la frecuencia diferencial pero que contiene la información de amplitud y fase de la señal de alta frecuencia. En radiofrecuencias, el campo eléctrico se puede medir directamente para recuperar esta señal, pero en el dominio óptico es necesario usar un fotodetector para producir una señal eléctrica resultante de la señal óptica (la mezcla no se consigue en esta técnica mediante el uso de un cristal no lineal). Esta señal eléctrica (fotocorriente) es proporcional a la intensidad óptica total (y por tanto al cuadrado del campo eléctrico).

Como se indicó anteriormente, la mezcla no tiene lugar en un cristal no lineal; requiere alineación del haz para que los haces se adapten al modo, lo que requiere que los frentes de onda estén alineados a través del detector con interferencia uniforme, lo que a su vez requiere que los haces sean espacialmente coherentes.

La señal de salida contiene un componente fijo, un componente de alta frecuencia y un componente de frecuencia de pulso; los componentes de frecuencia fija y alta se pueden filtrar, dejando el componente de frecuencia de pulso para su análisis. En términos generales, esto se puede representar de la siguiente manera:

Para la señal recibida	$E_{sig} \cos(\omega_{sig}t + \phi)$
y señal de oscilador local	$E_{LO} \cos(\omega_{LO}t)$

la intensidad I, que es proporcional al cuadrado de la amplitud, es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 &= \underbrace{\frac{E_{sig}^2 + E_{LO}^2}{2}}_{\text{componente constante}} + \underbrace{\frac{E_{sig}^2}{2} \cos(2\omega_{sig}t + 2\phi) + \frac{E_{LO}^2}{2} \cos(2\omega_{LO}t) + E_{sig}E_{LO} \cos((\omega_{sig} + \omega_{LO})t + \phi)}_{\text{componente de alta frecuencia}} \\
 &\quad + \underbrace{E_{sig}E_{LO} \cos((\omega_{sig} - \omega_{LO})t + \phi)}_{\text{componente de pulso}}
 \end{aligned}$$

Los dos tipos de ruido principales que se aplican a la detección activa de heterodinos son el ruido de partículas y el de disparo. El ruido de partículas surge de la interferencia entre los frentes de onda de la luz dispersa cuando la rugosidad del dispersor es comparable a la longitud de onda de la radiación relevante. Se puede reducir promediando eventos que están suficientemente bien separados en el tiempo o el espacio para que no se correlacionen entre sí. El ruido de disparo es el resultado de la llegada aleatoria de fotones al detector, y la contribución del ruido de disparo principal procederá del oscilador local.

La detección de heterodinos tiene tres ventajas distintas sobre la detección directa. La alta resolución espectral asegura que la resolución espectral coincida con el ancho espectral del haz transmitido (unos pocos MHz). El hecho de que la resolución espectral del sistema heterodino esté determinada por el filtrado electrónico reduce en gran medida la contribución de la radiación de fondo a la señal observada. En términos de sensibilidad, la detección de heterodinos tiene la ventaja particular de proporcionar la ganancia heterodina, especialmente en el infrarrojo medio, donde la detección directa es significativamente menos eficiente que en el visible o ultravioleta. Las ecuaciones 11 y 12 relacionan la concentración mínima detectable con una serie de parámetros que incluyen la diferencia de potencia mínima detectable entre las longitudes de onda correspondientes a la resonancia activada y desactivada. La  $\Delta P$  es equivalente a la potencia equivalente al ruido; en la detección de heterodinos, este es el ruido de disparo del oscilador local, mientras que en la detección directa es el fondo térmico (ruido oscuro). A niveles bajos de potencia recibida, el ruido en la detección de heterodinos es varios órdenes de magnitud menor que en la detección directa, lo que tiene un impacto sustancial en el límite de detección. Además, la sensibilidad limitada de la detección directa requiere niveles de señal más altos, lo que conduce a condiciones en donde el ruido de partículas se vuelve dominante. Además, los niveles de señal de retrodispersión más altos requieren que se transmitan potencias de láser más altas, que pueden exceder los límites de exposición máximos posibles según lo prescrito por la ley. La detección de heterodinos permite la detección de niveles más bajos de señal retrodispersada y, por lo tanto, es factible el uso de potencias láser transmitidas considerablemente más bajas.

A continuación, se describirán con más detalle diferentes elementos del sistema. La Figura 4 divide el sistema general en tres subsistemas separados: la fuente 401, que comprende el láser 4011 en sí mismo y su sistema de calibración 4012;

la óptica 402 encamina la radiación entre los diferentes elementos, incluyendo los elementos ópticos relevantes tales como el modulador acústico-óptico 4021, el fotomezclador 4022 y la óptica transmisora y receptora 4023; y el subsistema electrónico 403 que incluye tanto el control del instrumento 4031 como el procesamiento 4032 (incluido el procesamiento y análisis de señales). Estos subsistemas se tratarán por separado más abajo, para facilitar la explicación.

Como se indicó anteriormente, una fuente de láser usada en modalidades de la invención es un láser de cascada cuántica (QCL). Este es un láser semiconductor que emite radiación como resultado de las transiciones entre subbandas en una pila de múltiples heteroestructuras de pozos cuánticos. Los QCL operativos están bien desarrollados y disponibles comercialmente en la región espectral que cubre de 4 a 20  $\mu\text{m}$ ; los proveedores incluyen Pranalytica, Alpes Lasers y Daylight Solutions. Típicamente, estos funcionan en modo de onda continua cerca de la temperatura ambiente con una potencia de salida de hasta 50 mW.

La ganancia óptica de las estructuras QCL es inherentemente amplia ( $>100 \text{ cm}^{-1}$ ). Por lo tanto, en la configuración más simple: un láser Fabry-Perot en donde el material de la cascada cuántica se fabrica como una guía de ondas óptica para formar el medio de ganancia, con los extremos cortados para formar dos espejos paralelos y, por lo tanto, un resonador Fabry-Perot, operación multimodo es típico, lo que no es adecuado para aplicaciones espectroscópicas de alta resolución.

El funcionamiento en modo único se puede lograr construyendo un reflector Bragg distribuido en la parte superior de la zona activa del láser para evitar la operación en una longitud de onda diferente a la deseada. Esto limita la potencia disponible y limita severamente la sintonización espectral. La sintonización espectral se limita típicamente a menos del 1 % de la frecuencia central del láser para el uso de ondas continuas, con el cambio de temperatura usado para efectuar la sintonización que esté disponible; se puede acceder a una gama más amplia de longitudes de onda en modo pulsado, como "pulsaciones" de la longitud de onda del láser durante un pulso puede permitir el escaneo de una región espectral.

Una solución preferida es usar un láser de cavidad externa. El dispositivo de cascada cuántica sirve aquí como medio de ganancia de láser, pero una o ambas facetas de la guía de ondas tiene un recubrimiento antirreflectante que anula la acción de la cavidad de esa faceta de la guía de ondas. Los espejos externos al dispositivo definen la cavidad óptica, que ahora puede incluir un elemento selectivo de frecuencia, como una rejilla de difracción, para hacer que el láser funcione en un solo modo y permitir la sintonización continua en un amplio intervalo espectral. El intervalo de sintonía de tales dispositivos está limitado solo por la curva de ganancia del QCL, y tales dispositivos pueden escanear más de  $100 \text{ cm}^{-1}$  en el infrarrojo medio (es decir, el 10 % de la frecuencia central).

Si bien un QCL es una opción muy adecuada para las modalidades de la invención, también pueden usarse otros láseres sintonizables continuamente en los intervalos ópticos de interés. También se pueden obtener fuentes OPO y DFG que se pueden sintonizar continuamente en infrarrojos de longitud de onda larga y media. Las fuentes OPO (oscilador paramétrico óptico) usan un resonador óptico y un cristal óptico no lineal para convertir una onda láser de bombeo en dos ondas de frecuencia más baja; los OPO están disponibles comercialmente en empresas como Coherent, Inc. y NKT Photonics. Las DFG (generaciones de frecuencia de diferencia) también usan un cristal no lineal, pero en este caso dos láseres de infrarrojos cercanos se enfocan en un cristal no lineal para generar radiación en la frecuencia de diferencia; las empresas como NovaWave ofrecen láseres DFG comerciales.

Para lograr la sensibilidad y selectividad deseadas, se prefiere fuertemente que la fuente láser sea capaz de sintonizar continuamente toda la línea/banda de absorción de la molécula de interés. Esto no se puede lograr con un sistema DIAL convencional, que opera en longitudes de onda predeterminadas específicas. Para gases atmosféricos (por ejemplo el  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$ , etc.) en condiciones atmosféricas típicas, las líneas de absorción son del orden de  $0,1 \text{ cm}^{-1}$  de ancho total a la mitad del máximo (FWHM) al nivel del mar. Por el contrario, las especies más grandes y complejas (incluidos los explosivos) pueden tener bandas de absorción con anchos de  $10 \text{ cm}^{-1}$  o mayor. En general, la espectroscopia de explosivos y especies relacionadas está pobremente caracterizada en términos de frecuencias y anchos de banda.

Los láseres de cascada cuántica se pueden ajustar en longitud de onda mediante modulación de corriente y/o temperatura; es muy importante controlar con precisión estos dos parámetros para garantizar la estabilidad de frecuencia de la radiación emitida. Se encuentran disponibles controladores comerciales de temperatura y corriente que proporcionan la estabilidad requerida para operar el QCL en aplicaciones espectroscópicas; el control de temperatura se discutirá más abajo.

El pequeño tamaño de las facetas de los QCL da como resultado una emisión de radiación muy divergente (típicamente en ángulo completo de 60 por 40 grados). Por lo tanto, se requiere una óptica rápida y de alta calidad (por ejemplo, un menisco esférico) para colimar de manera eficiente la radiación en la salida de QCL. Esta óptica define el tamaño del haz inicial de la luz láser colimada (típicamente  $<10 \text{ mm}$ ).

Los QCL son muy sensibles a la retroalimentación óptica (OF) causada por los reflejos de la superficie de los componentes ópticos transmisivos y el detector. Esto se aplica tanto a DFB como a dispositivos de cavidad externa. Cantidades relativamente pequeñas de OF ( $<60 \text{ dB}$ ) pueden perturbar la emisión de QCL e introducir un exceso de ruido que es perjudicial para la sensibilidad heterodina. El uso de ópticas reflectantes en lugar de refractivas reduce en gran medida este efecto. Sin embargo, la retroalimentación causada por la reflexión de las superficies del detector no se puede eliminar tan fácilmente. Por tanto, es necesario aislar ópticamente el láser del detector mediante el uso de una placa de un cuarto de onda, aprovechando las propiedades de polarización de la radiación láser. La placa de cuarto de onda debe insertarse

después del AOM (descrito más abajo) ya que la eficiencia del AOM depende de la polarización (el haz de entrada debe estar polarizado linealmente).

5 La transmisión de radiación láser a lo largo de trayectorias abiertas está restringida en lugares públicos mediante límites legales de exposición ( $100 \text{ mWcm}^{-2}$  para exposición ocular en el infrarrojo medio). Por lo tanto, un instrumento adecuado para su despliegue en lugares públicos debe cumplir con estas restricciones. Una potencia láser transmitida de 5 a 10 mW cumplirá los criterios de seguridad para la exposición ocular en todas las distancias. Los láseres de cascada cuántica tienden a tener potencias relativamente bajas (en promedio hasta 100 mW para dispositivos monomodo). Si bien esto podría ser problemático en aplicaciones como la detección atmosférica donde se desea la observación de largo alcance (> 1 km), a distancias cortas (<1 km) esto puede convertirse en una ventaja. Los láseres de  $\text{CO}_2$  comúnmente usados en la detección atmosférica son capaces de producir varios vatios de potencia y deben transmitirse como haces de diámetro relativamente grande para cumplir con los límites de exposición. Esto, a su vez, requiere componentes ópticos grandes, con implicaciones de tamaño físico y costo. Por el contrario, solo se requieren componentes ópticos relativamente pequeños para que los QCL cumplan con los estándares de seguridad láser. Además, dado que la potencia transmitida debe permanecer baja para cumplir con las normas de seguridad, la detección de heterodinos triunfaría sobre la detección directa en términos de relación señal/ruido. Esto se debe a que el discriminador clave es la potencia retrodispersada, que es una función tanto de la distancia como de la potencia láser transmitida. Láseres menos potentes, tales como. Los QCL permitirán medir la retrodispersión a distancias cortas en condiciones en donde el ruido asociado con el detector sea dominante.

