

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 611 192**

51 Int. Cl.:

**G01N 21/63** (2006.01)

**G01N 21/39** (2006.01)

**G01N 33/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **08.06.2012 PCT/FI2012/050579**

87 Fecha y número de publicación internacional: **12.12.2013 WO13182735**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **08.06.2012 E 12740622 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.08.2016 EP 2859327**

54 Título: **Medición de compuesto gaseoso utilizando espectroscopía**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**05.05.2017**

73 Titular/es:

**VALMET TECHNOLOGIES OY (100.0%)  
Keilasatama 5  
02150 Espoo, FI**

72 Inventor/es:

**SORVAJÄRVI, TAPIO;  
TOIVONEN, JUHA;  
ROPPO, JUHA;  
SILVENNOINEN, JAANI y  
ENESTAM, SONJA**

74 Agente/Representante:

**DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto**

ES 2 611 192 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

Medición de compuesto gaseoso utilizando espectroscopía

5 Campo de la Invención

La invención se refiere a un método para medir el contenido de un compuesto gaseoso de una mezcla gaseosa utilizando espectroscopía óptica. La invención se refiere a un método, en donde en la mezcla gaseosa y el compuesto gaseoso son el resultado de un proceso térmico. El proceso térmico puede ser, por ejemplo, uno de combustión, pirólisis, torrefacción y gasificación. La invención también se refiere a un dispositivo dispuesto para medir el contenido del compuesto gaseoso de la mezcla gaseosa utilizando espectroscopía óptica, en donde el compuesto gaseoso puede ser el resultado de un proceso térmico.

15 Antecedentes de la Invención

Aspectos ambientales y el aumento del precio de los combustibles fósiles han aumentado el interés en combustibles renovables en la producción de energía. Una alternativa, como combustible neutro en gran medida de CO<sub>2</sub>, es la biomasa. La biomasa puede, por ejemplo, cosecharse como residuos de la industria forestal. Además, la biomasa puede comprender al menos un desecho agrícola, turba, tocones, ramas y madera de desecho tal como corteza, escombros de construcciones de madera y residuos de productos de madera. La biomasa puede utilizarse en un proceso térmico. Por ejemplo, la biomasa puede quemarse para producir energía. Alternativamente, la biomasa puede gasificarse para producir gases de síntesis, que pueden procesarse adicionalmente para obtener biocombustible. Además, la biomasa puede tratarse en un proceso de pirólisis para producir gas de pirólisis, que puede condensarse para obtener aceite de pirólisis. Además, la biomasa puede tratarse en un proceso de torrefacción para producir biocoque, que puede utilizarse además en procesos de combustión y/o gasificación. Estos procesos térmicos producen una mezcla de varios gases, por ejemplo, gas de escape, gas de síntesis, gas de pirólisis o gas de torrefacción. El contenido de un compuesto gaseoso específico en los gases es a menudo de interés debido a distintas razones. Por ejemplo, los gases de escape, como resultado de la combustión de biomasa, causan problemas de corrosión y descorticación en calderas de combustión. Una causa de los problemas son los vapores de hidróxido alcalino que se forman durante la combustión. Para cuantificar el problema de la corrosión, el contenido de hidróxido de los gases de escape debe ser medido. Además de los hidróxidos, cloruros de metal tales como PbCl<sub>2</sub>, carbonatos de metal tales como K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> y sulfatos de metal tales como K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pueden provocar problemas similares.

En general, puede utilizarse espectroscopía óptica para medir el contenido de gases dañinos de los gases. Los métodos incluyen espectroscopía de absorción, en donde se mide la atenuación de la luz. Dado que diferentes compuestos gaseosos absorben la luz de diferente manera, el espectro de atenuación puede usarse para deducir el contenido de diferentes compuestos gaseosos. La sensibilidad del método es relativamente baja y se encuentra en el rango de ppm (partes por millón, 10<sup>-6</sup>). Esto se debe en parte a la baja absorción de los gases y en parte a fluctuaciones en el gas de escape.

Los métodos ópticos incluyen también aquellos basados en Fluorescencia Inducida por Láser de Excímeros. En estos métodos, las moléculas de cloruro alcalino se disocian y el átomo alcalino liberado se excita usando un láser de excímeros. Dado que el átomo alcalino se relaja de su estado excitado, se emite un fotón. La longitud de onda del fotón corresponde a la especie alcalina y el contenido alcalino se mide a partir del espectro de emisión. En principio, la sensibilidad del método está en el rango de ppm (partes por mil millones, 10<sup>-9</sup>). Sin embargo, en un entorno de combustión, la dispersión de la luz, por ejemplo, de partículas de hollín, diluye la sensibilidad de los métodos.

A menudo, las mediciones espectroscópicas se realizan en un amplio rango del espectro. El documento JP 2009 276308 divulga un dispositivo que tiene una primera fuente de luz láser para generar una luz de bomba, una segunda fuente de luz láser para generar una luz de señal, y un generador de luz de frecuencia de diferencia para generar una luz de una frecuencia de diferencia entre una frecuencia de luz de bombeo y una frecuencia de luz de señal. Las longitudes de onda respectivas de la luz de bomba, luz de señal y la luz de frecuencia de diferencia se ajustan a las longitudes de onda de la absorción de luz que son altas en coeficiente de extinción molar. De esta forma, pueden usarse dos láseres para generar luz para al menos tres longitudes de onda. Además, en el documento JP 2006 300760 un láser de bomba y un láser de señal se acoplan para formar una tercera longitud de onda.

El documento WO 01/27593 divulga un método para medir la concentración de gases dañinos en los gases de escape a través de una planta productora de calor que comprende un espacio de combustión. Allí se usa luz ultravioleta para realizar mediciones de concentración in-situ de metales gaseosos y/o cloruros de metal. Las mediciones se basan en la absorción.

Penelope Monkhouse ha publicado en "Métodos espectroscópicos y espectrométricos en línea para la determinación de especies metálicas en procesos industriales", Progreso en ciencia de la energía y combustión, Elsevier Science Publishers, Ámsterdam, NL, vol. 37, no. 2, 10 de mayo de 2010 (2010-05-10), páginas 125-171, una reseña de varias técnicas espectroscópicas para métodos espectroscópicos y espectrométricos en línea para la determinación de especies metálicas en procesos industriales. Estas técnicas incluyen espectroscopía de absorción y emisión.

5 Grener et al han divulgado, en "Mediciones de la concentración de álcalis in situ en un quemador de carbón por lecho fluidizado presurizado mediante fluorescencia de fragmentación inducida por láser de excímeros", 19960101, vol. 26, no. 2, 1º de enero de 1996 (1996-01-01), páginas 3301-3307, un método, basado en fluorescencia de fragmentación inducida por láser, para medir la concentración de álcalis. En este método, partes fotodisociadas de moléculas, cuando se desexcitan, emiten luz por fluorescencia.

10 Además, el documento US 2008/0165363 divulga un espectrómetro capaz de fotólisis instantánea útil en el estudio de la química. Allí, un breve pulso instantáneo de radiación de luz se dirige a una muestra química en un compartimiento. Posteriormente se mide el cambio en la absorción. Luego, la información es enviada desde el dispositivo de adquisición de datos a la entrada de un microprocesador, tal como una computadora, para su almacenamiento y posterior manipulación.

#### 15 Compendio de la Invención

Se presenta un método de acuerdo con la reivindicación 1 para medir el contenido de un compuesto gaseoso en una mezcla gaseosa. El método es especialmente útil en casos en los que la mezcla gaseosa es un gas producto de un proceso térmico. Mediante el método puede alcanzarse una sensibilidad en el rango de ppm (10<sup>-9</sup>).

20 Una realización del método se divulga en la reivindicación 1.

En el método, el compuesto gaseoso consiste en moléculas de compuesto gaseoso y la molécula de compuesto gaseoso no es una molécula de haluro alcalino, en donde la molécula de haluro alcalino ha formado MH<sup>a</sup>, en donde M es un átomo de metal alcalino del grupo de Li, Na, K, Ru, Cs y Fr, y H<sup>a</sup> es un átomo de halógeno del grupo de F, Cl, Br, I y At.

25 Otras realizaciones del método se divulgan en los ejemplos 2 - 27.

Para la aplicación del método se divulga un dispositivo de acuerdo con la reivindicación 10 para medir el contenido de un compuesto gaseoso en una mezcla gaseosa.

30 Otras características de realizaciones del dispositivo se divulgan en los ejemplos 29 a 49.

35 El dispositivo puede estar compuesto por una caldera, tal como se divulga en el ejemplo 50. El dispositivo puede estar compuesto por un reactor de gasificación, tal como se divulga en el ejemplo 51. El dispositivo puede estar compuesto por un reactor de pirólisis, tal como se divulga en el ejemplo 52. El dispositivo puede estar compuesto por un reactor de torrefacción, tal como se divulga en el ejemplo 53.

#### 40 Descripción de los dibujos

Las Figuras 1a-1d muestran algunas trayectorias ópticas entre una entrada óptica y una salida óptica de un recipiente con mezcla gaseosa,

la Figura 2a muestra la disociación de una molécula de hidróxido de sodio en un átomo de sodio y una molécula de hidróxido usando un fotón de un pulso óptico,

la Figura 2b muestra la disociación de una molécula de hidróxido de sodio en un átomo de sodio y una molécula de hidróxido usando dos fotones de un pulso óptico,

45 la Figura 3a muestra la absorción normalizada de moléculas de hidróxido de sodio y cloruro de sodio en función de la longitud de onda,

la Figura 3b muestra el corte transversal de la absorción de átomo de sodio en función de la longitud de onda,

la Figura 4a muestra una señal de medición obtenible de un dispositivo de cualquiera de las Figuras 5a - 5c en la escala de tiempo de un segundo, en la escala de tiempo de diez milisegundos y en la escala de tiempo de cien microsegundos,

50 la Figura 4b muestra señales de medición reales obtenibles de un dispositivo de cualquiera de las Figuras 5a - 5c en una escala de tiempo de 10 microsegundos,

la Figura 4c muestra una señal de medición idealizada obtenible de un dispositivo de cualquiera de las Figuras 5a - 5c,

55 la Figura 5a muestra un dispositivo para medir el contenido de un compuesto gaseoso en una mezcla gaseosa,

la Figura 5b muestra otro dispositivo para medir el contenido de un compuesto gaseoso en una mezcla gaseosa,

60 la Figura 5c muestra otro dispositivo para medir el contenido de un compuesto gaseoso en una mezcla gaseosa,

la Figura 6a muestra la disociación de una molécula de cloruro de plomo en un átomo de plomo y dos átomos de cloro utilizando dos pulsos ópticos,

la Figura 6b muestra la intensidad de un haz de luz atenuado que tiene la longitud de onda  $\lambda_b$  y las intensidades de los dos pulsos de luz que tienen las longitudes de onda  $\lambda_{p1}$  y  $\lambda_{p2}$ .

la Figura 6c muestra un dispositivo para medir el contenido de un compuesto gaseoso en una mezcla gaseosa capaz de emitir dos pulsos ópticos disociativos, posiblemente en dos longitudes de onda,  
 la Figura 7a muestra la disociación de una molécula de cloruro de cromo en un átomo de cromo y tres átomos de cloro usando tres pulsos ópticos,  
 5 la Figura 7b muestra un dispositivo para medir el contenido de un compuesto gaseoso en una mezcla gaseosa capaz de emitir tres pulsos ópticos disociativos, posiblemente en tres longitudes de onda, y  
 la Figura 8 muestra una caldera y posibles ubicaciones para mediciones ópticas dentro de la caldera.