20 Es conveniente que el montaje de QCL sea extremadamente estable, ya que la alineación del haz es fundamental para una eficiencia de mezcla heterodina óptima. Se requiere la coincidencia de sub-longitudes de onda de los frentes de onda del oscilador local y de los campos de la señal recibida. Se encuentra que una fuente importante de inestabilidad es el uso de un enfriador termoeléctrico Peltier. Un enfriador Peltier es la principal solución convencional para proporcionar estabilidad de temperatura a un láser de este tipo. Los presentes inventores han apreciado que esta inestabilidad se puede solucionar desacoplando cualquier movimiento del enfriador Peltier de modo que no afecte a la posición del láser. Este enfoque contribuye significativamente a lograr la precisión requerida para esta solicitud.

Un módulo láser preferido proporciona las siguientes características:

- 30 • Posición del láser desacoplada del movimiento Peltier.
- Funcionamiento a presión atmosférica.
- Posibilidad de funcionamiento a baja temperatura.
- Tamaño compacto.
- 35 • Minimización del riesgo de daños al láser.

En la Figura 10 se muestra una modalidad de un módulo que tiene estas características. La fuente láser 1, en este caso un QCL, está montada sobre una placa fría 203 enfriada por un enfriador Peltier 201. El primer requisito anterior implica que el lado caliente del enfriador Peltier 201 debe poder moverse libremente, mientras que el lado enfriado debe mantenerse estático con respecto al cuerpo principal del módulo láser; en este diseño, el requisito se logra suspendiendo el enfriador Peltier 201 de la placa fría 203. También se proporciona un método compacto de disipación de calor que se puede mover libremente con el enfriador Peltier; este puede ser un intercambiador de calor 202 de diseño adecuado. Un pequeño intercambiador de calor 202 refrigerado por líquido se encuentra dentro de la carcasa del láser y extrae el calor del lado caliente del enfriador Peltier 201. La unión de la placa fría 203 del láser al cuerpo del módulo láser se realiza con un buen aislamiento térmico, mediante el uso de abrazaderas 204 térmicamente aislantes provistas de pequeños contactos 205 de punta cónica. Para garantizar que no se produzca condensación mientras se usan láseres a baja temperatura, el módulo está diseñado para ser purgado con un gas inerte espectroscópica y químicamente. Además, para la máxima seguridad del láser, se instala un sensor de humedad dentro de la carcasa para un control continuo del nivel de humedad y el punto de rocío.

50 La carcasa del módulo láser está hecha de aleación de aluminio. Se usa una única superficie de sellado compatible con un anillo O estándar para limitar la posibilidad de fugas de aire. Las ventanas ópticas están hechas de fluoruro de bario, pegadas al módulo con epoxi. Un conector hermético está montado en la parte posterior del módulo para recibir el sensor de humedad.

55 Al seleccionar los materiales para montar el láser, fue necesario un compromiso entre un alto aislamiento térmico y una baja expansión térmica. Las abrazaderas 204 están hechas de fibra de vidrio, provistas de contactos 205 de punta cónica de cerámica para limitar el intercambio térmico entre la placa fría 203 del láser y el soporte de montaje. Vespel y Macor también son materiales posibles para este propósito, aunque se encuentra que la fibra de vidrio proporciona una mejor compensación general.

60 La placa fría láser 203 y el intercambiador de calor 202 se mecanizan a partir de cobre de telurio; puede usarse cobre puro (al igual que otras aleaciones), pero el cobre-telurio es una opción efectiva ya que tiene beneficios de mecanizado sobre los cobres puros con una conductividad térmica que es solo ligeramente inferior. Para evitar la oxidación, que conduce a un ennegrecimiento gradual de la superficie y pérdida de rendimiento térmico, las partes de cobre pueden recubrirse con oro mediante el uso de un baño electroquímico.

El intercambiador de calor se fabrica preferentemente en dos partes para permitir un mecanizado complejo, de modo que se pueda maximizar el intercambio de superficie entre el fluido refrigerante y el mini bloque enfriador. Se puede mecanizar una trayectoria de flujo plegada o laberíntica en cada mitad, con los dos conectores unidos con precisión, por ejemplo, mediante el uso de pasadores y soldadura de estaño.

La placa de enfriamiento láser 203, el enfriador Peltier 201 y el intercambiador de calor 202 se pueden ensamblar y pegar mediante el uso de epoxi termoconductor. La placa fría 203 se puede integrar entonces con el módulo láser mediante el uso de las abrazaderas 204 de fibra de vidrio.

Pueden usarse accesorios en miniatura tanto para el circuito de fluido refrigerante (para la entrada de refrigeración 206 y el paso de refrigeración 207) como para la purga de gas seco. El primero puede montarse en el intercambiador de calor 202 y conectarse con un tubo de Norprene, que es lo suficientemente flexible para permitir el libre movimiento del intercambiador de calor mientras funciona el enfriador Peltier 201. Pueden usarse accesorios de alimentación en miniatura en ángulo recto para pasar el fluido de enfriamiento a través de la pared del módulo láser sin comprometer el sello de gas del módulo. Puede usarse una válvula de entrada de conexión rápida autosellante 209 para unir la línea de gas de purga al módulo, y una válvula de retención 210 instalada para permitir que escape el gas de escape. Esta disposición permite realizar la purga de forma rápida y sencilla.

Los contactos eléctricos se pueden hacer mediante el uso de un conector híbrido sub-D, para mantener un tamaño compacto a pesar de la alta corriente nominal requerida para el enfriador Peltier. El conector puede estar encapsulado en epoxi para evitar fugas de aire después de que las clavijas del conector se hayan soldado a una placa electrónica. Los contactos al QCL se proporcionan a través de una almohadilla de contacto 208 con resorte. Se adjunta un termistor a la placa fría del láser 203, en el punto más cercano posible al láser, para regular la temperatura.

Como se indicó anteriormente, la fuente de láser se puede sintonizar continuamente en un intervalo de longitudes de onda. En principio, esta sintonía puede ser por variación de temperatura o variación de corriente. Un enfoque práctico a tomar es mantener la temperatura sustancialmente constante mediante el uso de enfriamiento Peltier como se describe anteriormente, y escanear a través de un intervalo de frecuencia variando la corriente del láser. Un enfoque que logrará esto es aplicar una señal de diente de sierra a la corriente de inyección de la fuente de láser; esto hará que la frecuencia del láser escanee en un intervalo de frecuencia definido por los extremos de la señal de diente de sierra.

Se requiere un sistema de calibración para la fuente láser (y por lo tanto para el oscilador local). Esto se proporciona por una de las salidas del modulador acústico-óptico, que se describirá en primer lugar.

La detección de heterodinos eficiente (y el subsiguiente filtrado y procesamiento electrónico) requiere que las frecuencias del oscilador local y la radiación detectada sean diferentes. Esto también tiene el efecto beneficioso de alejar la frecuencia de detección de las fuentes de ruido de baja frecuencia. Los moduladores acústico-ópticos, usados en el modo de cambio de frecuencia, proporcionan la forma más eficiente de compensar la frecuencia del oscilador local con respecto al haz transmitido. Se pueden obtener cambios de frecuencia de hasta 100 MHz con los sistemas comerciales de la técnica actual. Además, el cambio de frecuencia AOM asegura la cancelación eficiente de cualquier cambio de frecuencia láser sin la necesidad de un esquema de estabilización de frecuencia experimentalmente complejo. Un AOM ilustrativo adecuado para su uso en tal sistema es el modelo AGM-1003A1 de IntraAction Corporation, y otro es el 1208-G80-3 producido por Isomet.

La Figura 5 muestra un esquema de un AOM que funciona en modo de cambio de frecuencia. Un cristal (germanio, por ejemplo) es excitado por una onda de sonido para crear una rejilla a través de la modulación del índice de refracción transversal. La interacción de la radiación láser con esta rejilla da como resultado la producción de frecuencias que difieren de la frecuencia original en  $n \cdot f$  donde  $n = 0, 1, 2, \text{etc.}$ , y  $f$  es la frecuencia de desplazamiento (correspondiente a la frecuencia de la onda de sonido de entrada). El orden cero ( $n = 0$ ) retiene la frecuencia original de la radiación de entrada, mientras que las frecuencias de orden superior ( $n > 0$ ) se desplazan en frecuencia y emergen del cristal separadas angularmente. Esta separación angular permite que la radiación con desplazamiento de frecuencia se separe espacialmente del haz no desplazado.

Los dispositivos disponibles comercialmente están optimizados para proporcionar la mayor parte de la salida en el haz de primer orden. Los AOM típicos tienen eficiencias del 60 % para la producción del haz de primer orden con el resto (~ 39 %) en el haz de orden cero. Una fracción muy pequeña (<1 %) consiste en radiación de orden superior (es decir, desplazada en 200 MHz, 300 MHz, etc.) emitida con separaciones angulares mayores. El ángulo de Bragg  $\theta_B$  es el ángulo de entrada requerido, mientras que los haces cero y de primer orden están separados por  $\theta_{sep}$ . Las ecuaciones 13 y 14 relacionan estos ángulos con la longitud de onda  $\lambda$ , el desplazamiento de frecuencia del AOM,  $f$ , y la velocidad acústica del AOM,  $v$ .

$$\theta_B = \frac{\lambda f}{2v}$$

Ecuación 13

$$\theta_{sep} = 2\theta_B = \frac{\lambda f}{v}$$

Ecuación 14

5 Para una longitud de onda de 10,6 micras, una frecuencia de desplazamiento de 100 MHz y un AOM de germanio ( $v = 5500 \text{ ms}^{-1}$ ), el ángulo de Bragg de entrada es de 5,5 grados y el ángulo de separación es de 11,0 grados. Trabajar en el infrarrojo medio proporciona un mayor grado de separación de lo que cabría esperar para la radiación visible o del infrarrojo cercano. El ángulo de separación presenta una restricción sobre el tamaño mínimo del módulo AOM, ya que los haces

10 cero y de primer orden deben estar lo suficientemente separados para permitir la inserción de componentes ópticos (espejos, etc.) en cada trayectoria de haz individual. El haz de orden cero, aunque no es necesario para la detección de heterodinos, se usará para proporcionar la calibración del láser en términos de potencia y longitud de onda absoluta y relativa.

15 Para una región activa de la AOM con un tamaño de abertura de 3 mm, dado el diámetro del haz que emerge de la QCL (~9-10 mm de diámetro), se requiere un sistema óptico para hacer coincidir el haz con la abertura del AOM. La eficiencia del AOM es aproximadamente del 60 %. Preferentemente, el AOM se colocará en la trayectoria del haz del oscilador local para maximizar la potencia disponible para la transmisión al objetivo.

20 Ya que la retroalimentación óptica entre el detector y el láser puede ser una fuente importante de ruido en un instrumento heterodino. Puede usarse la polarización del láser para proporcionar un grado de aislamiento, aunque se debe tener cuidado para asegurar la polarización lineal en el AOM para una máxima eficiencia. La presencia del AOM en la trayectoria óptica también puede proporcionar cierto aislamiento óptico, ya que el haz de primer orden se desplaza en frecuencia con respecto a la del láser; Además, el ángulo de entrada del AOM también reducirá la cantidad de energía reflejada de

25 regreso al láser desde el detector.