#### Descripción detallada de la Invención

10 Se presentan un método y un dispositivo para medir el contenido de un compuesto gaseoso en una mezcla gaseosa. La expresión mezcla gaseosa se refiere a una mezcla que comprende al menos un compuesto gaseoso. Típicamente, una mezcla gaseosa comprende varios compuestos gaseosos. Además, la mezcla gaseosa puede comprender compuestos sólidos y líquidos, tales como partículas o gotitas. La expresión compuesto gaseoso se refiere a una sustancia que está en su forma gaseosa en la temperatura y presión de medición.

15 La mezcla gaseosa puede ser, por ejemplo, el resultado de un proceso térmico. El proceso térmico puede ser, por ejemplo, uno de combustión, pirólisis, torrefacción y gasificación. En particular, la temperatura de la mezcla gaseosa puede ser relativamente alta, por ejemplo, de 300°C a 1300°C. Sin embargo, el método es aplicable también a temperatura ambiente y temperaturas menores. Por ejemplo, la mezcla gaseosa puede tener una temperatura mayor que -50°C. El o los compuestos gaseosos de la mezcla gaseosa se encuentran en su estado gaseoso en la temperatura y la presión. Otros compuestos pueden estar en estado líquido o sólido, como se describió anteriormente. El contenido del compuesto gaseoso de la mezcla gaseosa puede medirse con el método que se divulgará, por ejemplo, utilizando un dispositivo que se divulgará.

25 La medición se basa en espectroscopía de absorción. En el método se genera un haz de luz, el cual es guiado a través de la mezcla gaseosa que ha de medirse, a lo largo de una trayectoria óptica, con lo cual una parte de la luz es absorbida y dispersada por la mezcla gaseosa y se mide la intensidad del haz de luz que ha pasado a través de la mezcla gaseosa. Otros pasos del método se describirán más detalladamente más adelante. En referencia a las Figuras 1a-1d, la mezcla gaseosa puede ubicarse en un espacio 110. El espacio 110 puede estar limitado por las paredes 102 (por ejemplo, las paredes 102a1, 102a2, 102b1, 102b2, 102c, 102d1, 102d2). El espacio 110 no está necesariamente limitado por paredes. En este caso, el contenido del compuesto gaseoso del ambiente puede medirse. Más aun, el dispositivo puede estar instalado en el ambiente y puede utilizarse como tal. Sin embargo, a menudo la mezcla gaseosa se encuentra en un canal o recipiente limitado por al menos una pared (por ejemplo, un tubo).

35 El término "pared" se utiliza solamente para describir un elemento que separa el espacio 110 del exterior. Al menos una pared 102 comprende al menos una entrada óptica 130, tal como una ventana 140 o un agujero 132, para mediciones ópticas. En la Figura 1a, una ventana 140 es transparente de forma que la luz pueda propagarse a través de la ventana. Preferiblemente, la luz del haz de luz de medición 170 (170a, 170b, 170c) no se atenúa significativamente mientras pasa a través de la ventana. La longitud de onda del haz de luz 170 se definirá con más detalles más adelante. Una pared 102 puede comprender al menos una salida óptica 135, tal como una ventana 140 o un agujero 132. En la Figura 1a, la ventana 140a1 también se marca con el número de referencia 130 para la entrada óptica. En la Figura 1a, la ventana 140a2 también se marca con el número de referencia 135 para la salida óptica. En el caso de que se utilice un agujero 132 (Figura 1 d; 132d1, 132d2) como entrada óptica, puede hacerse pasar aire u otro gas a través del agujero 132 y hacia el espacio 110 con el fin de retener la mezcla gaseosa en el espacio 110. En el método o con el dispositivo, un haz de luz 170 (170a, 170b, 170c, 170d) es generado y guiado a través de la entrada óptica al espacio 110. También puede generarse una trayectoria óptica sin ninguna pared, en cuyo caso no se necesita una entrada óptica ni una salida óptica.

50 En referencia a las Figuras 1a-1d, entre una entrada óptica 130 y una salida óptica 135, en el espacio 110, se forma una primera trayectoria óptica 160. Cuando el haz de luz 170 ingresa en la entrada óptica 130, el haz de luz viaja a través de la primera trayectoria óptica 160 hasta la salida óptica 135. El contenido del compuesto gaseoso en la mezcla gaseosa, en el espacio 110, en la primera trayectoria óptica 160, se medirá como se describirá más adelante. En las Figuras 1a-1c, una ventana 140a1, 140b1 o 140c1 hace de entrada óptica 130 y otra ventana 140a2, 140b2, 140c2 hace de salida óptica 135. En la Figura 1d, el agujero 132d1 hace de entrada óptica 130 y el agujero 132d2 hace de entrada óptica 135.

60 Una realización preferida para la primera trayectoria óptica 160a se muestra en la Figura 1 a, en donde una primera pared 102a1 comprende una primera ventana 140a1, una segunda pared 102a2 comprende una segunda ventana 140a2, la primera pared 102a1 es básicamente paralela a la segunda pared 102a2 y la trayectoria óptica 160a es básicamente perpendicular a la primera ventana 140a1 y la segunda ventana 140a2. Las ventanas pueden ser básicamente paralelas a la pared. La pared 102 puede ser curva. En una realización preferida, las ventanas 140a1 y 140a2 son básicamente planas. Un haz de luz 170a ingresa y penetra en la primera ventana 140a1, viaja a lo largo de la primera trayectoria óptica 160a a la segunda ventana 140a2, ingresa y penetra la segunda ventana 140a2 y sale de la segunda ventana como un haz de luz atenuado 175a. La primera trayectoria óptica 160a se extiende a través del espacio 110.

Otras realizaciones se muestran en las Figuras 1b y 1c. En la Figura 1b, un haz de luz 170b ingresa y penetra la primera ventana 140b1, viaja a lo largo de la primera trayectoria óptica 160b a la segunda ventana 140b2, ingresa y penetra la segunda ventana 140b2 y sale de la segunda ventana como el haz de luz atenuado 175b. La primera ventana 140b1 está dispuesta en un ángulo con respecto a la segunda ventana 140b2. En la Figura 1b, el ángulo es esencialmente un ángulo recto. Sin embargo, otros ángulos también son posibles.

En la Figura 1c, un haz de luz 170c ingresa y penetra la primera ventana 140c1, viaja a lo largo de una primera parte 160c1 de la primera trayectoria óptica a un reflector 145. Una parte de la pared 102 puede actuar como el reflector 145. El reflector puede reflejar o dispersar el haz de luz de modo que al menos parte del haz de luz es guiado a una segunda parte 160c2 de la trayectoria óptica. La parte reflejada o dispersada del haz de luz viaja a lo largo de una segunda parte 160c2 de la primera trayectoria óptica a la segunda ventana 140c2, ingresa y penetra la segunda ventana 140c2 y sale a la segunda ventana como el haz de luz atenuado 175c. La primera trayectoria óptica comprende sus partes 160c1 y 160c2. La primera ventana 140c1 está dispuesta en una pared 102c y la segunda ventana 140b2 está dispuesta en la misma pared 102c. Si se utiliza un reflector 145, una ventana 140 puede funcionar tanto como la primera ventana como la segunda ventana, es decir tanto como la entrada óptica 130 como la salida óptica 135 (no se muestra).

En la Figura 1d, un haz de luz 170d penetra un primer agujero 132d1 (la entrada óptica 130), viaja a lo largo de la primera trayectoria óptica 160d a un segundo agujero 132d2 (la salida óptica 135) y sale del segundo agujero 132d2 como el haz de luz atenuado 175d. Puede utilizarse un agujero 132 en lugar de una ventana también en las realizaciones de las Figuras 1b y 1c. Más aun, un agujero 132 puede servir tanto como la entrada óptica 130 como la salida óptica 135. Las paredes 102 en la Figura 1d se disponen como se describió en el contexto de la Figura 1a.

En las Figuras 1a-1d, la primera trayectoria óptica 160 está ubicada ópticamente entre la entrada óptica 130 y la salida óptica 135. En el caso que se utilice un reflector 145, la trayectoria óptica no está necesariamente físicamente entre la entrada óptica y la salida óptica, como se ilustra en la Figura 1c. La expresión "ópticamente entre" significa que la luz que ingresa a la entrada óptica puede viajar a lo largo de la primera trayectoria óptica a la salida óptica (o la entrada óptica, si un agujero o una ventana actúa tanto como entrada óptica como salida óptica).

#### *Principio de medición, disociación de un único paso*

Habiendo descrito los ambientes preferibles para la configuración de medición, el principio de medición se describirá en mayor detalle. Para superar los problemas indicados en los antecedentes, la sensibilidad de las mediciones se aumenta de dos modos:

- (1) al aumentar la absorción de la mezcla gaseosa que corresponde a las longitudes de onda del haz de luz 170 y
- (2) al acortar el tiempo de medición de modo de obtener condiciones de medición estacionarias temporarias.

La medición se basa en espectroscopía de absorción. El método comprende:

- generar un haz de luz 170, en donde el haz de luz 170 comprende fotones que tienen una longitud de onda de haz  $\lambda_b$ ,
- guiar el haz de luz 170 a una primera trayectoria óptica 160, en donde
  - o la primera trayectoria óptica 160 corre a través de un espacio 110 que contiene la mezcla gaseosa, por lo cual el haz de luz 170 se atenúa a un haz de luz atenuado 175 y
- detectar un primer valor indicativo de una primera intensidad  $I_{k0}$  del haz de luz atenuado 175.

En el método, la sensibilidad se mejora al aumentar la absorción de la mezcla gaseosa para la longitud de onda de haz  $\lambda_b$ . Sin embargo, cabe destacar que en general, el haz de luz 170 comprende fotones que tienen la longitud de onda  $\lambda_b$  y pueden comprender además fotones que tienen una longitud de onda diferente. En una realización preferida, una fuente de haz de luz monocromática (un láser) se utiliza para generar el haz de luz 170.

La absorción se aumenta al disociar las moléculas del compuesto gaseoso en la primera trayectoria óptica 160 en dos partes: una primera parte y una segunda parte. La primera parte puede ser un átomo, una molécula e ión o un radical. El término radical se refiere a un átomo, una molécula o un ión con electrones no apareados o una configuración de caparazón abierto. Estos electrones no apareados pueden provocar que los radicales sean altamente químicamente reactivos. La segunda parte puede ser un átomo, una molécula, un ión o un radical. Al menos uno de la primera parte y la segunda parte puede estar en un estado excitado o en un estado relajado.

El proceso de disociación se muestra esquemáticamente en la Figura 2a para hidróxido de sodio. En el método, la molécula se disocia en dos partes utilizando un pulso de luz 710. En la Figura 2a, la molécula de hidróxido de sodio se excita primero a una molécula 512 en un estado disociativo al utilizar un pulso de luz 710. El pulso de luz 710 comprende fotones 515 que tienen una longitud de onda  $\lambda_{p1}$ . Este fotón 515 también tiene la energía  $hc/\lambda_{p1}$ . La

energía en general es relativamente alta, por ejemplo, la longitud de onda  $\lambda_{p1}$  es corta. Se necesita alta energía para excitar la molécula 510 a la molécula 512 en el estado disociativo. El pulso de luz 710 no necesita ser monocromático. Preferiblemente el pulso de luz 710 es monocromático o esencialmente monocromático y tiene una primera longitud de onda de pulso  $\lambda_{p1}$ .

Haciendo referencia a la Figura 2b, la molécula puede alternativamente disociarse en al menos dos partes utilizando excitación de dos fotones o excitación de múltiples fotones. En la Figura 2b, la molécula 510 está disociada en dos partes utilizando un pulso de luz 710 de modo que la molécula se excita hasta el estado disociativo con al menos dos fotones del pulso o con al menos dos fotones de al menos dos pulsos. En la Figura 2b, la molécula de hidróxido de sodio 510 se excita primero a un estado excitado 510b, tal como un estado de energía o un estado virtual, con un fotón 515b de un pulso óptico, tal como el pulso óptico 710. Luego, la molécula de hidróxido de sodio excitada 510b se excita adicionalmente a un estado disociativo 512 con otro fotón 515 del pulso óptico 710. Esta excitación puede denominarse "excitación de dos fotones". Por motivos de claridad, el pulso que comprende los fotones 515 que excitan la molécula de gas excitada 510b hasta el estado disociativo 512 puede denominarse el último pulso de luz.

Incluso si no se muestra en las figuras 2a y 2b, una molécula de compuesto gaseoso 510 que comprende tres átomos puede excitarse con al menos un fotón (515, 515b) a un estado excitado 512 de modo que se disocia en tres partes. Por ejemplo  $\text{PbBr}_2$  puede excitarse, por ejemplo con un fotón, hasta el estado disociativo 512 de modo que el estado disociativo se disocia en Pb, Br y Br.

En el estado disociativo, la molécula 512 es inestable, lo que significa que la molécula se disocia en la primera parte 520 y la segunda parte 525. Haciendo referencia a la Figura 2a, la primera parte 520 puede referirse a un átomo de sodio. Haciendo referencia a la Figura 2a, la segunda parte 525 puede referirse a una molécula de hidróxido.

La longitud de onda del pulso (o longitudes de onda del pulso en el caso de excitación de dos o múltiples fotones con al menos dos pulsos) se selecciona de modo que disocia la molécula de compuesto gaseoso 510. Haciendo referencia a la Figura 3a, por ejemplo en el caso de que se disocie una molécula de hidróxido de sodio 510, puede utilizarse un pulso de luz que comprende fotones que tienen una longitud de onda más corta que aproximadamente 380 nm. Sin embargo, los fotones en el rango de longitud de onda de aproximadamente 260 nm a aproximadamente 290 nm no disocian significativamente las moléculas de NaOH, como se representa en la Figura 3a. La longitud de onda del pulso se describirá en mayor detalle más adelante. En el método y/o el dispositivo, las longitudes de onda del haz de luz se seleccionan de modo que el haz de luz 170 comprende fotones que tienen la longitud de onda  $\lambda_b$ . Más aun, la longitud de onda del haz  $\lambda_b$  se selecciona de modo que corresponde al perfil de absorción de la primera parte 520. La longitud de onda  $\lambda_b$  corresponde al perfil de absorción siempre que la sección transversal de la primera parte 520 (Figuras 2a y 2b) y para la longitud de onda  $\lambda_b$  sea mayor que 1/1000 (un milésimo) de la sección transversal de absorción máxima para la primera parte 520. Preferiblemente, la primera longitud de onda  $\lambda_b$  corresponde a la longitud de onda del máximo de absorción. Más aun, el haz de luz 170 utilizado para las mediciones comprende fotones que tienen la longitud de onda del haz, pero puede comprender fotones que tienen otras longitudes de onda.

Como las longitudes de onda del pulso de luz y el haz de luz se seleccionan de este modo, luego de la disociación, el haz de luz 170 se atenúa al haz de luz atenuado 175, entre otras cosas, debido a la absorción a la primera parte 520, como se representa en las Figuras 2a y 2b. Sin embargo, cabe destacar que también las moléculas de gas 510 están ubicadas en una trayectoria óptica de modo que también las moléculas de gas 510 están iluminadas por el haz de luz 170. Sin embargo, las moléculas de gas 510 no absorben significativamente el haz de luz 170; significativamente significando en comparación con la absorción a los átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte 520.

Haciendo referencia a la Figura 2a, la primera parte puede ser un átomo de sodio. La Figura 3b muestra una sección transversal de absorción calculada para un átomo de sodio que se ha producido por disociación de una molécula de NaOH. La ubicación, forma y altura del pico depende de la primera parte a medir. La Figura 3b sirve como ejemplo. Como se observa en la Figura 3b, para el sodio se puede utilizar la longitud de onda  $\lambda_b$ , en donde  $\lambda_b$  puede seleccionarse del rango de 588,99 nm a 589,05 nm. Preferiblemente, la longitud de onda  $\lambda_b$  se selecciona para estar cerca de la longitud de onda que corresponde al pico que se muestra en la Figura 3b. Se conoce que el sodio también tiene otros picos de absorción.

Alternativamente, cualquier otra longitud de onda que corresponde al perfil de absorción de sodio puede utilizarse como la primera longitud de onda  $\lambda_b$ . Por ejemplo, se conoce que el sodio tiene picos de absorción también cerca de las longitudes de onda de 589,6 nm, 330 nm y 285 nm. Más aun, un átomo de sodio excitado tiene un pico de absorción cerca de la longitud de onda 818 nm. La selectividad del átomo de sodio (es decir la primera parte disociada) se utiliza en las realizaciones de la invención. Ya que la sección transversal de absorción tiene al menos un pico bien definido, la espectroscopía de absorción en esta longitud de onda precisa produce resultados precisos. Sin la disociación, el compuesto gaseoso (por ejemplo NaOH) no tiene tal perfil de absorción altamente específico de longitud de onda.

La ubicación (es decir, longitud de onda) del pico de absorción de sodio depende de la presión. Más aun, la primera parte 520, según se obtiene al disociar una molécula, tiene una mayor velocidad, ya que parte de la energía liberada en la disociación se transforma a la energía cinética de la primera parte. Por lo tanto, la longitud de onda para el átomo de la primera parte que corresponde al pico de absorción puede ser levemente diferente a los valores presentados típicamente en la literatura para el mismo átomo, ión, molécula o radical, ya que el átomo, ión, molécula o radical de la primera parte inducido por disociación puede tener mayor velocidad que productos de disociación de ambiente similar. Más aun, dependiendo de la energía del pulso de luz disociativa 710 (o pulsos), la primera parte 520 puede estar en un estado excitado. Por lo tanto, la longitud de onda de haz  $\lambda_b$  puede corresponder al perfil de absorción de la primera parte en el estado excitado. La longitud de onda de haz  $\lambda_b$  puede corresponder al perfil de absorción de la primera parte en el estado fundamental. La fuente de luz utilizada para generar el haz de luz es preferiblemente ajustable de manera que la longitud de onda puede ajustarse de manera precisa para corresponder al pico de absorción.

Para el caso de NaOH, la longitud de onda del pulso  $\lambda_{p1}$  es preferiblemente de 300 nm a 340 nm, por ejemplo, aproximadamente 310 nm. Por lo tanto, la fuente de luz del pulso puede seleccionarse de un rango amplio de fuentes de luz. En una realización, se utilizó un láser de pulso con una longitud de onda de 315 como la fuente de pulso de luz. En otra realización, se utilizó un láser de pulso con una longitud de onda de 330 como la fuente de pulso de luz. El espectro de absorción de la molécula de hidróxido de sodio 510 muestra un valor relativamente alto para estas longitudes de onda específicas como se representa en la Figura 3a. Además, cabe destacar que los fotones que tienen esta longitud de onda específica no disocian significativamente otros compuestos de sodio que pueden estar presentes en la mezcla gaseosa, por ejemplo, cloruro de sodio u otros haluros de sodio.

Las moléculas de compuestos gaseosos se disocian utilizando al menos un pulso de luz. El pulso de luz comprende fotones de los cuales la energía es suficiente para disociar al menos algunas moléculas de compuesto gaseoso. El pulso de luz puede comprender fotones que tienen una longitud de onda de menos de 430 nm. Cabe destacar que la energía de un fotón que tiene esta longitud de onda es 2,88 eV. Por lo tanto, el pulso de luz 710 puede comprender fotones capaces de excitar las moléculas del compuesto 510 a un estado disociativo 512 que tiene una energía de al menos 2,88 eV por encima del estado fundamental. Sin embargo, haciendo referencia a la Figura 2b, también los fotones que tienen una longitud de onda más larga son capaces de excitar las moléculas del compuesto a un estado disociativo que tiene una energía de al menos 2,88 eV por encima del estado fundamental, siempre que la molécula del compuesto gaseoso 510 se excite hasta el estado disociativo 512 a través de un estado excitado intermedio 510c (estado de energía o estado virtual) utilizando al menos dos fotones (515, 515b). Las longitudes de onda de al menos un fotón (515, 515b) pueden seleccionarse de modo que al menos un fotón es capaz de excitar la molécula del compuesto gaseoso a un estado disociativo que tiene una energía de al menos 2,88 eV por encima del estado fundamental. La longitud de onda del protón 515 o 515 y 515b se selecciona de acuerdo con la secuencia de excitación. La secuencia de excitación se refiere a la cantidad de energía posterior requerida por la cual las moléculas del compuesto 510 se excitan hasta el estado disociativo 512.

La expresión "estado fundamental" anterior se refiere a un estado de energía mínimo. La expresión "estado fundamental" puede referirse al estado en el que se encuentran las moléculas del compuesto gaseoso antes de la excitación o disociación. El "estado fundamental" en el ambiente de medición puede ser diferente del "estado fundamental" en otra temperatura. Más aun el "estado fundamental" puede referirse al estado de las partes disociadas después de la disociación.

El proceso de disociación no es sensible a la longitud de onda, siempre que la longitud de onda sea lo suficientemente corta. Sin embargo, el espectro de absorción de una molécula del compuesto gaseoso es indicativo de una probabilidad para un fotón que tiene una longitud de onda a ser absorbida por la molécula de gas. De este modo, incluso si la disociación no es sensible a la longitud de onda, los fotones disociativos que tienen una longitud de onda pueden disociar más moléculas que la misma cantidad de fotones disociativos que tienen una longitud de onda diferente. Por lo tanto, el pulso de luz no es necesariamente monocromático. Sin embargo, el pulso de luz puede ser esencialmente monocromático, por lo cual el pulso de luz puede consistir en fotones que tienen la misma longitud de onda.