Ahora se describirá el sistema de calibración. Como se indicó anteriormente, esto usa el haz de orden cero del AOM. La Figura 8 ilustra una disposición de calibración que usa este haz de orden cero para el control de potencia y la calibración

30 espectral del haz del oscilador local. Los espejos planos montados en soportes abatibles 23 se usan para proporcionar trayectorias de haz separadas para la calibración de frecuencia relativa (etalon 22) y absoluta (celda de gas 21). El contenido de la celda de gas 21 estará determinado por la longitud de onda del láser. Un gas a baja presión exhibirá una línea de absorción dominada por el ensanchamiento Doppler (aprox. 50 MHz), lo que permitirá determinar la frecuencia del láser en términos absolutos. El haz se enfoca en un detector 24 de fotodiodo refrigerado por Peltier. Este detector puede tener una especificación considerablemente más baja que la requerida para la fotomezcla heterodina. Los soportes

35 abatibles 23 pueden configurarse para pasar la radiación a través de la celda de gas de referencia (calibración de frecuencia absoluta) o del etalon (calibración de frecuencia relativa). Las mediciones de potencia absoluta se pueden realizar incorporando soportes abatibles adicionales para desviar el haz alrededor de la celda de referencia y el etalon, o retirando físicamente la celda de referencia o el etalon de la trayectoria óptica. Alternativamente, la potencia del láser podría monitorearse mediante el uso de la porción del oscilador local que es transmitida por el divisor de haz usado para proporcionar la entrada al fotomezclador; sin embargo, este último requeriría un detector adicional.

Aunque los QCL proporcionan una sintonización continua, la potencia de salida del láser puede variar mucho en el intervalo de sintonización espectral. Experimentalmente, el conocimiento de la variación en la potencia del láser durante el ajuste del láser permite corregir la señal heterodina. Sin embargo, debido a los efectos de saturación que pueden ocurrir

45 en los fotomezcladores, existe un nivel óptimo de potencia LO que asegurará que el receptor heterodino opere cerca del límite de detección del ruido de disparo. Las variaciones en la potencia de LO conducirán a cambios en la relación señal/ruido de medición, por lo que sería beneficioso estabilizar la potencia del oscilador local.

Podría usarse un bucle de retroalimentación del monitor de potencia del LO para controlar la corriente suministrada al QCL. Sin embargo, la modificación de la corriente de inyección del láser afecta la frecuencia del láser, por lo tanto, tal

50 esquema no es apropiado para la detección de heterodinos o para aplicaciones espectroscópicas. Una alternativa es aprovechar la polarización inherente de la fuente láser para lograr la estabilización de potencia del láser. La inserción de un polarizador en el haz QCL permitirá controlar la potencia transmitida al girar el eje del polarizador. La instalación de un bucle de retroalimentación entre el ángulo del polarizador y el monitor de potencia permite que la potencia del láser se

55 mantenga constante durante todo el escaneo espectral.

Este enfoque se muestra en la Figura 12. La estabilización de la potencia del láser aprovecha las propiedades de polarización de la radiación QCL. Mediante el uso de un polarizador 31, la potencia del láser se puede atenuar de manera controlada mediante la modificación del ángulo entre el eje del polarizador y la polarización del láser. En teoría, la potencia transmitida varía como el cuadrado del coseno de este ángulo. A diferencia de los esquemas de estabilización que se basan en la corriente de inyección del láser, el uso de un polarizador no afecta la frecuencia del láser.

60

Un polarizador 31, una vez instalado en una etapa de rotación motorizada 35, puede ser controlado por una señal de tensión externa. Se puede establecer una relación entre la tensión de comando y la atenuación del polarizador creando un atenuador controlado por voltaje. Dado que tal enfoque se basa en el movimiento mecánico, será más lento que las

65 velocidades de modulación que se pueden lograr mediante la corriente de inyección del láser. Sin embargo, es una manera

rentable y efectiva de implementar este aspecto del sistema con componentes comerciales listos para usar. Los inventores han apreciado que la alta velocidad no es un requisito en lo que respecta a los sistemas láser heterodinos. Se podría emplear un enfoque similar mediante el uso de absorbentes saturables de infrarrojo medio; esto permitiría tiempos de respuesta más rápidos, pero estos componentes no están actualmente disponibles a un costo razonable.

En la detección de heterodinos, solo la señal de CA acoplada de un detector de alta velocidad contiene información sobre las frecuencias intermedias que transportan la información espectral. A niveles de potencia por debajo de la saturación, el componente acoplado a CC es linealmente proporcional a la potencia del LO y puede usarse como entrada de monitorización de potencia para un sistema proporcional-integral-derivado (PID). El sistema PID retroalimenta el estado de polarización y, de esta manera, mantiene la señal de CC del detector de alta velocidad a un nivel constante, determinado por un punto de ajuste elegido por el operador. Los principios del sistema de control se ilustran en la Figura 12.

En una disposición ilustrativa, el polarizador 31 puede ser una rejilla de alambre sobre un sustrato de fluoruro de bario, montado en una plataforma 35 de rotación motorizada de alta velocidad conectada a una interfaz 34 de control de ordenador. Un controlador PID 33 responde al componente acoplado a CC del detector heterodino 3. El controlador PID 33 es un componente fácilmente disponible comercialmente y se usa para proporcionar la señal de retroalimentación a la interfaz de control de la plataforma motorizada. Este enfoque puede lograr un tiempo de respuesta de 50 ms y resulta efectivo para rastrear un escaneo de frecuencia impulsado por una señal de diente de sierra aplicada a la corriente de inyección del láser.

El control del PID proporciona una forma relativamente sencilla de minimizar la influencia de las perturbaciones en un sistema. En este esquema, la salida de un sistema PID se usa para alterar algún parámetro físico de tal manera que se minimice la diferencia entre un valor medido y un punto de ajuste requerido. La relación PID básica se da en la Ecuación 9.  $V_{\text{salida}}$  es el voltaje de salida entregado por el controlador,  $P$  es el término de ganancia proporcional,  $I$  es el término de ganancia integral,  $D$  es el término de ganancia diferencial y  $V_0$  es una desviación de tensión constante. El término  $\epsilon$  representa la señal de error que corresponde a la diferencia entre la señal medida y el punto de ajuste elegido por el usuario.

$$V_{\text{salida}} = P \cdot \left\{ \epsilon + I \int \epsilon dt + D \frac{d\epsilon}{dt} \right\} + V_0$$

Ecuación 15

El control óptimo se logra ajustando los parámetros  $P$ ,  $I$ , y  $D$  de la Ecuación 15. El término proporcional es un término de ganancia que escala linealmente la magnitud de la tensión de retroalimentación a la del error. El término integral compensa cualquier desviación del error a lo largo del tiempo y generalmente afecta la precisión de la retroalimentación. El término derivado es una medida de la velocidad de cambio de la señal de error  $\epsilon$  y compensa los cambios rápidos. Cuando se requiere un alto nivel de estabilidad, este parámetro generalmente se fija en cero.

En la modalidad aquí descrita, el parámetro de control es la tensión entregada por el detector, que es linealmente proporcional a la potencia del láser. El circuito de retroalimentación se establece conectando la salida del controlador del PID a la entrada analógica de la plataforma de rotación. Por tanto, la señal de error determina la posición del polarizador y por lo tanto controla la potencia transmitida. Puede ser necesario introducir una desviación en la salida PID para permitir el control bipolar. Los parámetros PID óptimos para el sistema se pueden determinar empíricamente.

Como se muestra en la Figura 6, son posibles dos geometrías para el conjunto transmisor/receptor. La óptica usada son espejos parabólicos fuera del eje de 90 grados (OAPM). La geometría biestática tiene ópticas separadas para la transmisión y la recepción, mientras que una sola óptica realiza ambas tareas en la configuración monoestática. Esto sugiere que una configuración monoestática ofrece un diseño más simple, económico y compacto. Sin embargo, hay otras consideraciones; la radiación transmitida y retrodispersada debe separarse espacialmente antes de mezclarse con el haz del oscilador local. Para lograr esto en la configuración monoestática serán necesarios componentes ópticos adicionales. En el caso biestático, la radiación retrodispersada ya está separada de la radiación transmitida por la disposición óptica. Los dos enfoques se pueden combinar, pero solo haciendo que los componentes sean significativamente más grandes para permitir la separación de los haces.

Dado que las radiaciones transmitidas y dispersas tienen la misma longitud de onda, el medio principal para separarlas (o combinar haces para la mezcla heterodina) son los divisores de haz (ópticas parcialmente reflectantes). En el caso monoestático, los divisores de haz deben colocarse en la trayectoria de ambos haces, con la complicación de que maximizar la transmisión a través del divisor de haz de la radiación retrodispersada minimiza la cantidad de energía que se puede transmitir hacia el objetivo (y viceversa). La situación óptima se logra con un divisor de haz de transmisión/reflexión del 50 %, correspondiente a una reducción de un factor de 4 en la señal retrodispersada en el detector. El factor de reducción es proporcional a la potencia transmitida y a la reflectancia del divisor de haz.

Una configuración alternativa hace uso de la polarización del láser para reflejar/transmitir selectivamente la radiación transmitida/retrodispersada. La polarización lineal del láser se convierte en polarización circular mediante una placa de cuarto de onda; la retrodispersión de un objetivo invierte la polarización circular (es decir, de circularmente polarizada a la derecha a izquierda). La placa de un cuarto de onda convierte la radiación retrodispersada en una linealmente polarizada que es perpendicular al haz transmitido. Puede usarse un divisor de haz polarizador (generalmente establecido en el ángulo de Brewster) para reflejar el haz transmitido y permitir que la radiación retrodispersada pase (o viceversa). Este esquema se basa en que la radiación conserva cierto grado de polarización durante su paso por la atmósfera y la interacción con el objetivo. La pérdida de la polarización dará como resultado una reducción del rendimiento de la radiación retrodispersada; si la polarización es totalmente aleatoria, entonces el divisor de haz polarizador actuará de manera efectiva como un divisor de haz al 50 % (como en el caso no polarizador). Sin embargo, permitirá una transmisión muy eficiente del rayo láser principal. El factor de reducción será menor o igual a dos en dependencia del grado de pérdida de la polarización causado por el proceso de dispersión.

La Figura 6 muestra esquemáticamente configuraciones biestáticas y monoestáticas. Las restricciones del sistema incluyen la eficiencia del AOM (~ 60 %) y la potencia de salida del QCL (40 mW como máximo). Para una detección de heterodinos eficaz, la potencia del oscilador local en el detector es preferentemente de aproximadamente 1 mW. La potencia en el haz del oscilador local en el detector está determinada por la transmitancia de los dos divisores de haz y la eficiencia del AOM. En el caso biestático, la potencia del haz transmitido está determinada por la reflectancia del primer divisor de haz. En la configuración monoestática hay una reducción adicional en la potencia transmitida en dependencia de la transmitancia del segundo divisor de haz. Si bien se puede emplear cualquiera de los enfoques, el análisis muestra que el sistema biestático tiene una fracción mucho mayor de radiación retrodispersada transmitida al detector que la configuración monoestática.

Una desventaja del sistema biestático es que el campo de visión del detector puede no solaparse perfectamente con el rayo láser transmitido. En el peor de los casos, el factor de superposición  $O(R)$  dependerá en gran medida de la distancia desde el objetivo; este problema es particularmente evidente en distancias cortas con sistemas ópticos de transmisor y receptor separados. Suponiendo que el tamaño del punto láser a una distancia particular coincide con el campo de visión heterodino (es decir, ambos puntos son circulares y del mismo diámetro), la función de superposición se puede calcular fácilmente. En un sistema práctico, la superposición puede reducirse significativamente en un intervalo de menos de 200 m (muy significativamente reducido a menos de 50 m), pero esto se puede solucionar permitiendo que la óptica del transmisor (o receptor) se incline hasta cierto punto. El ángulo de inclinación requerido para superponer espacialmente los dos haces depende de la distancia  $R$  al objetivo y la separación  $S$  de las dos ópticas. A una distancia de 100 m y una separación de 8 cm, el ángulo de inclinación requerido es muy pequeño (aproximadamente 0,045 grados). Inclinarse ambas ópticas simultáneamente requiere que cada óptica se incline solo la mitad de este ángulo. Estos ángulos de inclinación se pueden lograr mediante el uso de los ajustadores manuales de los soportes ópticos. Una alternativa es usar actuadores motorizados para controlar (a través de un ordenador) el ángulo de inclinación.

El uso de fuentes de láser de onda continua no permite obtener inmediatamente información de resolución del alcance. Sin embargo, se han desarrollado enfoques que permiten determinar la información de alcance controlando (y ajustando) la posición focal de la radiación transmitida. Las condiciones de enfoque láser se pueden controlar mediante el uso de dos ópticas separadas por una distancia ligeramente mayor que la suma de sus distancias focales; una separación igual a la suma de las distancias focales conduce a una disposición confocal donde el haz saliente está colimado (es decir, con un punto focal en el infinito). En la práctica, la distancia focal de la óptica estará restringida; por lo tanto, la reducción del tamaño del punto inicial es el medio principal para aumentar el alcance hasta el punto focal final. Sin embargo, un tamaño de punto pequeño implica un alto grado de divergencia del haz, lo que significa que el haz en la óptica puede exceder el diámetro de la óptica, lo que resulta en una pérdida significativa de potencia láser. La combinación de un tamaño de punto pequeño con una distancia focal larga impone a la óptica el requisito de que sea lo suficientemente grande para acomodar el haz.

La necesidad de reducir la retroalimentación óptica al láser requiere el uso exclusivo de ópticas reflectantes. Los espejos esféricos (incluidos los espejos parabólicos fuera del eje) permanecen astigmáticos solo en una disposición confocal. Sin embargo, como la función del transmisor es puramente iluminar el objetivo, no se deben tener en cuenta los requisitos de imagen, no hay restricciones en la calidad de los frentes de onda y el OAPM se puede ajustar libremente para establecer la posición del foco.

Una disposición óptica acromática que usa únicamente óptica reflectante es más exigente para la alineación que una basada en óptica refractiva (por ejemplo, lentes). Sin embargo, tiene una ventaja adicional, que es que el sistema se puede monitorear y alinear mediante el uso de radiación visible, ya que para la óptica reflectante el comportamiento de la radiación en el sistema es en gran parte independiente de la longitud de onda. Las ópticas reflectantes también tienen típicamente un coste mucho menor que las ópticas refractivas equivalentes.

La salida visible (aprox. 600 nm) de los láseres de diodo se puede incorporar en el módulo receptor/transmisor mediante el uso de espejos dicróicos o mediante el uso de soportes "abatibles" que se pueden insertar o quitar del haz según se desee. Los soportes abatibles son más baratos y no influyen en la potencia del rayo infrarrojo cuando se retiran de la trayectoria del haz. Sin embargo, la acción de insertar y retirar el soporte puede resultar en la desalineación del haz visible con respecto al infrarrojo. Los espejos dicróicos (totalmente reflectantes en longitudes de onda visibles y que transmiten

totalmente en frecuencias infrarrojas) son una opción más cara, pero formarían una parte permanente del sistema óptico con problemas mínimos de desalineación a lo largo del tiempo.

5 La configuración heterodina requiere la mezcla del haz del oscilador local con el haz de señal retrodispersado. La calidad de la mezcla (coincidencia del frente de fase) afectará directamente la relación señal/ruido de las mediciones. La Figura 7 muestra métodos alternativos para implementar la mezcla que difieren en la forma en que se mezclan los dos haces en el fotodetector: como haces paralelos (Figura 7a) o como haces convergentes (Figura 7b)

Las diferentes configuraciones tienen las siguientes similitudes principales:

- 10
- Una trayectoria de LO que emerge del QCL, colimada por una lente de alta apertura numérica y obtenida en el fotomezclador.
  - Una trayectoria de transmisión que también emerge del QCL, colimada por la lente y dirigida al objetivo a través de un expansor afocal,
  - 15 • Una trayectoria del receptor, donde la radiación retrodispersada es recolectada por un telescopio de desmagnificación afocal y enfocada en el fotomezclador.

20 La configuración paralela usa el mismo divisor de haz para separar el LO y la radiación transmitida y luego para recombinar la radiación LO recibida. Esta es la forma más obvia de superponer los dos haces en el detector, pero el sistema también deberá adaptarse al AOM. Como el AOM debe estar en la trayectoria LO, se requiere un divisor de haz adicional. Dada la apertura de entrada del AOM (-3 mm), el haz necesita una mayor desmagnificación. Esto se puede lograr con un expansor afocal reflectante con parábolas confocales fuera del eje, pero con un ángulo de incidencia menor para la compacidad y, en particular, mayores tolerancias de desalineación. Este sistema afocal también reduce la división de polarización.

25 La mezcla convergente implica un diseño óptico más complejo que la disposición paralela. Sin embargo, debido a la existencia de imágenes intermedias conjugadas, ofrece más flexibilidad y control sobre la alineación óptica. La calidad del haz de infrarrojos también puede ser menos sensible a las imperfecciones de la superficie del divisor de haz. Además del desplazamiento lateral del haz (50 % del grosor del divisor del haz a una incidencia de 45 grados en una placa de ZnSe) se producirá un desenfoque axial que puede producir aberraciones esféricas y astigmatismo. Esto se puede compensar reajustando la separación de componentes y/o agregando una placa de compensación que posea las mismas propiedades que el divisor de haz colocado en una posición antisimétrica. Sin embargo, cuando el campo de visión es pequeño, la ganancia de la compensación puede no ser significativa en comparación con el aumento de la retroalimentación óptica provocada por la introducción de un componente óptico transmisivo adicional. Para integrar el AOM se requieren modificaciones similares como en el caso de mezcla paralela. El uso de un espejo elipsoidal para el enfoque final sobre la superficie del detector tiene ventajas y desventajas: es intrínsecamente más difícil alinear la imagen del detector con los dos haces divergentes en el espacio del objeto del elipsoide, pero la secuencia de una parábola y un elipsoide conduce a la configuración estándar fuera del eje gregoriano, que tiene más tolerancia que una sola parábola.

40 Es conveniente una consideración cuidadosa del sistema de receptor afocal, particularmente cuando se espera que el objetivo esté a una distancia finita (decenas a cientos de metros), con el receptor optimizado para un frente de onda entrante plano. Si el objetivo está demasiado cerca, entonces estará desenfocado. Para acomodar un objetivo cercano (más cerca de, digamos, 500 m), se deben realizar ajustes de compensación de la separación axial entre los espejos del telescopio afocal, de manera análoga a la capacidad de alcance variable del transmisor establecida anteriormente.

45 La presencia de una ventana de placa paralela refringente delante del detector creará un desenfoque axial. Se puede esperar que dentro del conjunto del detector, la separación entre el detector y la ventana sea fija y, por lo tanto, la compensación se puede incluir en el diseño del detector. Para una ventana de ZnSe de un grosor de  $t$  milímetros, el desenfoque será de aproximadamente  $0,585xt$ . Esta distancia de desenfoque será mayor si se introduce una inclinación del detector para reducir la retroalimentación óptica.

50 La sensibilidad de un instrumento heterodino está determinada en última instancia por la calidad del fotomezclador (y su electrónica asociada) que se usa para detectar la señal heterodina. El límite fundamental de la sensibilidad de los sistemas de detección heterodinosa se alcanza cuando el ruido registrado por el fotomezclador está determinado únicamente por el ruido de disparo del oscilador local; Las fuentes de ruido asociadas con el detector y su conjunto amplificador deben reducirse por debajo de este nivel de ruido de disparo. Hasta ahora, los fotodiodos de telururo de cadmio y mercurio (MCT) refrigerados con nitrógeno líquido se han usado para la detección de heterodinosa. Algunos fabricantes (Fermionic, Kolmar, Judson y Hamamatsu) pueden ofrecer fotodiodos MCT de alta velocidad que están optimizados para la detección de heterodinosa, y Kolmar proporciona fotodiodos que operan hasta unos pocos cientos de megahertz de ancho de banda. Alternativamente se encuentran disponibles tecnologías para la detección de alta velocidad en el infrarrojo medio. Estos incluyen detectores de infrarrojos de pozo cuántico (QWIP), detectores de cascada cuántica (QCD) y fotodiodos de avalancha (APD).

65 Ahora se considerará el sistema electrónico. Para aplicaciones espectroscópicas, la estabilidad de frecuencia de la fuente láser es esencial para obtener la máxima sensibilidad y reproducibilidad. La longitud de onda de un QCL está determinada por su temperatura y la corriente que se le aplica. Por lo tanto, la temperatura y la corriente deben controlarse con un alto

grado de precisión. Un QCL de infrarrojo medio típico tiene velocidades de ajuste con respecto a la corriente y la temperatura de  $\sim 4 \text{ cm}^{-1}\text{A}^{-1}$  y  $\sim 0,05$  a  $0,1 \text{ cm}^{-1}\text{K}^{-1}$  respectivamente. Una estabilidad de frecuencia óptica de 1 MHz ( $0,00003 \text{ cm}^{-1}$ ) requiere una estabilidad de corriente del 0,001 % y una estabilidad de temperatura del 0,03 %. A 273 K y 1 A, esto corresponde a una estabilidad de  $10^{-5}$  A (10  $\mu\text{A}$ ) y 0,08 K (80 mK). Por lo tanto, se requiere una fuente de corriente de alta precisión y un controlador de temperatura para operar el QCL.

El láser se puede escanear en frecuencia rápidamente mediante el uso de la rampa de corriente o más lentamente usando el ajuste de temperatura. Para la detección de trazas de materiales para uso en tiempo real, es claramente preferible un ajuste rápido. Se requiere un generador de forma de onda para producir la forma correcta para una rampa de sintonización; la pendiente de la rampa estará determinada por las características de sintonización del láser, el intervalo espectral requerido y el tiempo de adquisición. Además de la rampa de sintonización, la modulación de la longitud de onda del láser se realizará aplicando una modulación de corriente sinusoidal a la corriente de inyección del láser. Las señales se visualizan mediante el uso de un osciloscopio digital rápido para optimizar tanto los ajustes ópticos como la sincronización.

El AOM está controlado por un sintetizador de RF, que puede ser de frecuencia fija o ajustable. Aunque una frecuencia fija debería ser suficiente para generar el desplazamiento de frecuencia, una frecuencia variable puede ofrecer más flexibilidad y características de modulación adicionales: por ejemplo, modulación de longitud de onda inmune a la modulación de potencia y modulación de alta frecuencia.

El control mecánico se proporciona por motores paso a paso y actuadores piezoeléctricos interconectados con un ordenador.

La adquisición de señales del detector se realizará mediante el uso de una tarjeta multifunción NI DAQ-Card, equipada con entradas y salidas analógicas y digitales. Se usa un amplificador de bloqueo para la demodulación de amplitud y/o longitud de onda.

De particular importancia es la señal del fotomezclador, y la naturaleza de la línea de procesamiento dependerá del tipo de fotomezclador usado. En general, la parte final del fotomezclador incorporará los siguientes elementos:

- Una T de polarización para que el fotomezclador pueda polarizarse en sentido inverso para ampliar el ancho de banda.
- Un divisor de CA/CC para que la corriente CC se pueda controlar mientras el componente de CA se dirige a la etapa de amplificación.
- Amplificadores para la señal heterodina. Se informa que los amplificadores de transimpedancia bien combinados ofrecen el mejor rendimiento. Podría ser necesaria una segunda etapa de amplificación de tensión para llevar la ganancia de 50 a 60 dB. Después de la amplificación, la señal heterodina se puede analizar para determinar la fase y la amplitud.
- Para un nivel bajo de señales, cuando se usan las capacidades de exploración de frecuencia del LO, se requiere un filtro de paso de banda fijo (que define la resolución del instrumento) seguido de un detector de RF Schottky en la salida de la cadena de amplificación. La señal de RF es demodulada por el amplificador de bloqueo.