Como se describió anteriormente, el método comprende detectar un primer valor indicativo de una primera intensidad  $I_{k0}$  del haz de luz atenuado 175. El primer valor indicativo de una primera intensidad,  $I_{k0}$ , del haz de luz atenuado 175 puede ser, por ejemplo, el nivel de señal del fotodetector 320 que corresponde a la primera intensidad,  $I_{k0}$ . Otras posibilidades, por ejemplo, promediar, se describirán más adelante.

La mezcla gaseosa que comprende el compuesto gaseoso puede ser el resultado de un proceso térmico. En particular, el proceso térmico puede ser continuo, por lo cual la mezcla gaseosa puede fluir en un tubo, ducto o canal. La mezcla gaseosa puede comprender varias cantidades de compuestos gaseosos y partículas líquidas o sólidas diferentes. Por lo tanto, la intensidad del haz de luz atenuado 175 fluctúa. Las fluctuaciones tienden a afectar la precisión de las mediciones. Por ejemplo, con la espectroscopía de absorción para los gases de combustión, los gases de combustión pueden contener varias cantidades de partículas sólidas que viajan a través de la trayectoria óptica 160, afectando así la intensidad del haz de luz atenuado 175. Las fluctuaciones se observan claramente en una escala de tiempo del orden de un segundo (s). La Figura 4a ilustra estas fluctuaciones. En la Figura 4a la

intensidad normalizada del haz de luz atenuado 175 se muestra para escalas de tres veces. Primero (parte más alta) para una escala de tiempo de 1 segundo, segundo (parte media) para una escala de tiempo intermedia de 10 milisegundos y tercero (parte más baja) para una escala de tiempo corta de 100 microsegundos. En la escala de tiempo más larga, la señal normalizada fluctúa entre aproximadamente 0,2 y 1,0. En la escala de tiempo intermedia, la señal normalizada fluctúa entre aproximadamente 0,2 y 0,7. En la escala de tiempo corta, la señal normalizada es prácticamente constante (0,5). De este modo se observa que acortar la escala de tiempo para mediciones disminuye las fluctuaciones y de esta manera aumenta la precisión de las mediciones. Cabe destacar que si la velocidad de flujo del gas de combustión es por ejemplo 10 m/s, las partículas en el gas de combustión viajan solamente 10  $\mu\text{m}$  en un microsegundo. De este modo, si el tamaño del haz de luz es significativamente mayor que, digamos 10  $\mu\text{m}$ , las fluctuaciones disminuyen. Por lo tanto, una escala de tiempo corta en combinación con un haz de luz relativamente amplio disminuye las fluctuaciones.

La Figura 4a muestra la señal en el fotodetector 320 (ver, por ejemplo, la Figura 5a para el fotodetector) en mediciones, donde la intensidad del haz de luz 170 se mantiene constante. En las figuras, la señal del fotodetector 320 es proporcional a la intensidad del haz de luz atenuado 175. En el caso que el fotodetector 320 tenga una respuesta no lineal, el nivel de intensidad puede deducirse del nivel de señal utilizando información de calibración para el fotodetector. La Figura 4a muestra una señal de intensidad, según se midió utilizando un fotodetector 320 en las diferentes escalas de tiempo según se describió anteriormente.

Como se describió anteriormente, la longitud de onda  $\lambda_b$  del haz 170 se selecciona de modo que corresponde al perfil de absorción de la primera parte 520 (por ejemplo átomo de sodio) en el estado fundamental o en un estado excitado. De este modo, la disociación muestra la intensidad del haz de luz atenuado 175. A saber, la intensidad disminuye, lo que corresponde a la cantidad de moléculas de gas disociadas (primeras partes 520) en la primera trayectoria óptica 160. Esto se muestra en las Figuras 4b y 4c. Las curvas 462 y 464 en la Figura 4b y la curva 410 en la Figura 4c muestran las mediciones de la intensidad del haz de luz atenuado 175. La caída acentuada en la intensidad corresponde a la disociación, en donde el contenido de la primera parte disociada 520 (por ejemplo, sodio, ver la Figura 2a) del compuesto gaseoso se aumenta rápidamente. Estos átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte pueden alejarse de la primera trayectoria óptica por ejemplo con gases de combustión. Adicionalmente, los átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte pueden ser altamente reactivos, especialmente con segundas partes (también disociadas) (por ejemplo, molécula de hidróxido, Figura 2a). Por lo tanto, las primeras partes 520 reaccionan rápidamente con otras sustancias en la mezcla gaseosa o se alejan de la primera trayectoria óptica 160, aumentando así la intensidad de vuelta al nivel original, como se muestra en las figuras 4b y 4c.

Haciendo referencia a la Figura 4c, el pulso de luz disocia parte de las moléculas del compuesto gaseoso a la primera parte y la segunda parte en el momento  $t_0$ , que se muestra como una caída acentuada en la curva 410. La señal vuelve a su nivel inicial relativamente rápido. El tiempo en el cual la señal regresa a su nivel original se denomina tiempo de recuperación. Haciendo referencia a la Figura 4b, el tiempo de recuperación puede ser del orden de 2  $\mu\text{s}$ . El periodo, en el cual los átomos o moléculas de la primera parte están ubicados en la primera trayectoria óptica 160, habiendo sido la primera parte producida al disociar las moléculas del compuesto gaseoso, se denomina por consecuencia periodo de recuperación. El nivel de señal antes de disociar las moléculas de gas se denota por  $I_{k0}$  y el nivel de señal inmediatamente o esencialmente inmediatamente después de disociar las moléculas de gas se denota por  $I_k$ . La intensidad  $I_k$  también puede corresponder a un mínimo local de la señal de intensidad. Durante el periodo de recuperación, la intensidad del haz de luz atenuado 175 ha disminuido adicionalmente, en comparación con la situación antes del periodo de recuperación, debido a las primeras partes de las moléculas de gas que están ubicadas en la primera trayectoria óptica 160.

La señal de intensidad antes de disociar las moléculas de gas,  $I_{k0,1}$ , iguala o aproximadamente iguala la señal después de un largo tiempo después de disociar las moléculas,  $I_{k0,2}$ . En principio, la intensidad  $I_{k0}$  puede medirse antes del pulso de luz disociativo o después del pulso de luz y después del tiempo de recuperación. Sin embargo, como una ventaja técnica del método es el tiempo de medición corto, preferiblemente la intensidad  $I_{k0}$  se mide justo antes del pulso de luz disociativo.

El método comprende detectar un primer valor indicativo de una primera intensidad  $I_{k0}$  del haz de luz atenuado 175. El primer valor indicativo de la primera intensidad  $I_{k0}$  puede ser, por ejemplo, un promedio de varias señales medidas. Por ejemplo el primer valor puede ser un promedio de varias señales medidas antes de la disociación, como se muestra en la figura 4c con el número de referencia 420. Como otro ejemplo, el primer valor puede ser un promedio de varias señales medidas un largo tiempo después de la disociación, como se muestra en la figura 4c con el número de referencia 425.

El método comprende además detectar un segundo valor indicativo de una segunda intensidad  $I_k$  del haz de luz atenuado 175 durante el periodo de recuperación, es decir después de disociar al menos parte de las moléculas del compuesto gaseoso 525 en la primera trayectoria óptica 160. El segundo valor puede ser un valor mínimo local de la señal 410. El segundo valor puede ser un promedio de varias señales medidas cerca del mínimo local, como se muestra en la figura 4c con el número de referencia 432. También es posible ajustar una función a los datos medidos, particularmente a la parte creciente de los datos medidos. La parte creciente de los datos medidos se

muestra en la figura 4c con el número de referencia 430. Como un ejemplo de la función, puede ajustarse una línea 435 a los datos. El segundo valor indicativo de la segunda intensidad  $I_k$  del haz de luz atenuado 175 puede detectarse utilizando esta función. En la Figura 4c, una posibilidad para el segundo valor se denota por  $I'_k$ . El valor  $I'_k$  se obtiene como el valor de la función ajustada (la línea 435) al momento  $t_0$ . También pueden ajustarse otras funciones para aumentar la parte de los datos medidos, por ejemplo, una función exponencial o una polinomial.

Los datos medidos pueden filtrarse antes de detectar el primero o el segundo valor. Por ejemplo, en lugar de la señal medida, puede utilizarse un promedio móvil de la señal. Alternativamente o además, pueden excluirse valores atípicos de las mediciones.

A modo de caracterizar las escalas de tiempo de la medición, la Figura 4b muestra las señales medidas de una mezcla gaseosa que resulta de un proceso térmico. Un pulso de luz disocia parte de las moléculas del compuesto gaseoso comprendidas en los gases de combustión al momento de aproximadamente  $t_0=5 \mu\text{s}$ , lo que se muestra como una caída acentuada en las curvas 462 y 464. Al momento  $t=7 \mu\text{s}$ , las señales se regresan al nivel inicial. Por lo tanto, la escala de tiempo para estas reacciones es del orden de  $2 \mu\text{s}$ . Más aun, el nivel de señal parece caer en aproximadamente 200 ns. Sin embargo, el nivel de señal que se muestra en la Figura 4b se filtra utilizando un promedio móvil. Por lo tanto, el nivel de señal parece caer significativamente más lento que en realidad lo hace. El nivel de señal cae en una escala de tiempo del orden de la duración del pulso de luz 710. La segunda intensidad  $I_k$  del haz de luz atenuado 175 puede medirse de un mínimo local de la señal de intensidad o utilizando una función ajustada según se describió anteriormente.

El haz de luz 170 también puede comprender pulsos de luz. De este modo, la fuente de haz de luz 310 puede ser una fuente de luz de pulso. Cuando se utiliza la fuente de luz de pulso como la fuente de haz de luz 310, los valores en el fotodetector 320 se detectan cuando el haz de luz atenuado 175 ilumina el fotodetector. Por el contrario, si los pulsos de luz se utilizan como el haz de luz 170, el fotodetector 320 detecta periódicamente valores muy pequeños que corresponden a las veces, cuando el haz de luz atenuado 175 está apagado. Los valores relevantes para el método pueden obtenerse cuando el haz de luz atenuado 175 ilumina el fotodetector 320.

Habiendo descrito el principio, es evidente que el método comprende además:

- generar un pulso de luz 710, en donde el pulso de luz 710 comprende fotones que tienen una primera longitud de onda de pulso  $\lambda_{p1}$ ,
- disociar al menos parte de las moléculas de gas 510 o moléculas del compuesto gaseoso excitado (510b) en la primera trayectoria óptica 160 a una primera parte 520 y una segunda parte 525, utilizando el primer pulso 710, por lo cual el haz de luz 170 se atenúa adicionalmente al haz de luz atenuado 175 mediante absorción a la primera parte 520 de la molécula de gas 510 en la primera trayectoria óptica 160,
- detectar un segundo valor indicativo de una segunda intensidad  $I_k$ , del haz de luz atenuado 175 y
- determinar, utilizando el primer valor y el segundo valor, el contenido del compuesto gaseoso en la mezcla gaseosa.

Más específicamente, el método comprende

- detectar un segundo valor indicativo de una segunda intensidad  $I_k$ , del haz de luz atenuado 175, en donde el haz de luz atenuado 175 se atenúa adicionalmente por los átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte 520 en la primera trayectoria óptica 160.