Puede usarse un procesamiento adicional de la señal para reducir el ruido de partículas, la corrección de la línea base, la calibración espectral, etc.

En un enfoque preferido, se usa el método de estimación óptima (OEM). Pueden usarse algoritmos disponibles públicamente para adoptar este enfoque de recuperación de información de estado de datos ruidosos. El OEM se describe en detalle en "Inverse Methods for Atmosphere Sounding Theory and Practice, Series on Atmospheric, Oceanic and Planetary Physics - Vol. 2", Clive D. Rodgers, World Scientific, 2000. El enfoque teórico básico es el que se establece más abajo:

Los parámetros a ajustar se concatenan en un vector  $X$  llamado vector de estado, de dimensión  $n$ . Los datos experimentales hacen un vector  $y$  llamado vector de medida, de dimensión  $m$ .

La primera etapa consiste en construir el modelo directo, que contiene toda la física conocida sobre el problema. El modelo directo relaciona el vector de estado  $X$ , al vector de medición  $y$ , de acuerdo con:

$$\vec{y} = F(\vec{x}) + \vec{\epsilon}$$

Ecuación 16

donde la función  $F$  representa el modelo directo, y  $\epsilon$  es el vector de error que explica el desajuste entre los resultados del modelo y las mediciones. El problema de recuperación consiste en invertir el problema y resolver  $X$ , sabiendo  $y$ .

Como se indicó anteriormente, el modelo directo contiene la física de todo el proceso, incluida la iluminación, la dispersión y la detección. Esta física se ha expuesto anteriormente en esta descripción de modalidades específicas. Al desarrollar el modelo directo, primero se determina la potencia de retrodispersión que estará disponible dentro del campo de visión de la abertura de recolección del instrumento; esto será independiente del escenario de detección. Esto proporciona una

entrada a la siguiente etapa que depende de las propiedades del receptor, y la señal heterodina se modela a partir de estas propiedades del receptor. Las fuentes de ruido también pueden modelarse para proporcionar una determinación cuantitativa de cómo afecta el ruido al sistema. Las salidas del modelo directo comprenden una señal heterodina modelada con ruido.

Para restringir aún más el problema inverso, es necesario un conjunto de datos a priori sobre los parámetros a ajustar. Estos incluirán todo el conocimiento a priori que tenemos sobre los parámetros que se están recuperando. Los datos a priori forman el vector a priori  $X_a$ , y la incertidumbre sobre los datos a priori se incorporan en la matriz de covarianza a priori  $s_a$ . Además, la imperfección de las mediciones se toma en cuenta a través de la matriz de covarianza de medición  $s_\epsilon$ .

Si asumimos que la complejidad de la medición es tal como se aplica el teorema del límite central, las estadísticas de error serán gaussianas, y en este caso el problema seguirá los teoremas de la información bayesiana, e invertir el problema se convierte en la minimización de una función de costo  $\chi^2$  definida como:

$$\chi^2 = [\vec{y} - F(\vec{x}_n)] \cdot S_\epsilon^{-1} \cdot [\vec{y} - F(\vec{x}_n)]^T + [\vec{x}_a - \vec{x}_n] \cdot S_a^{-1} \cdot [\vec{x}_a - \vec{x}_n]^T .$$

Ecuación 17

Cuando  $\chi^2$  se minimiza,  $X_n$  es el mejor estimador de  $X$ .

Para un problema de inversión moderadamente no lineal, una linealización local de la ecuación 16 se convierte en:

$$\vec{y} = \mathbf{K} \cdot \vec{x} + \vec{\epsilon} , \quad (B3)$$

dónde  $\mathbf{K}$  es la matriz jacobiana también llamada conjunto de funciones de ponderación. El enfoque iterativo de Levenberg-Marquard se usa para converger hacia la mejor estimación  $X_n$ , minimizando  $\chi^2$  de acuerdo con el siguiente algoritmo que relaciona el vector de estado para la iteración  $i+1$  al de la iteración  $i$ :

$$\vec{x}_{i+1} = \vec{x}_i + [(1 - \lambda)S_a^{-1} + \mathbf{K}_i^T \cdot S_\epsilon^{-1} \cdot \mathbf{K}_i]^{-1} \cdot [\mathbf{K}_i^T \cdot S_\epsilon^{-1} \cdot (\vec{y}_i - F(\vec{x}_i)) + S_a^{-1} \cdot (\vec{x}_a - \vec{x}_i)]$$

Ecuación 18

$\lambda$  es el parámetro de amortiguación de Levenberg-Marquard y se establece para ofrecer un buen equilibrio entre la velocidad de convergencia y la precisión de la estimación.

Un sistema completo se muestra esquemáticamente en la Figura 9. En el esquema, se ha usado una óptica fuera del eje de 90 grados por conveniencia. En un instrumento real, se podrían usar ópticas de 30 grados para relajar las tolerancias de alineación y reducir la huella global del instrumento. El instrumento se puede hacer más compacto disminuyendo la separación de los soportes ópticos donde el haz esté colimado. Sigue habiendo limitaciones físicas sobre los elementos de enfoque. También se puede ganar espacio separando los haces que emergen de la AOM en un punto más cercano a la salida de la AOM mediante el uso de ópticas de diseño personalizado (por ejemplo, espejos en forma de D). El instrumento se puede dividir ventajosamente en dos plataformas: el piso inferior que contiene la óptica de transmisión/recepción, mientras que el piso superior contiene el resto del instrumento. Los límites finales de tamaño son las distancias focales efectivas de los espejos de la sección del transmisor/receptor. El uso de ópticas fuera del eje de 30° permite el uso de distancias focales más largas en un diseño compacto.

En la Figura 11 se muestra un diseño óptico alternativo. En esta disposición, el cambio de frecuencia se aplica a la luz para iluminar el objetivo, en lugar de al oscilador local. Esto permite que la radiación del oscilador local se dirija directamente desde el primer divisor de haz al fotomezclador, y que la salida de orden cero del modulador acústico-óptico sea usada para la calibración. Dado que la señal del oscilador local es una fuente principal de ruido, esto puede mejorar el rendimiento general del instrumento, ya que se introduce menos ruido en la trayectoria del oscilador local. La salida de primer orden del modulador acústico-óptico es usada luego para la transmisión al objetivo.

El enfoque establecido en la Figura 11 es particularmente adecuado para usar un enfoque para reducir los artefactos por partículas del láser que se enseña en la Solicitud de Patente del Reino Unido en trámite del solicitante núm. 1221677.6 titulado "Method and Apparatus for Reducing Speckle Noise in an Optical System" y presentado originalmente el 30 de noviembre de 2012. En este enfoque, un componente óptico se difumina para variar la posición de iluminación del objetivo; en la disposición que se muestra en la Figura 11, cualquiera de los componentes ópticos entre el AOM y el objetivo (M2, M3, OAPM5 o OAPM6) se puede difuminar de esta manera. Este enfoque también puede usarse en otras disposiciones descritas, con la mayor generalidad, por ejemplo, mediante el espejo de difuminado 9 que se muestra en la Figura 1.

5 Los resultados experimentales se muestran en las Figuras 13 y 14. Las Figuras 13a y 13b muestran los resultados de la detección remota de gas en una celda de gas que contiene una concentración conocida de gas ubicada entre el sistema y un objetivo. Las Figuras 14a y 14b muestran resultados habiendo retirado la celda de gas y proporcionan la detección de gas atmosférico. Todas las medidas se tomaron mediante el uso de un pulsador mecánico con un tiempo de integración de 100 ms para integrar la señal y un ancho de banda heterodino de doble cara de 1,6 MHz. Una rampa de diente de sierra de 200 mA que produce un barrido de frecuencia de  $1,8 \text{ cm}^{-1}$  a una frecuencia de 0,01 Hz se aplicó a la corriente del láser. La potencia del oscilador local se mantuvo en el nivel óptimo durante toda la exploración mediante el uso del sistema de estabilización de potencia activa descrito anteriormente. Se usó un blanco de aluminio rugoso a una distancia de 5,5 m.

10 La celda metálica de gas se llenó con una mezcla de primero:  $\text{N}_2\text{O}$  y luego  $\text{CH}_4$  en 1 atmósfera de gas nitrógeno seco. La concentración nominal fue  $1000 \pm 2,5$  ppm. Los espectros de absorción se obtienen para el  $\text{N}_2\text{O}$  (Figura 13a) y  $\text{CH}_4$  (Figura 13b). En las regiones de los espectros seleccionadas, no hay características de absorción de agua significativas. Los paneles superiores muestran los espectros experimentales (puntos) y los espectros ajustados mediante el uso del algoritmo OEM (línea continua). Los paneles inferiores muestran el residuo entre los espectros experimental y ajustado.

15 Ambos el  $\text{N}_2\text{O}$  y el  $\text{CH}_4$  existen naturalmente en la atmósfera con concentraciones típicas de 0,32 ppm ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y 1,8 ppm ( $\text{CH}_4$ ) respectivamente. Aunque estas concentraciones son considerablemente más bajas que las usadas en la celda, la longitud de la trayectoria larga (12,94 m) permite observar la abundancia natural cuando se extrae la celda. La longitud de la trayectoria incluye la distancia hacia y desde el objetivo y la distancia que recorren los haces transmitidos y retrodispersados en el instrumento. Además, la humedad relativa de la atmósfera en el laboratorio indica una concentración de agua de  $\sim 10^4$  ppm. El intervalo de ajuste de QCL se eligió específicamente para evitar líneas fuertes de absorción de agua, pero hay una serie de características de absorción más débiles que son accesibles debido a la alta concentración de agua.

20 Las Figuras 14a y 14b muestran los espectros de absorción atmosférica en dos regiones espectrales que incluyen agua atmosférica,  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$ . Las concentraciones ajustadas fueron 3299 ppm ( $\text{H}_2\text{O}$ ), 0,188 ppm ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y 1,44/1,47 ppm ( $\text{CH}_4$ ). Las concentraciones mínimas detectables fueron 1823 ppm.m ( $\text{H}_2\text{O}$ ), 379 ppb.m ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y 2,5/1,1 ppm.m ( $\text{CH}_4$ ). Estos números dependen de las secciones transversales de absorción particulares de las líneas correspondientes. Los paneles superiores muestran los espectros experimentales (puntos) y los espectros ajustados mediante el uso del algoritmo OEM (línea continua). Los paneles inferiores muestran el residuo entre los espectros experimental y ajustado.

25 La persona experta en la técnica apreciará que la disposición establecida anteriormente es ilustrativa, y las opciones de diseño alternativas pueden realizarse sin caer fuera del alcance de la invención como se reivindicó.

**REIVINDICACIONES**

1. Un sistema de detección activa de heterodinos que comprende:  
 5 una fuente de láser continuamente sintonizable (1) configurada para emitir radiación infrarroja;  
 un detector (3) adaptado para la detección de heterodinos en un intervalo espectral continuo;  
 medios configurados para dividir la radiación infrarroja en una primera parte y una segunda parte;  
 medios (4) configurados para proporcionar un desplazamiento de frecuencia entre la primera parte y la segunda  
 10 parte;  
 en donde el medio de desplazamiento de frecuencia (4) es un modulador acústico-óptico, y en donde el  
 desplazamiento de frecuencia se aplica a la primera parte de la radiación infrarroja; medios configurados para  
 dirigir un modo de primer orden del modulador acústico-óptico al objetivo;  
 en donde la segunda parte de la radiación infrarroja se proporciona como un oscilador local;  
 medios configurados para recoger un componente dispersado de la primera parte de la radiación infrarroja  
 15 desplazada en frecuencia desde el objetivo; y  
 medios configurados para mezclar el componente dispersado y el oscilador local y encaminar la señal mixta al  
 detector (3).
2. Un sistema de detección como se reivindicó en la reivindicación 1, en donde la fuente de láser (1) es un láser de  
 20 cascada cuántica.
3. Un sistema de detección como se reivindicó en cualquier reivindicación anterior, en donde la fuente de láser (1) se  
 proporciona en una configuración de cavidad externa con una rejilla de difracción para la selección y sintonización  
 de la longitud de onda.
- 25 4. Un sistema de detección como se reivindicó en la reivindicación 1, que comprende además medios (24)  
 configurados para monitorizar la fuente láser mediante el uso de un modo de orden cero del modulador acústico-  
 óptico.
5. Un sistema de detección como se reivindicó en cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, que comprende además  
 30 medios (33, 34) configurados para controlar un polarizador para que actúe como atenuador entre la fuente láser  
 (1) y el modulador acústico-óptico mediante la monitorización de la potencia de la fuente láser.
6. Un sistema de detección como se reivindicó en cualquier reivindicación anterior, en donde la fuente de láser (1)  
 comprende además un soporte para montar la fuente de láser (1) en una placa fría (203) enfriada por un enfriador  
 35 Peltier (201) que está suspendido de la placa fría (203).
7. Un sistema de detección como se reivindicó en la reivindicación 6, en donde el soporte comprende una o más  
 abrazaderas de fibra de vidrio (204).
- 40 8. Un sistema de detección como se reivindicó en la reivindicación 7, en donde se proporcionan una pluralidad de  
 elementos cerámicos (205) en una o más abrazaderas de fibra de vidrio (204) para proporcionar una pluralidad de  
 contactos puntuales para sujetar la fuente láser (1) en la placa fría (203).
9. Un sistema de detección como se reivindicó en cualquier reivindicación anterior, en donde los medios para dirigir,  
 45 recoger y mezclar comprenden un sistema óptico reflectante.
10. Un sistema de detección como se reivindicó en la reivindicación 9, en donde el sistema óptico reflectante  
 comprende uno o más divisores de haz.
- 50 11. Un método de detección activa de heterodinos que comprende:  
 sintonizar una fuente de láser (1) para que emita radiación infrarroja para escanear un intervalo espectral continuo;  
 dividir la radiación infrarroja en una primera parte y una segunda parte;  
 proporcionar, mediante un modulador acústico-óptico, un desplazamiento de frecuencia entre la primera parte y la  
 55 segunda parte;  
 aplicar el cambio de frecuencia a la primera parte y dirigir un modo de primer orden del modulador acústico-óptico  
 al objetivo;  
 proporcionar la segunda parte de la radiación infrarroja como un oscilador local;  
 recoger un componente dispersado de la primera parte de la radiación infrarroja desplazada en frecuencia del  
 60 objetivo; y  
 mezclar el componente disperso y el oscilador local y encaminar la señal mixta a un detector (3) para la detección  
 de heterodinos;  
 procesar una señal detectada para proporcionar una salida en un intervalo espectral continuo.
- 65 12. Un método como se reivindicó en la reivindicación 11, en donde la sintonización de la fuente de láser (1) comprende  
 proporcionar una forma de onda de diente de sierra para modular una corriente de inyección de la fuente de láser  
 (1).

13. Un método como se reivindicó en la reivindicación 11 o la reivindicación 12, en donde la etapa de procesamiento comprende el uso de un método de estimación óptimo para proporcionar la salida.

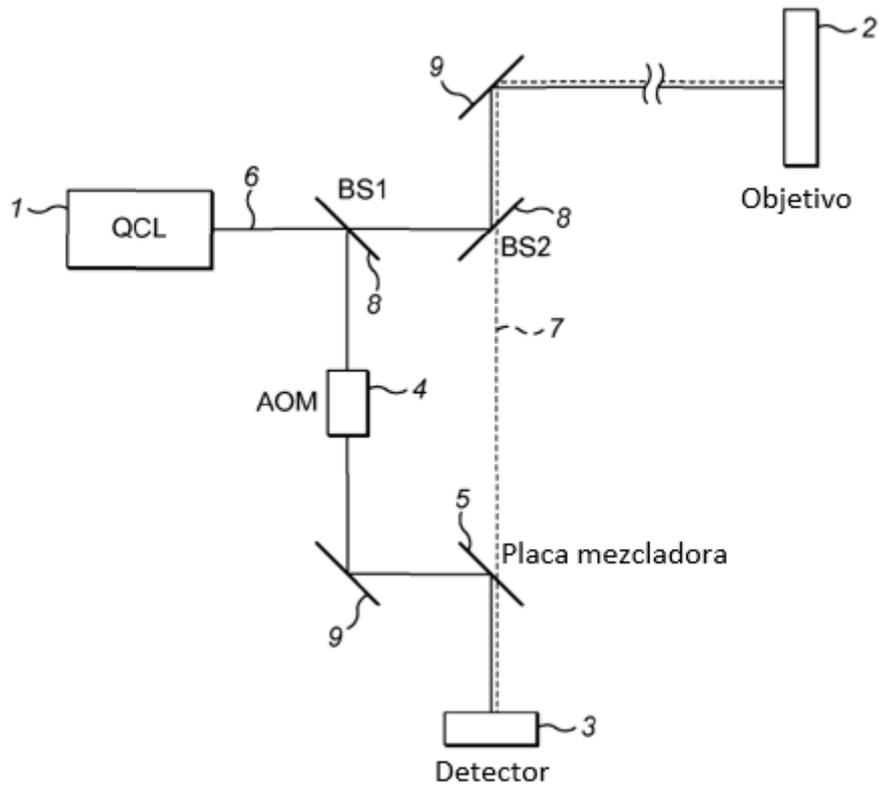


Figura 1

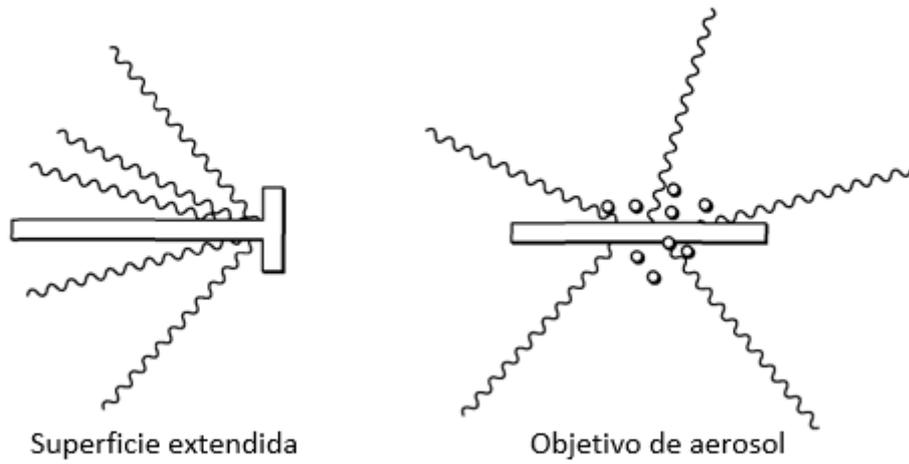


Figura 2(a)

Figura 2(b)