El segundo valor indicativo de la segunda intensidad,  $I_k$ , del haz de luz atenuado 175 puede detectarse durante el periodo de recuperación. Más aun, la segunda intensidad,  $I_k$ , del haz de luz atenuado 175 se ha atenuado adicionalmente mediante absorción del haz de luz 170 a las primeras partes inducidas por disociación 520 en la primera trayectoria óptica 160. Debido a que se utiliza solamente un único tipo de pulso de luz 710, el pulso de luz 710 puede considerarse el último pulso de luz, si fuese necesario.

El segundo valor indicativo de una segunda intensidad,  $I_k$ , del haz de luz atenuado 175 puede ser, por ejemplo, el nivel de señal del fotodetector 320 que corresponde a la segunda intensidad,  $I_k$ . Los valores indicativos de las intensidades pueden ser naturalmente el valor de las intensidades. Puede utilizarse una función ajustada de modo que un valor de la señal en la parte creciente de los datos medidos es indicativa de la intensidad local mínima o la segunda intensidad,  $I_k$ . El fotodetector también puede ser invertido, por ejemplo, la señal puede disminuir incluso si la intensidad aumenta. La parte creciente de los datos medidos se refiere a la intensidad creciente.

La Figura 4b muestra la primera intensidad  $I_{k0}$  del haz de luz atenuado 175 y la segunda intensidad  $I_k$  del haz de luz atenuado 175 para la señal 462. La primera intensidad  $I_{k0}$  se refiere a la intensidad antes de disociar al menos parte de las moléculas de gas 510 en la primera trayectoria óptica 160. El valor indicativo de la segunda intensidad  $I_k$  del haz de luz atenuado 175 se determina utilizando la función 435 (línea) y el valor para  $I_k$  se determina como el valor de la función al momento  $t_0$  del pulso de luz. La segunda intensidad  $I_k$  del haz de luz atenuado 175 podría medirse de un mínimo local de la señal inmediatamente o esencialmente inmediatamente después de disociar las moléculas de gas.

Se ha notado previamente que los haluros alcalinos pueden medirse con un método, en donde las longitudes de onda se seleccionan específicamente para las mediciones de haluros alcalinos. Esto se ha divulgado en una solicitud de patente finlandesa no pública FI20116232 (presentada el 5 de diciembre de 2011) y WO 2013/083871 A1, en donde se divulgó un método para medir el contenido de haluro alcalino del gas de combustión. El contenido de haluros alcalinos en gases de combustión está por lo tanto más allá del alcance de la presente invención. Con respecto a los haluros alcalinos, por ejemplo para cloruro de potasio, la longitud de onda del pulso puede ser aproximadamente  $\lambda_{p1}=266$  nm, mientras la longitud de onda del haz puede ser, por ejemplo,  $\lambda_b=766,515$  nm  $\pm$  0,01 nm.

El término haluro alcalino, en esa solicitud y en la presente solicitud, se refiere a una molécula del tipo  $MH^a$ , en donde M es un átomo alcalino (metal), excluyendo hidrógeno, del grupo IA de la tabla periódica de los elementos y  $H^a$  es un átomo de halógeno del grupo VIIA de la tabla periódica de los elementos. Específicamente, para un haluro alcalino, el metal M puede seleccionarse del grupo de Li, Na, K, Ru, Cs y Fr, y el halógeno  $H^a$  puede seleccionarse del grupo de F, Cl, Br, I y At. Incluso más específicamente M puede ser litio, sodio o potasio, mientras  $H^a$  puede ser cloro o bromo.

En algunas realizaciones, la longitud de onda del pulso  $\lambda_{p1}$  puede ser a lo sumo 430 nm. Es decir el conjunto de longitudes de onda para la longitud de onda de pulso  $\lambda_{p1}$  comprende la longitud de onda 430 nm y todas las longitudes de onda más cortas. Para excluir los haluros alcalinos de estas mediciones, en algunas realizaciones las longitudes de onda 420 nm, 370 nm y 270 nm pueden excluirse del conjunto de longitudes de onda para la longitud de onda de pulso  $\lambda_{p1}$ . En algunas realizaciones, además o alternativamente, la longitud de onda 266 nm puede excluirse del conjunto de longitudes de onda para la longitud de onda de pulso  $\lambda_{p1}$ . En algunas realizaciones, además o alternativamente, la longitud de onda 270 nm puede excluirse del conjunto de longitudes de onda para la longitud de onda del pulso  $\lambda_{p1}$ . En algunas realizaciones, además o alternativamente, las longitudes de onda de 230 nm a 290 nm pueden excluirse del conjunto de longitudes de onda para la longitud de onda de pulso  $\lambda_{p1}$ .

En algunas realizaciones la longitud de onda del haz  $\lambda_b$  puede ser a lo sumo 1800 nm y la longitud de onda de pulso  $\lambda_{p1}$  puede ser a lo sumo 430 nm. Es decir el conjunto de longitudes de onda para la longitud de onda del haz  $\lambda_b$  y la longitud de onda de pulso  $\lambda_{p1}$  comprende todos los pares ( $\lambda_b^s$ ;  $\lambda_{p1}^s$ ), en donde  $\lambda_b^s \leq 1800$  nm y  $\lambda_{p1}^s \leq 430$  nm. En algunas realizaciones, el par de longitudes de onda (766,515 nm; 266 nm) se excluye del conjunto de longitudes de onda para la longitud de onda de haz y la longitud de onda de pulso. En algunas realizaciones, todos los pares de longitudes de onda ( $\lambda_b^s$ ; 266 nm), en donde  $\lambda_b^s$  se selecciona del grupo de {766,515 nm, 770 nm y 404 nm}, se excluye del conjunto de longitudes de onda para la longitud de onda de haz y la longitud de onda de pulso. En algunas realizaciones, todos los pares de longitudes de onda ( $\lambda_b^s$ ;  $\lambda_{p1}^s$ ), en donde  $\lambda_b^s$  se selecciona del grupo de {766,515 nm, 770 nm y 404 nm}, y  $\lambda_{p1}^s$  se selecciona del grupo de 230 nm a 290 nm, se excluye del conjunto de longitudes de onda para la longitud de onda de haz y la longitud de onda de pulso. En algunas realizaciones, todos los pares de longitudes de onda ( $\lambda_b^s$ ; 420 nm), en donde  $\lambda_b^s$  se selecciona del grupo de {766,515 nm, 770 nm, 404 nm, 589 nm, 330 nm y 285 nm}, se excluye del conjunto de longitudes de onda para la longitud de onda de haz y la longitud de onda de pulso. En algunas realizaciones, todos los pares de longitudes de onda ( $\lambda_b^s$ ; 420 nm), en donde  $\lambda_b^s \leq 1800$  nm, se excluye del conjunto de longitudes de onda para la longitud de onda de haz y la longitud de onda de pulso.

La mezcla gaseosa, de la cual se medirá el contenido del compuesto gaseoso, puede comprender muchos gases diferentes. Por ejemplo, la mezcla gaseosa puede comprender hidróxidos alcalinos y haluros alcalinos en forma gaseosa. Las moléculas de haluro alcalino pueden interrumpir la medición de hidróxidos alcalinos. Por ejemplo, si la mezcla gaseosa comprende tanto hidróxido de sodio como cloruro de sodio, la disociación del hidróxido de sodio y el cloruro de sodio a sodio atómico (e hidróxido o cloro) aumenta el contenido de sodio atómico de la mezcla gaseosa. Mientras se detecta el contenido de sodio atómico por el haz de luz, no es necesariamente claro, si los átomos de sodio son el resultado de la disociación de NaOH o NaCl. De este modo, el contenido del hidróxido de sodio o cloruro de sodio gaseoso permanecen desconocidos. Por lo tanto, para medir específicamente el contenido del hidróxido, el método puede comprender:

- seleccionar la longitud de onda del pulso  $\lambda_{p1}$  de modo que al menos parte de las moléculas del compuesto gaseoso (o al menos parte de las moléculas de compuesto gaseoso excitadas; o al menos parte de una parte disociada 530, 534; o al menos parte de la parte disociada excitada) se disocian con el pulso de luz y ninguna molécula de haluro alcalino se disocia con el pulso de luz O
- seleccionar la longitud de onda del pulso  $\lambda_{p1}$  y espectro de longitudes de onda de modo que al menos parte de las moléculas del compuesto gaseoso (o al menos parte de las moléculas de compuesto gaseoso excitadas; o al menos parte de una parte disociada 530, 534; o al menos parte de la parte disociada excitada) se disocian con el pulso de luz y esencialmente ninguna molécula de haluro alcalino se disocia con el pulso de luz O
- (i) seleccionar la longitud de onda del pulso  $\lambda_{p1}$  de modo que al menos parte de las moléculas del compuesto gaseoso (o al menos parte de las moléculas del compuesto gaseoso excitado; o al menos parte de una parte disociada 530, 534; o al menos parte de la parte disociada excitada) se disocian y al menos algunas moléculas de haluro alcalino ( $MH^a$ ) se disocian con el pulso de luz y (ii) seleccionar la longitud de onda del

5 haz  $\lambda_b$  del haz de luz de modo que no corresponda a un pico de absorción del átomo de metal alcalino (M) disociado por el pulso de luz. En este caso la longitud de onda del haz de luz puede seleccionarse de modo que corresponde a un pico de absorción de algún otro átomo que no sea átomo de metal alcalino (M). Por ejemplo en el caso que una molécula de haluro de potasio y una molécula de hidróxido de sodio puedan disociarse con el mismo pulso, la longitud de onda del haz puede seleccionarse para corresponder al pico de absorción de sodio. De este modo, la longitud de onda del haz puede seleccionarse para que no corresponda al pico de absorción de potasio.

10 La longitud de onda para el pulso de luz puede seleccionarse utilizando el espectro de absorción de moléculas de haluro alcalino y/o utilizando el espectro de absorción de una molécula de gas, en donde la molécula de gas no es una molécula de haluro alcalino y/o utilizando la información de precio (u otra) sobre fuentes de luz disponibles. El pulso de luz puede ser esencialmente coherente.

15 La expresión "esencialmente ninguna molécula de haluro alcalino se disocia" anterior significa el caso, donde el pulso de luz disocia los haluros alcalinos y otros compuestos y la relación entre el número de moléculas de haluro alcalino disociadas y el número total de moléculas disociadas es pequeño, preferiblemente menor que 10%. La longitud de onda y el espectro de longitudes de onda pueden seleccionarse de acuerdo con las secciones transversales de absorción de las moléculas de gas. Por ejemplo, cuando se mide el hidróxido de sodio (NaOH) en presencia de cloruro de sodio (NaCl), la longitud de onda del pulso puede seleccionarse utilizando la información que se muestra en la Figura 3a. La Figura 3a muestra la sección transversal de absorción normalizada en función de la longitud de onda para NaOH y NaCl. Como se observa de la Figura 3a, cuando la longitud de onda de pulso es aproximadamente 310 nm o el pulso comprende fotones que tienen la longitud de onda de 300 nm a 350 nm, el pulso de luz no disocia esencialmente ninguna molécula de haluro alcalino, pero disocia las moléculas de gas. El pulso no necesita generarse por un láser, con lo cual el espectro de longitud de onda para el pulso puede ser amplio.

25 En este caso, la relación seleccionada, 10%, representa un máximo para un error sistemático en las mediciones. Sin embargo, también se ha notado que en procesos térmicos típicos, el contenido de compuesto gaseoso puede variar por ejemplo aproximadamente 20% debido a fluctuaciones en la materia prima, temperatura del proceso, presión del proceso y/u otros parámetros. A este respecto, 10% debería ser un máximo aceptable para un error sistemático. Sin embargo, con referencia a la Figura 3a, la longitud de onda de pulso puede seleccionarse a menudo también de modo que la relación entre el número de moléculas de haluro alcalino disociadas y el número total de moléculas disociadas es incluso menor, por ejemplo, menor que 5% o menor que 1%.

35 El último caso se refiere a la situación en la que, por ejemplo, las moléculas de cloruro de potasio y las moléculas de hidróxido de sodio se disocian con el mismo pulso de luz. En ese caso, la longitud de onda del haz puede seleccionarse para corresponder al átomo de sodio, por lo cual las moléculas de cloruro de potasio no se miden.

40 Haciendo referencia adicional a la Figura 3a se nota que si solo las moléculas de cloruro de sodio tuviesen que ser disociadas sin disociar moléculas de hidróxido de sodio, podría utilizarse una longitud de onda de pulso de 277 nm. Sin embargo, disociar un haluro alcalino y también medir el contenido del átomo alcalino correspondiente se encuentra más allá del alcance de la protección aplicado de la presente solicitud por las razones descritas anteriormente.

45 También es posible detectar el contenido de dos compuestos gaseosos diferentes utilizando un pulso de luz que disocia moléculas de un primer compuesto gaseoso y moléculas de un segundo compuesto gaseoso. De este modo, el pulso de luz disocia las moléculas del primer compuesto gaseoso en primeras primeras partes y en primeras segundas partes. Más aun, el pulso de luz disocia las moléculas del segundo compuesto gaseoso en primera parte de la segunda y en segunda parte de la segunda. Como un ejemplo, un pulso de luz puede disociar moléculas de hidróxido de sodio e hidróxido de potasio. La primera primera parte resultante puede referirse a un átomo de sodio y la segunda primera parte puede referirse a un átomo de potasio. La primera segunda parte y la segunda segunda parte se refieren en este caso a la molécula de hidróxido.

55 Las longitudes de onda del haz de luz 170 pueden seleccionarse de modo que el haz de luz comprende fotones que corresponden a un primer pico de absorción de la primera primera parte y además comprende fotones que corresponden a un segundo pico de absorción de la segunda primera parte. Por ejemplo, el haz de luz puede comprender fotones que corresponden a un pico de absorción de sodio y comprende además fotones que corresponden a un pico de absorción de potasio.

60 De este modo, el contenido de dos compuestos gaseosos diferentes puede medirse con el método. Esta realización comprende

- generar un haz de luz 170, en donde el haz de luz 170 comprende fotones que tienen una primera longitud de onda de haz  $\lambda_{b1}$  y fotones que tienen una segunda longitud de onda de haz  $\lambda_{b2}$ ,
- guiar el haz de luz 170 a una primera trayectoria óptica 160, en donde
- 65 - la primera trayectoria óptica 160 corre a través de un espacio 110 que contiene la mezcla gaseosa que comprende los compuestos gaseosos, por lo cual el haz de luz 170 se atenúa a un haz de luz atenuado 175 y

- detectar un primer valor indicativo de una primera intensidad  $I_{k0}$  del haz de luz atenuado 175 a la primera longitud de onda de haz  $\lambda_{b1}$ ,
- detectar un tercer valor indicativo de una primera intensidad  $I_{k0}$  del haz de luz atenuado 175 a la segunda longitud de onda de haz  $\lambda_{b2}$ ,
- 5 - generar un pulso de luz 710, en donde el pulso de luz 710 comprende fotones 515 que tienen una primera longitud de onda de pulso  $\lambda_{p1}$ ,
- disociar al menos parte de las (i) moléculas de compuesto gaseoso o (ii) moléculas de compuesto gaseoso excitadas en la primera trayectoria óptica 160 en átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte y en otra parte utilizando el pulso de luz 710, por lo cual el haz de luz 170 se atenúa adicionalmente a un haz de luz atenuado 175 por absorción a los átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte en la primera trayectoria óptica 160,
- 10 - detectar un segundo valor indicativo de una segunda intensidad  $I_k$  del haz de luz atenuado 175 a la primera longitud de onda de haz  $\lambda_{b1}$ ,
- detectar un cuarto valor indicativo de una segunda intensidad  $I_k$  del haz de luz atenuado 175 a la segunda longitud de onda de haz  $\lambda_{b2}$ ,
- 15 - determinar, utilizando el primer valor y el segundo valor, el contenido de un primer contenido de compuesto gaseoso de la mezcla gaseosa y
- determinar, utilizando el tercer valor y el cuarto valor, el contenido de un segundo contenido de compuesto gaseoso de la mezcla gaseosa.

20 Alternativamente a un haz de luz, pueden utilizarse dos haces de luz: Un primer haz de luz que comprende fotones que corresponde a un primer pico de absorción de la primera primera parte; y un segundo haz de luz que comprende fotones que corresponden a un segundo pico de absorción de la segunda primera parte.

25 De este modo, el contenido de dos compuestos gaseosos diferentes puede medirse con el método. Esta realización comprende

- generar un primer haz de luz 170, en donde el primer haz de luz 170 comprende fotones que tienen una primera longitud de onda de haz  $\lambda_{b1}$ ,
- 30 - generar un segundo haz de luz, en donde el segundo haz de luz comprende fotones que tienen una segunda longitud de onda de haz  $\lambda_{b2}$ ,
- guiar los haces de luz a una primera trayectoria óptica 160, en donde
- la primera trayectoria óptica 160 corre a través de un espacio 110 que contiene la mezcla gaseosa que comprende los compuestos gaseosos, por los cuales los haces de luz se atenúan a haces de luz atenuados y
- 35 - detectar un primer valor indicativo de una primera intensidad  $I_{k0}$  del haz de luz atenuado 175,
- detectar un tercer valor indicativo de una primera intensidad  $I_{k0}$  del segundo haz de luz atenuado,
- generar un pulso de luz 710, en donde el pulso de luz 710 comprende fotones 515 que tienen una primera longitud de onda de pulso  $\lambda_{p1}$ ,
- disociar al menos parte de (i) moléculas de compuesto gaseoso o (ii) moléculas de compuesto gaseoso excitadas en la primera trayectoria óptica 160 en átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte y en otra parte utilizando el pulso de luz 710, por lo cual los haces de luz se atenúan adicionalmente a haces de luz atenuados por absorción a los átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte en la primera trayectoria óptica 160,
- 40 - detectar un segundo valor indicativo de una segunda intensidad  $I_k$ , del primer haz de luz atenuado 175,
- detectar un cuarto valor indicativo de una segunda intensidad  $I_k$ , del segundo haz de luz atenuado,
- 45 - determinar, utilizando el primer valor y el segundo valor, el contenido de un primer contenido de compuesto gaseoso de la mezcla gaseosa y
- determinar, utilizando el tercer valor y el cuarto valor, el contenido de un segundo contenido de compuesto gaseoso de la mezcla gaseosa.

50 Más aun, es posible detectar el contenido de dos compuestos gaseosos diferentes utilizando dos pulsos de luz de modo que el primer pulso de luz disocie moléculas de un primer compuesto gaseoso y el segundo pulso de luz disocie moléculas de un segundo compuesto gaseoso. De este modo, el primer pulso de luz disocia las moléculas del primer compuesto gaseoso en primeras primeras partes y en primeras segundas partes. Más aun, el segundo pulso de luz disocia las moléculas del segundo compuesto gaseoso en segundas primera partes y en segundas segundas partes. Como ejemplo, un primer pulso de luz puede disociar moléculas de óxido de magnesio MgO y un segundo pulso de luz puede disociar moléculas de sulfato de magnesio MgSO<sub>4</sub>. La primera primera parte resultante puede referirse a un átomo de magnesio y la segunda primera parte puede referirse también a un átomo de magnesio. La primera segunda parte puede referirse a un átomo de oxígeno y la segunda segunda parte puede referirse a una molécula de sulfato.

En este caso, el haz de luz puede comprender fotones que corresponden al pico de absorción de magnesio. Sin embargo, al sincronizar los dos pulsos de luz de manera levemente diferente, el óxido de magnesio y sulfato de magnesio pueden medirse con el método. Esta realización comprende

65

- generar un haz de luz 170, en donde el haz de luz 170 comprende fotones que tienen una longitud de onda de haz  $\lambda_b$
- guiar el haz de luz 170 a una primera trayectoria óptica 160, en donde
- la primera trayectoria óptica 160 corre a través de un espacio 110 que contiene la mezcla gaseosa que comprende los compuestos gaseosos, por los cuales el haz de luz 170 se atenúa a un haz de luz atenuado 175 y
- detectar un primer valor indicativo de una primera intensidad  $I_{k0}$  del haz de luz atenuado 175,
- generar un pulso de luz 710, en donde el pulso de luz 710 comprende fotones 515 que tienen una primera longitud de onda de pulso  $\lambda_{p1}$ ,
- disociar al menos parte de las (i) moléculas de compuesto gaseoso o (ii) moléculas de compuesto gaseoso excitadas en la primera trayectoria óptica 160 en átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte y en otra parte utilizando el pulso de luz 710, por lo cual el haz de luz 170 se atenúa adicionalmente a un haz de luz atenuado 175 por absorción a los átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte en la primera trayectoria óptica 160,
- detectar un segundo valor indicativo de una segunda intensidad  $I_k$ , del haz de luz atenuado 175,
- determinar, utilizando el primer valor y el segundo valor, el contenido de un primer contenido de compuesto gaseoso de la mezcla gaseosa,
- opcionalmente detectar un tercer valor indicativo de una intensidad  $I_{k0}$  del haz de luz atenuado 175,
- generar otro pulso de luz, en donde el otro pulso de luz comprende fotones 515 que tienen otra longitud de onda de pulso  $\lambda_{p1,1}$ ,
- disociar al menos parte de las (i) moléculas del segundo compuesto gaseoso o (ii) moléculas del segundo compuesto gaseoso excitado en la primera trayectoria óptica 160 utilizando otro pulso de luz, por lo cual el haz de luz 170 se atenúa adicionalmente a un haz de luz atenuado 175 por producto de disociación de absorción en la primera trayectoria óptica 160,
- detectar un cuarto valor indicativo de una segunda intensidad  $I_k$ , del haz de luz atenuado 175,
- determinar, utilizando el cuarto valor y al menos uno del primer valor y el tercer valor, el contenido del segundo contenido de compuesto gaseoso de la mezcla gaseosa.