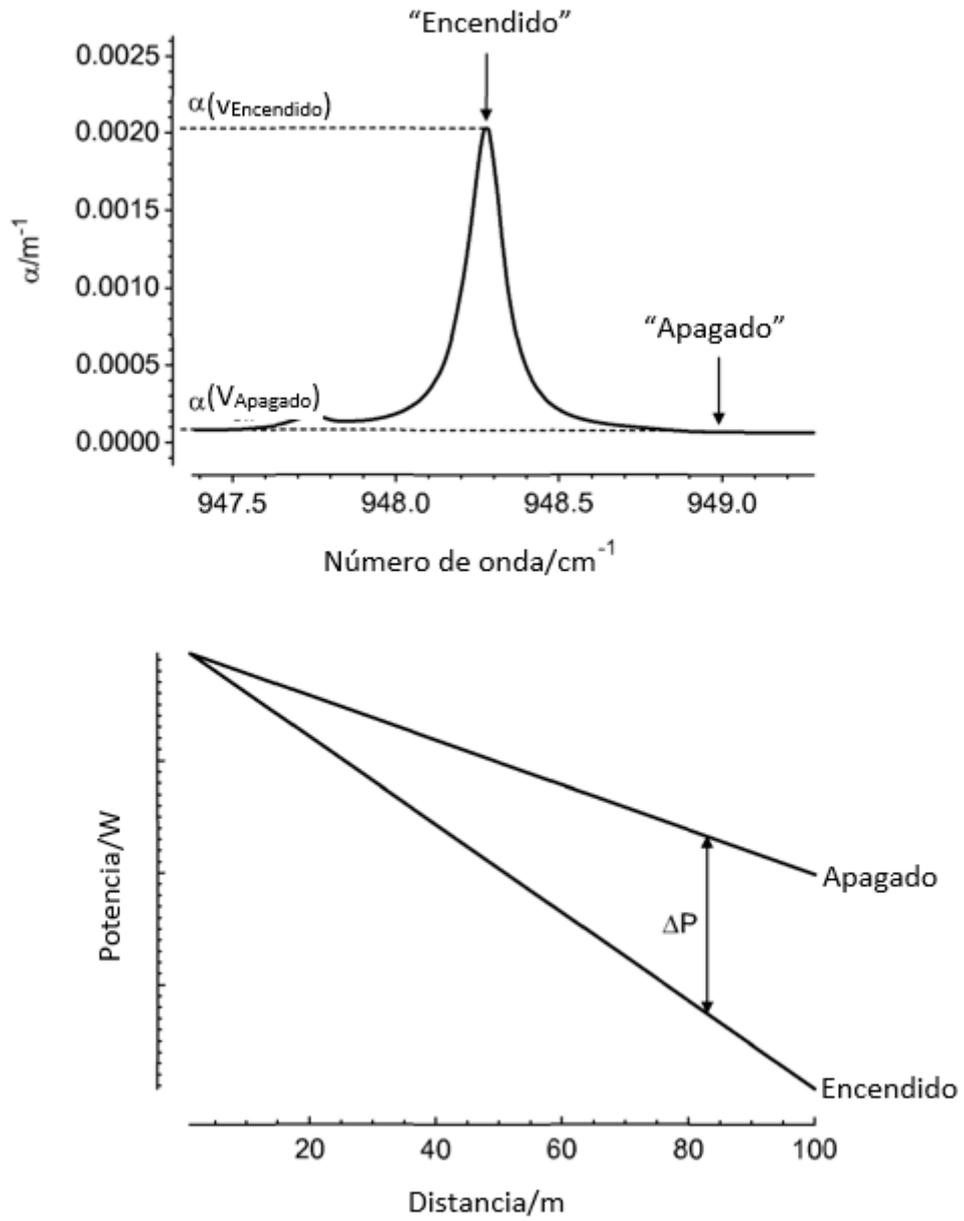


Figura 3

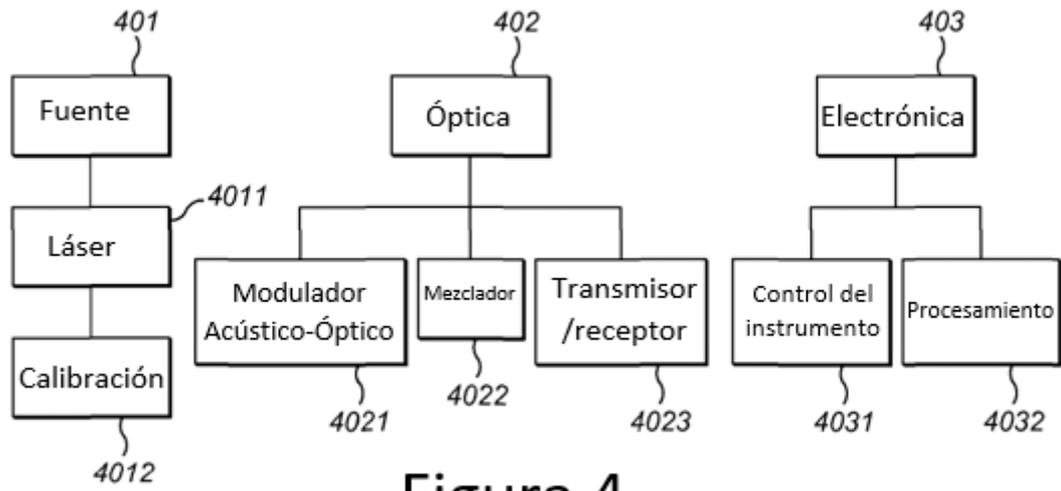


Figura 4

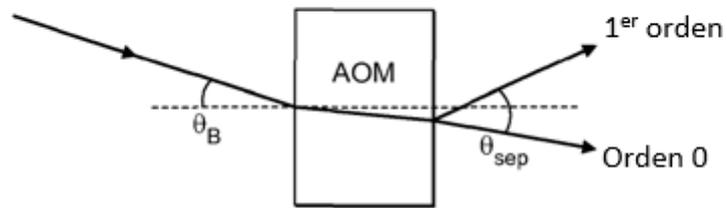
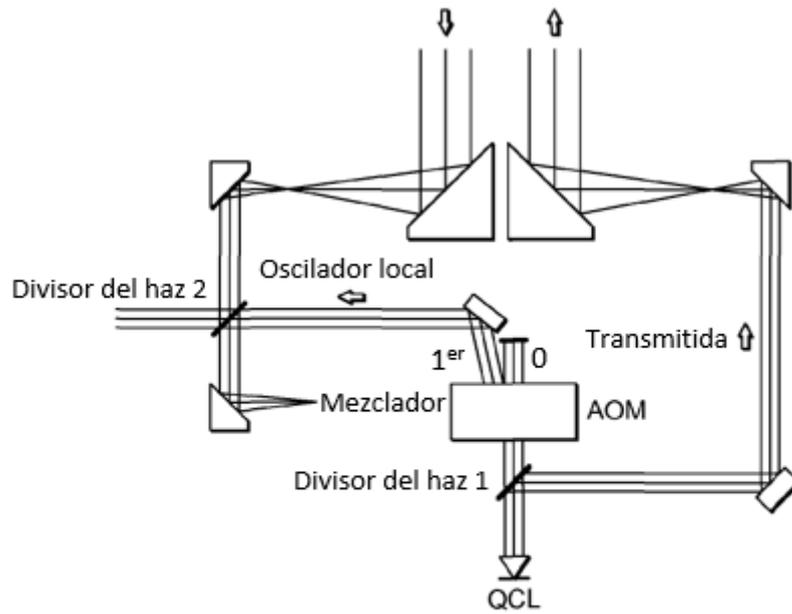
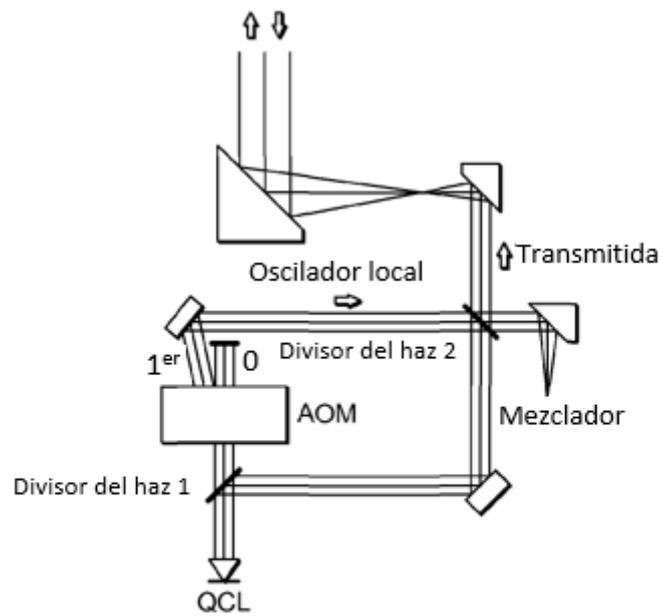


Figura 5



Biestático

Figura 6(a)



Monoestático

Figura 6(b)

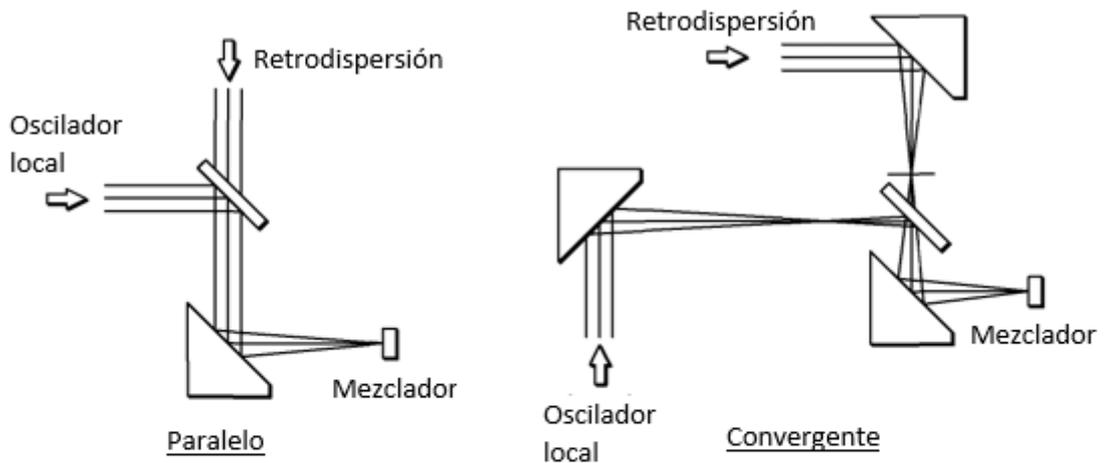


Figura 7(a)

Figura 7(b)

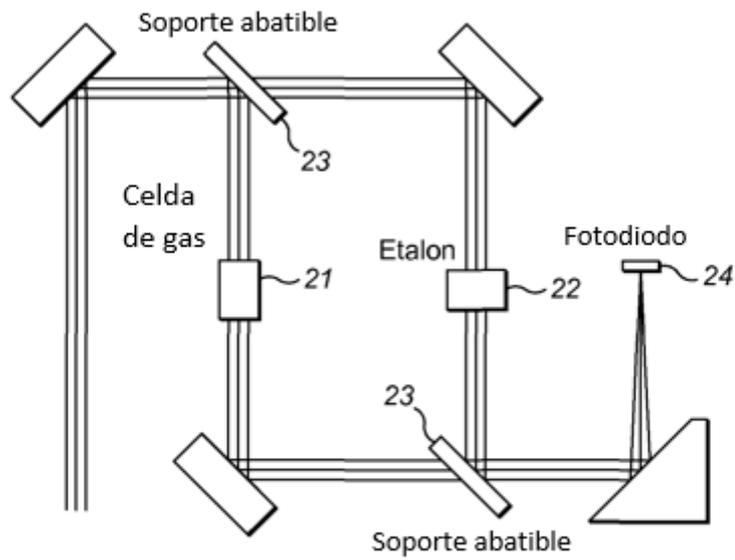


Figura 8

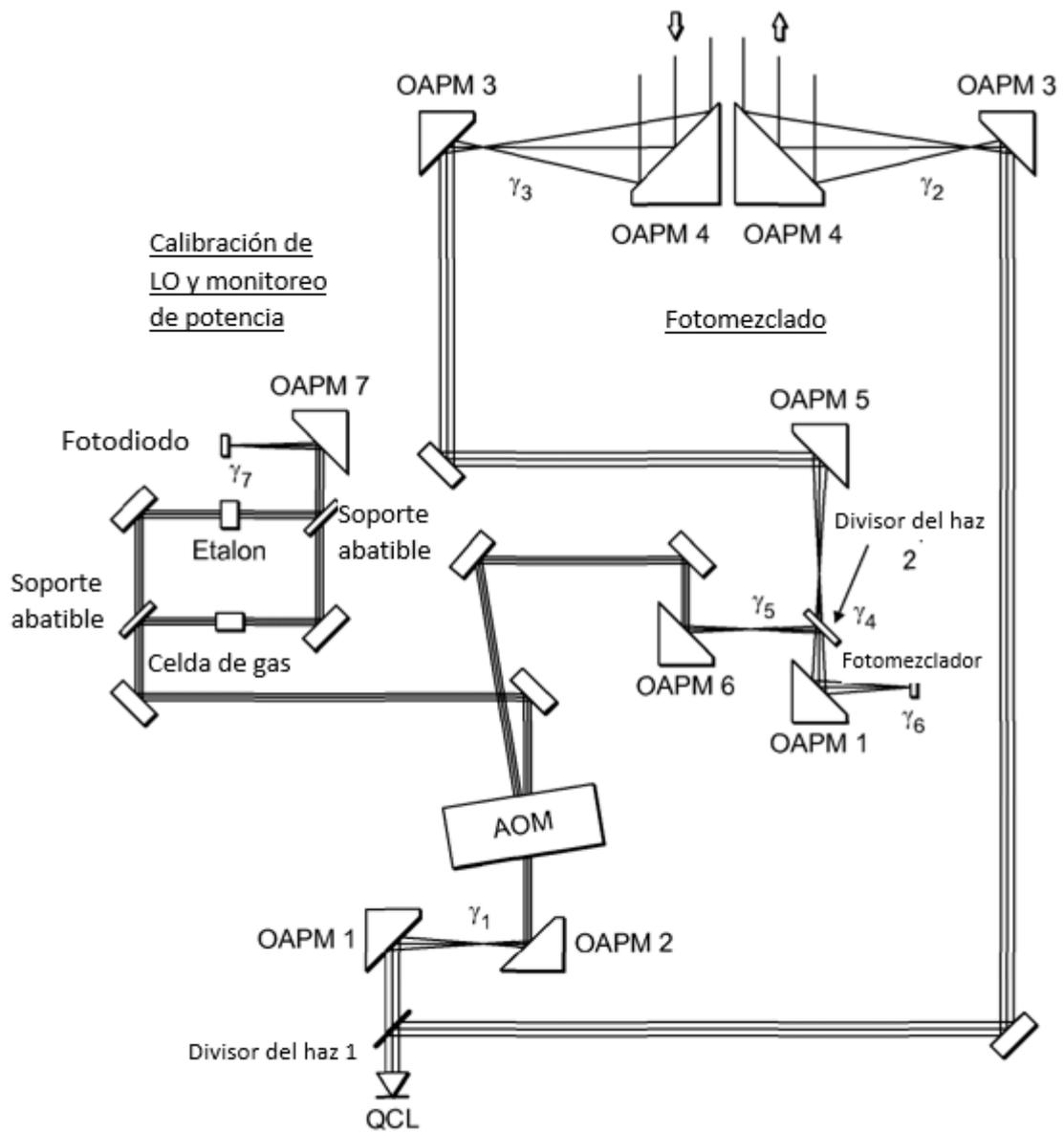


Figura 9

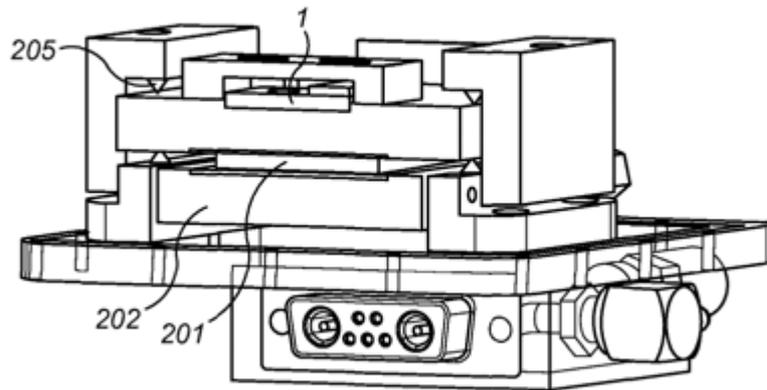
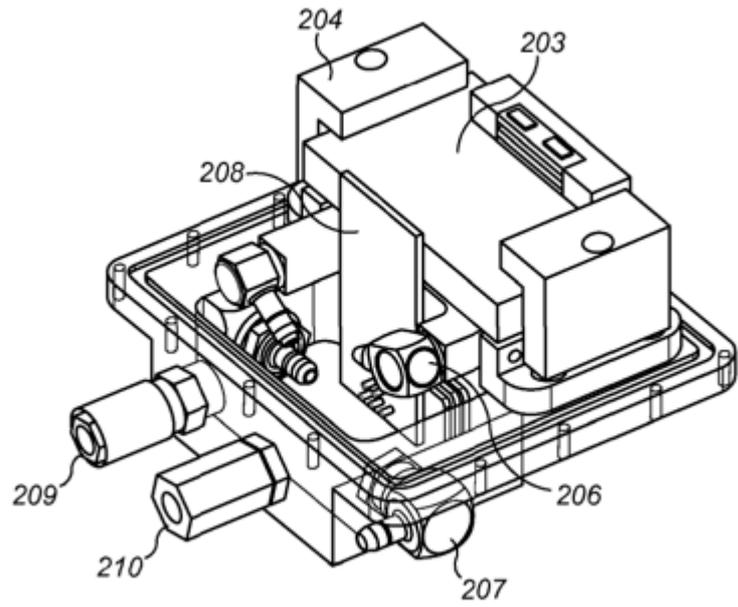