En algunos casos las condiciones de medición son estables, por las cuales la intensidad del haz de luz atenuado,  $I_{k0}$ , es esencialmente constante. En dichas condiciones estables solo una medición de la intensidad es suficiente. Por ende, el contenido del segundo contenido de compuesto gaseoso de la mezcla gaseosa puede determinarse utilizando el cuarto valor y el primer valor. Sin embargo, si las condiciones no son estables, la intensidad  $I_{k0}$  fluctúa. En estas condiciones, el tercer valor necesita medirse. Por ende, el contenido del segundo contenido de compuesto gaseoso de la mezcla gaseosa puede determinarse utilizando el cuarto valor y el tercer valor. También, el primer y el tercer valor pueden utilizarse para describir la intensidad atenuada  $I_{k0}$ . Por ejemplo puede utilizarse su valor promedio.

Las moléculas de gas que pueden medirse utilizando solamente un pulso de luz disociativo incluyen hidróxidos alcalinos de la forma MOH, en donde M es un átomo alcalino (metal), excluyendo hidrógeno, del grupo IA de la tabla periódica de los elementos; monóxidos de metal, tales como PbO, NiO, MnO y CrO; sales de polihaluro de metal disociadas térmicamente, tales como PbCl, HgCl; sales de polihaluro de metales, tales PbCl<sub>2</sub>; y óxido de nitrógeno NO<sub>2</sub>. Más aun, el método puede aplicarse para mediciones de sulfuros de metal, en donde el sulfuro de metal tiene la forma M<sup>1</sup>S, en donde M<sup>1</sup> es un metal y S es un átomo de azufre, por ejemplo PbS, ZnS, SnS y CuS. Más aun, otros ejemplos incluyen carbonatos, por ejemplo carbonatos de metal tales como carbonato de potasio (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) y sulfatos, por ejemplo sulfatos de metal tales como sulfato de potasio (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Un único átomo de potasio puede disociarse de estos compuestos con un pulso. Más aun, algunos polihaluros, por ejemplo SCl<sub>2</sub>, TeBr<sub>2</sub>, PbBr<sub>2</sub> y Pbl<sub>2</sub> pueden disociarse a un átomo y a dos átomos de halógeno con un único pulso.

Se comprende que estos gases son solo ejemplos y el mismo principio puede aplicarse a muchos otros gases.

En cuanto a los polihaluros de metal, especialmente PbCl<sub>2</sub>, el PbCl radical tiene banda de absorción en el ultravioleta profundo, que posee algunas limitaciones para la fuente de haz de luz. A continuación se describirá otra posibilidad para la medición de PbCl<sub>2</sub>. El óxido de nitrógeno NO<sub>2</sub> puede disociarse a monóxido de nitrógeno NO y átomo de oxígeno O utilizando una longitud de onda de pulso de 250 nm a 410 nm. El monóxido de nitrógeno NO tiene picos de absorción relativamente fuertes en el rango de longitud de onda de 203 nm a 227 nm.

En una realización, el método se utiliza para medir el contenido de un compuesto gaseoso de una mezcla gaseosa, en donde el compuesto gaseoso consiste en moléculas de compuesto gaseoso 510 que comprenden al menos tres átomos. En esta realización, el método comprende disociar una molécula de compuesto gaseoso 510 que comprende al menos tres átomos.

#### *Dispositivo de medición, disociación de un único paso*

La Figura 5a muestra una realización de un dispositivo 990 para medir el contenido de un compuesto gaseoso en una mezcla gaseosa utilizando un pulso de luz disociativo. El dispositivo comprende una fuente de haz de luz 310. La fuente de haz de luz 310 está dispuesta para generar luz que comprende fotones que tienen una longitud de onda de haz de  $\lambda_b$ . La fuente de haz de luz 310 puede producir un haz de luz monocromático o esencialmente

monocromático 170. La fuente de haz de luz 310 puede producir un haz de luz coherente o esencialmente coherente 170. Cabe destacar que incluso si se utiliza un láser como la fuente de luz 310, con lo cual el haz de luz 170 es esencialmente coherente, la dispersión de las partículas en el gas de combustión en el espacio 110 amplía el haz de luz en el espacio 110. Como se describió anteriormente, la fuente de haz de luz 310 puede disponerse para generar pulsos de luz.

Como el contenido del compuesto gaseoso se mide del contenido de la primera parte 520 (Figura 2a) de la molécula de gas, en donde la primera parte 520 se genera mediante disociación, la longitud de onda  $\lambda_b$  de haz del haz de luz 170 se selecciona de modo que pueda medirse el contenido de la primera parte. Como el contenido se mide desde la absorción, el contenido del compuesto gaseoso en la primera trayectoria óptica 160 queda medido. La primera trayectoria óptica pasa a través del espacio 110 que contiene la mezcla gaseosa.

El haz de luz 170 tiene una sección transversal y la sección transversal tiene una primera dimensión  $l_1$  y una segunda dimensión  $l_2$ , en donde la segunda dimensión es perpendicular a la primera dimensión. Las orientaciones para las dimensiones se seleccionan de modo que la primera dimensión es la más pequeña de la primera y la segunda dimensión, es decir  $l_1 = \min(l_1, l_2)$ . Las dimensiones pueden ser iguales, por ejemplo el haz puede ser circular. En teoría no existe un límite para las dimensiones del haz de luz 170. Sin embargo, un haz de luz angosto se expande más en el espacio 110 que en un haz de luz amplio. Por ejemplo, la turbulencia en el espacio 110 afecta la distribución de temperatura en la trayectoria óptica, afectando así el coeficiente de refracción para la luz y afectando además el viaje del haz de luz. Más aun, un haz de luz muy amplio puede disminuir la sensibilidad del método. La primera dimensión del haz de luz puede estar por ejemplo en el rango de 1 mm a 100 mm. La primera dimensión  $l_1$  del haz de luz es preferiblemente de 20 mm a 50 mm. En algunas realizaciones de la invención el haz de luz 170 tiene una sección transversal esencialmente circular. En estas realizaciones, el radio del haz de luz 170 está preferiblemente en el rango de 10 mm a 25 mm.

El dispositivo 990 de la Figura 5a comprende además una fuente de pulso de luz 700. La fuente de pulso de luz está dispuesta para emitir pulsos de luz 710 que comprenden fotones de alta energía 515 (Figura 2a) de modo que al menos algunos de los fotones disocian las moléculas de gas o las moléculas de gas excitadas en la primera trayectoria óptica 160. La fuente de pulso de luz 700 puede disponerse para emitir pulsos de luz 710 que comprenden fotones que tienen una longitud de onda  $\lambda_{p1}$ , en donde  $\lambda_{p1}$  es lo suficientemente corta como para disociar las moléculas de gas 510 (Figura 2a). Los pulsos de luz disocian al menos parte de las moléculas de gas a una primera parte y una segunda parte, como se describió anteriormente. Al menos parte de los pulsos de luz son guiados a la primera trayectoria óptica 160. Mientras el pulso de luz 710 o una parte del pulso de luz 710 viaja por la primera trayectoria óptica 160, al menos parte de las moléculas de gas 510 (Figura 2a) en la primera trayectoria óptica 160 se disocian a la primera parte 520 y la segunda parte 525.

En la realización de la Figura 5a, la fuente de pulso de luz 700 puede ser, por ejemplo, una fuente de destellos de xenón. El pulso de luz 710 puede emitirse a básicamente todos los ángulos al espacio 110 al mismo tiempo.

El dispositivo 990 comprende además un fotodetector 320. El fotodetector está dispuesto para detectar la intensidad del haz de luz atenuado 175. El haz de luz atenuado comprende fotones que tienen la longitud de onda  $\lambda_b$ .

En la realización de la Figura 5a, la fuente de haz de luz 310, la fuente de pulso de luz 710 y el fotodetector 320 están ubicados en el exterior del espacio 110, es decir fuera de las paredes 102. Sin embargo, en otra realización, al menos uno de los componentes está ubicado en el interior del espacio 110, por ejemplo para detectar compuestos gaseosos del ambiente.

La Figura 5b muestra otras realizaciones del dispositivo. En la Figura 5b, el pulso de luz 710 es guiado a una segunda trayectoria óptica 800. La segunda trayectoria óptica 800 cruza la primera trayectoria óptica 160. Más aun, el ángulo del pulso de luz,  $\alpha$ , es ajustable. Por lo tanto, el ángulo  $\alpha$  define la posición en la cual la segunda trayectoria óptica 800 cruza la primera trayectoria óptica 160. De este modo, el método se vuelve sensible a la posición. En la realización, las moléculas de gas están disociadas en la segunda trayectoria óptica 800. Sin embargo, la disociación afecta la intensidad del haz de luz atenuado 175 sólo en el caso en que las moléculas de gas están disociadas también en la primera trayectoria óptica 160. Por lo tanto, el contenido de la primera parte se mide desde el volumen, donde la segunda trayectoria óptica 800 cruza la primera trayectoria óptica 160. Debido a que el ángulo  $\alpha$  es ajustable, el contenido de la primera parte en todas las posiciones en la primera trayectoria óptica 160 puede medirse. También es posible hacer mediciones sensibles a la posición utilizando trayectorias ópticas esencialmente perpendiculares 160 y 800 y utilizando una fuente de pulso de luz móvil.

La Figura 5c muestra una realización preferida de la invención utilizando un pulso de luz para disociar una molécula de gas. El dispositivo 990 de la Figura 5c comprende:

- una fuente de haz de luz 310, dispuesta para emitir un haz de luz monocromático y coherente 170 que tiene la longitud de onda de haz  $\lambda_b$ ,
- una fuente de pulso de luz 700, dispuesta para emitir un pulso de luz monocromático y coherente 710 que tiene la longitud de onda de pulso  $\lambda_{p1}$ ,

- un primer elemento óptico 740, dispuesto para guiar

- o el haz de luz 170 a una primera trayectoria óptica 160 y
- o el pulso de luz 710 a una segunda trayectoria óptica 800 de modo que la segunda trayectoria óptica 800 se superpone a la primera trayectoria óptica 160,

- un segundo elemento óptico 742, dispuesto para pasar el haz de luz atenuado 175, es decir la luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_b$  y desviar, reflejar o absorber el pulso de luz atenuado 715, es decir luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p1}$ ,

- un tercer elemento óptico 744, dispuesto para reflejar una primera parte de luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p1}$  y pasar una segunda parte de luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p1}$ ,

- un primer fotodetector 320, dispuesto para detectar la intensidad del haz de luz atenuado 175 que tiene la longitud de onda  $\lambda_b$ ,

- una lente 746, dispuesta para hacer converger el haz de luz atenuado 175 al primer fotodetector 320,

- un segundo fotodetector 720, dispuesto para detectar la intensidad del pulso de luz atenuado 715, teniendo el pulso de luz atenuado la longitud de onda  $\lambda_{p1}$ ,

- un tercer fotodetector 722, dispuesto para detectar la intensidad de luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p1}$  y

- una unidad de procesamiento de datos 910, en donde la unidad de procesamiento de datos está dispuesta para calcular el contenido de compuesto gaseoso en la mezcla gaseosa utilizando un primer valor, siendo el primer valor indicativo de una primera intensidad  $I_{k0}$  del haz de luz atenuado 175 en el fotodetector 320 y un segundo valor, siendo el segundo valor indicativo de una segunda intensidad  $I_k$  del haz de luz atenuado 175 en el fotodetector 320.