Figura 10

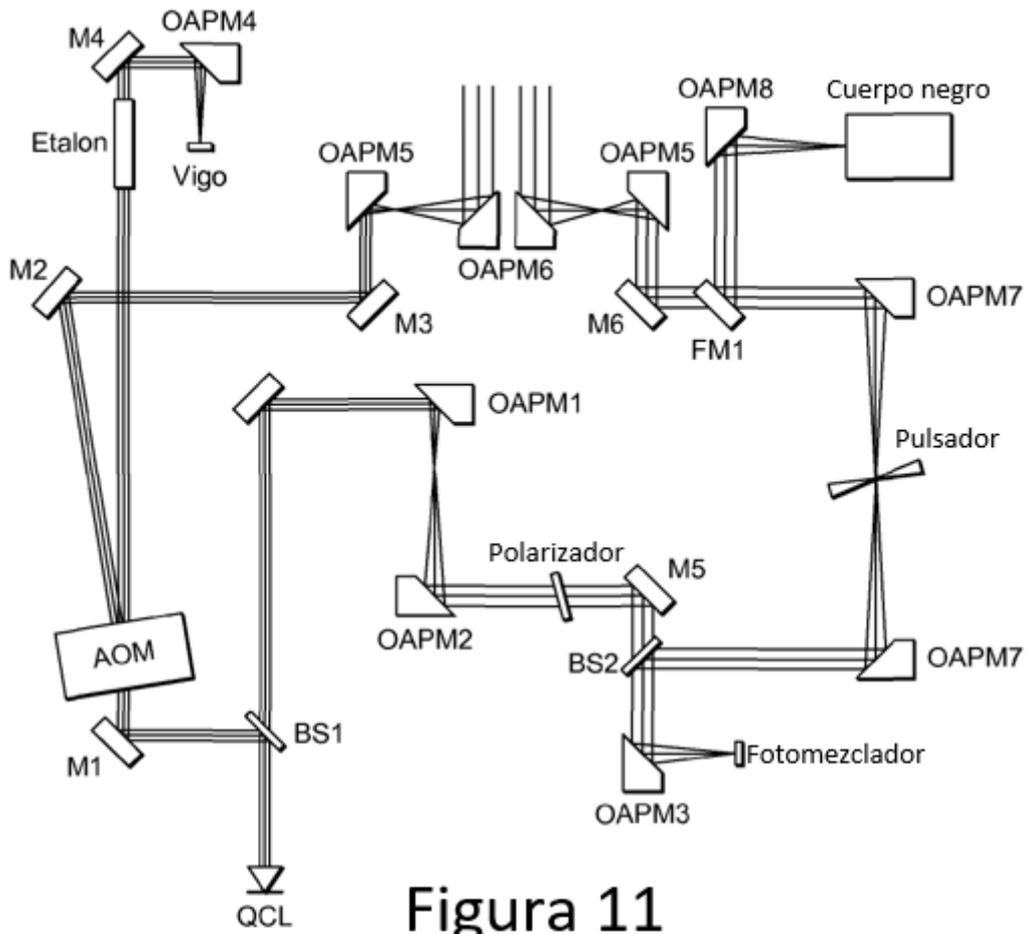


Figura 11

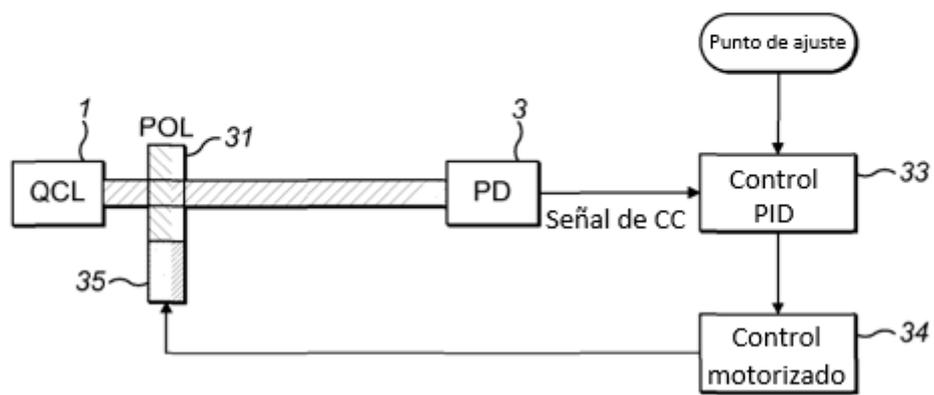


Figura 12

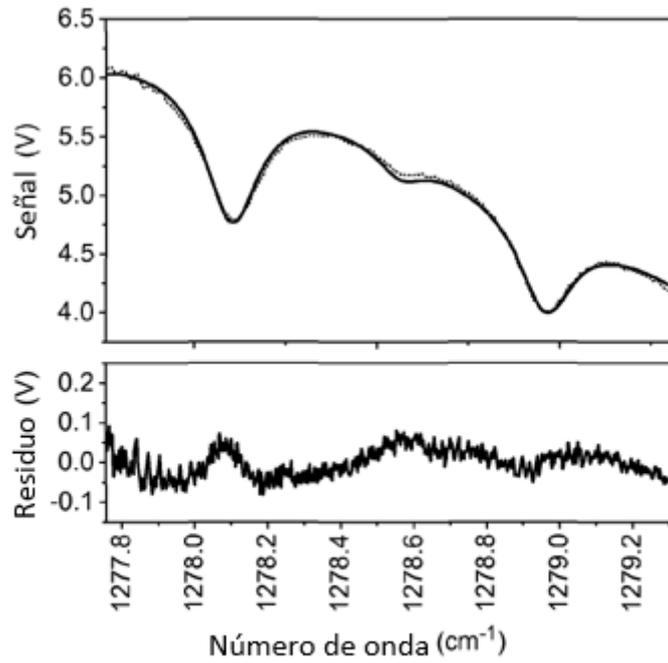


Figura 13(a)

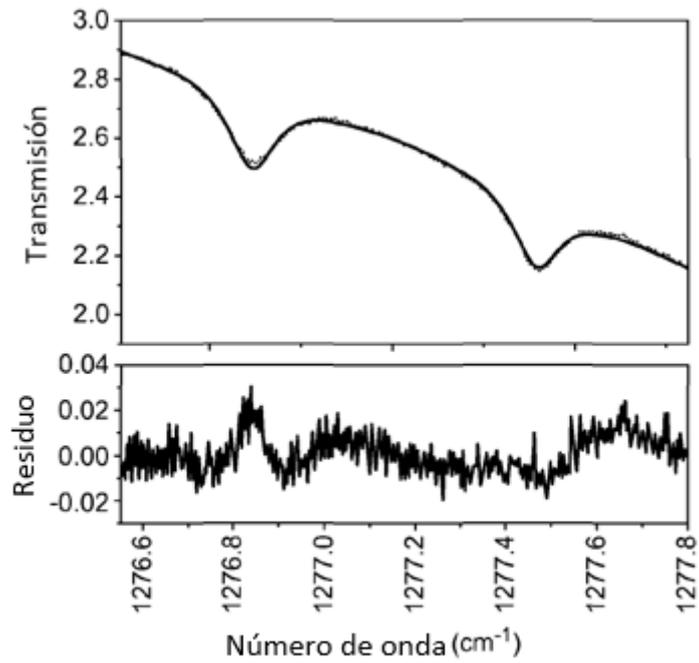


Figura 13(b)

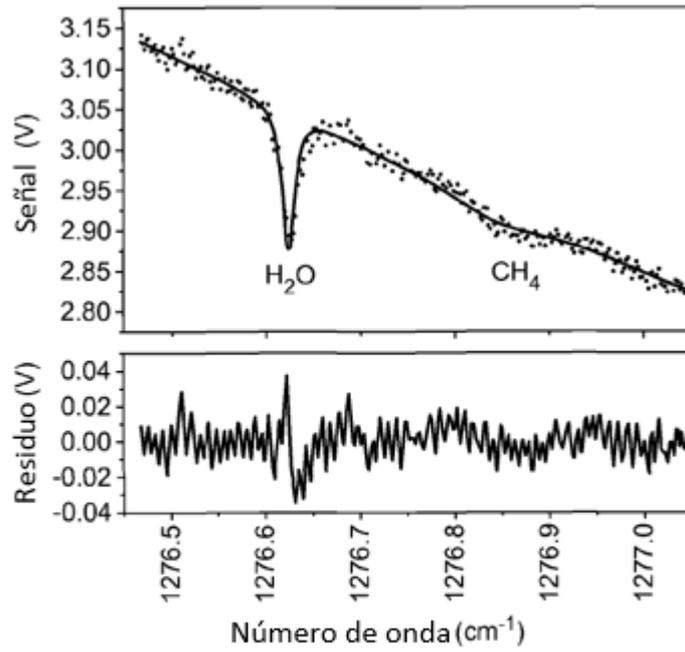


Figura 14(a)

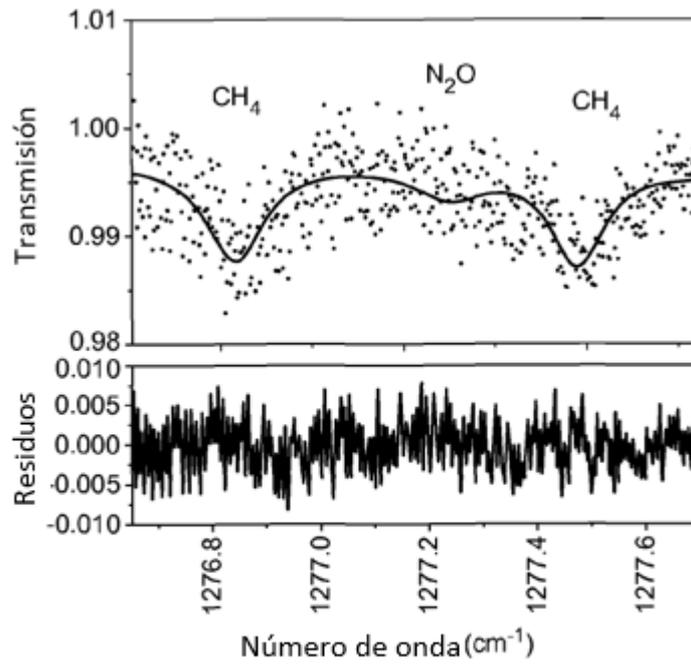


Figura 14(b)