La Figura 5c también muestra, aunque no son componentes del dispositivo 990,

- paredes 102 que definen un espacio 110 en el interior, el espacio 110 dispuesto para contener la mezcla gaseosa,

- una primera ventana 140d1, dispuesta para pasar el pulso de luz 710 y el haz de luz 170 al espacio 110 y retener la mezcla gaseosa dentro del espacio 110, y

- una segunda ventana 140d2, dispuesta para pasar el pulso de luz 710 y el haz de luz 170 desde el espacio 110 y retener la mezcla gaseosa dentro del espacio 110.

Cabe destacar que la intensidad o la energía del pulso de luz atenuado 715 no se mide necesariamente y, por lo tanto, el segundo fotodetector 720 puede omitirse. El tercer elemento óptico 744 y el tercer fotodetector 722 están dispuestos para medir la intensidad o energía del pulso de luz 710. La intensidad o la energía del pulso de luz 710 no se mide necesariamente y, por lo tanto, el tercer fotodetector 722 y el tercer elemento óptico 744 pueden omitirse. Además, el dispositivo puede comprender otros elementos ópticos tales como lentes para hacer converger la primera parte del pulso de luz 710 con el tercer fotodetector o el pulso de luz atenuado 715 con el segundo fotodetector. Otros ejemplos de dichos elementos ópticos de guías de onda ópticas, por ejemplo, fibras ópticas, dispuestas para guiar la luz y/o afectar un ángulo o una posición de un haz de luz o pulso de luz.

Como se describió anteriormente, la segunda trayectoria óptica 800 se superpone a la primera trayectoria óptica 160. Con referencia a la Figura 5c, la segunda trayectoria óptica 800 se superpone a la primera trayectoria óptica 160 por ejemplo cuando las trayectorias ópticas son esencialmente paralelas y concéntricas. Las trayectorias ópticas también pueden ser esencialmente paralelas, pero los ejes centrales pueden cambiarse con respecto uno con el otro. El término esencialmente paralelo puede interpretarse de modo que la primera trayectoria óptica 160 es esencialmente paralela a la segunda trayectoria óptica 800 si

- las trayectorias ópticas son paralelas o

- las trayectorias ópticas están alineadas de modo tal que el haz de luz 170 y el pulso de luz 710 se superponen al menos parcialmente en todos los puntos entre

- o un punto de partida, en donde el punto de partida es uno del primer elemento óptico 740 y la fuente de haz de luz 310, cualquiera que esté comprendido por el dispositivo y

- o un punto final, en donde el punto final es uno de la segunda salida óptica 140d2, el elemento óptico 742, los lentes 746 y el primer fotodetector 320, cualquiera que esté comprendido por el dispositivo, en donde

- o los componentes que definen los puntos de partida y final se seleccionan de modo que la longitud entre el punto de partida y el punto final sea la más corta de las diferentes posibilidades o

- el ángulo entre el eje central de la primera trayectoria óptica 160 y el eje central de la segunda trayectoria óptica sea menor que 5 grados.

La expresión "se superpone al menos parcialmente en todos los puntos" debe comprenderse de la siguiente manera: el punto (al que se hace referencia) es un punto del eje central de la primera trayectoria óptica. Por el contrario, el

eje central de la primera trayectoria óptica define un conjunto de puntos. Mientras la luz viaja de manera recta, el eje central define un plano que es perpendicular al eje central. En este plano, la primera trayectoria óptica 160 define una primera área de sección transversal, es decir un primer conjunto de puntos. En este plano, la segunda trayectoria óptica 180 define una segunda área de sección transversal, es decir un segundo conjunto de puntos. Las trayectorias ópticas se superponen parcialmente, con respecto a este punto y plano, cuando el primer conjunto de puntos comprende al menos parte de los puntos del segundo conjunto de puntos. La más corta de las trayectorias posibles se selecciona como se describió anteriormente, ya que (haciendo referencia a la Figura 5c) evidentemente el haz y el pulso no se superponen antes, por ejemplo, del elemento óptico 740.

La sección transversal del haz de luz y el pulso de luz se comprende de la siguiente manera. La intensidad del haz de luz típicamente tiene un máximo en el eje central del haz de luz y la intensidad disminuye a medida que la distancia desde el eje central aumenta. Típicamente la disminución es exponencial. Se asume que el haz de luz está ubicado en los puntos, en donde la intensidad es al menos  $1/e$  de la intensidad máxima.  $1/e$  es aproximadamente 37 %. A partir de esto, se determina la sección transversal del haz de luz. La intensidad del pulso de luz típicamente tiene un máximo en el eje central del pulso de luz y la intensidad disminuye a medida que la distancia desde el eje central aumenta. Típicamente la disminución es exponencial. A partir de esto, se determina la sección transversal del pulso de luz. El perfil de intensidad también puede tener una forma diferente, por ejemplo el perfil de intensidad puede comprender múltiples picos. Más aun, un pico de intensidad no está ubicado necesariamente en el eje central.

El haz de luz 170 puede tener un primer radio  $r_1$  de 0,5 mm a 50 mm. El pulso de luz 710 también puede ser coherente y tener una sección transversal. La sección transversal del pulso de luz tiene una primera dimensión  $d_1$  y una segunda dimensión  $d_2$ , en donde la segunda dimensión es perpendicular a la primera dimensión. Las orientaciones para las dimensiones se seleccionan de modo que la primera dimensión es la más pequeña de la primera y la segunda dimensión, es decir  $d_1 = \min(d_1, d_2)$ . La primera dimensión puede ser igual a la segunda. En teoría no existe un límite para las dimensiones del pulso de luz 710. Sin embargo, como se verá, las dimensiones del pulso de luz afectan la sensibilidad del método. El método es más sensible si se utiliza un pulso de luz angosto 710. Más aun, un pulso de luz muy amplio puede ser difícil de generar. La primera dimensión del pulso de luz puede estar por ejemplo en el rango de 1 mm a 100 mm. La primera dimensión del pulso de luz es preferiblemente de 20 mm a 50 mm. Más preferiblemente, la sección transversal del pulso de luz 710 es mayor que la sección transversal del haz de luz 170, de modo que el pulso de luz 710, cuando está presente, rodea el haz de luz 170. El pulso de luz 710 puede tener una sección transversal circular, por lo cual el pulso de luz puede tener un segundo radio  $r_2$  de 0,5 mm a 50 mm. El primer y segundo radio también pueden ser iguales o aproximadamente iguales. Preferiblemente el radio del pulso de luz,  $r_2$ , es 1 mm - 2 mm mayor que el radio del haz de luz,  $r_1$ . Preferiblemente el perfil de intensidad del pulso de luz 710 es espacialmente uniforme. La expresión espacialmente uniforme se refiere a un perfil de intensidad que es uniforme en el área de sección transversal del pulso. El área de sección transversal se refiere al área de la sección transversal del pulso, como se definió anteriormente en el contexto de la expresión al menos parcialmente superpuesto. El término uniforme como tal se refiere a una distribución que tiene esencialmente solo un único valor. (Naturalmente, la intensidad fuera del haz es cero). La intensidad espacialmente uniforme simplifica los cálculos del contenido de compuesto gaseoso. Típicamente el perfil de intensidad del pulso de luz 710 espacialmente disminuye exponencialmente con la distancia desde el eje central del pulso de luz 710. En estos casos el área de sección transversal se refiere al área de la sección transversal del pulso, en donde el pulso se considera que está ubicado en los puntos, en donde la intensidad del pulso es al menos  $1/e$  de la intensidad máxima. Aquí  $1/e$  es aproximadamente 37%. Para los cálculos del contenido de compuesto gaseoso, la intensidad exponencialmente decreciente es razonablemente uniforme. El perfil de intensidad también puede tener una forma diferente, por ejemplo el perfil de intensidad puede comprender múltiples picos. Más aun, un pico de intensidad no está ubicado necesariamente en el eje central. En caso de que el perfil de intensidad difiera significativamente de uniforme, puede utilizarse un área efectiva por ejemplo en la ecuación 4 (a ser presentada más adelante). De este modo, en lugar de  $A_p$  en el radio  $A_p/E_{op1}$ , el área efectiva puede utilizarse para tomar en cuenta las variaciones en intensidad.

El eje central de la primera trayectoria óptica 160 puede cambiarse con respecto al eje central de la segunda trayectoria óptica 800 por una distancia  $d$ . La distancia debe ser menor que la suma de los radios, es decir  $d < r_1 + r_2$ . Preferiblemente la distancia debe ser menor que el menor de los radios, es decir  $d < \min(r_1, r_2)$ . Las trayectorias ópticas 160, 800 son consideradas esencialmente concéntricas, si la distancia entre los ejes centrales de las trayectorias ópticas 160, 800 es menos de 25% de la más pequeña de las siguientes: dimensión más pequeña del haz de luz 170 y dimensión más pequeña del pulso de luz 710. Por ejemplo, las trayectorias ópticas 160, 800 son consideradas esencialmente concéntricas, si la distancia entre los ejes centrales de las trayectorias ópticas 160, 800 es menor que  $0,25 \times \min(2r_1, 2r_2)$ . La distancia entre las trayectorias ópticas 160, 800 puede considerarse la distancia mínima entre los ejes centrales de las trayectorias ópticas 160, 800. Las trayectorias ópticas concéntricas son esencialmente concéntricas. Las trayectorias ópticas 160, 800 pueden ser esencialmente concéntricas, si son esencialmente paralelas.

En caso de que uno de los ejes centrales de las trayectorias ópticas se encuentre elevado con respecto al otro o en el caso donde exista un ángulo entre los ejes centrales de las trayectorias ópticas, puede ser posible omitir el segundo elemento óptico 742 del dispositivo. En este caso, puede ser posible ubicar el primer fotodetector 320 de

modo que el pulso de luz atenuado 715 evite el primer fotodetector 320 y el haz de luz atenuado 175 golpee el primer fotodetector 320. La fuente de pulso de luz 700 puede ser, por ejemplo, uno de los siguientes

- 5 - un láser de pulso,
- una fuente de destellos de xenón,
- un láser continuo con un interruptor,
- un láser continuo operado en modo de pulsos,
- un diodo emisor de luz (LED) operado en modo de pulsos,
- 10 - un LED continuo con un interruptor,
- una fuente de luz continua operada en modo de pulsos, y
- una fuente de luz continua con un interruptor.

15 Algunas de las fuentes de luz pueden operarse en un modo de pulsos utilizando una corriente de excitación en modo de pulsos. Un interruptor puede comprender por ejemplo un disco opaco de rotación, comprendiendo el disco una ranura dispuesta para pasar luz a través de la ranura. Cuando la luz se dirige hacia el disco, se genera un pulso de luz cuando la luz pasa la ranura del disco opaco de otra manera.

20 La duración del pulso de luz es preferiblemente menor que el tiempo de recuperación de los átomos alcalinos, que puede ser del orden de 2  $\mu$ s o más largo. Preferiblemente la duración del pulso de luz es corta, por ejemplo, a lo sumo 100 ns; más preferiblemente a lo sumo 10 ns e inclusive más preferiblemente a lo sumo 1 ns. La duración del pulso de luz puede seleccionarse de acuerdo con la fuente de luz. Por ejemplo, un láser de pulso tiene típicamente una duración de pulso de 1 fs ( $10^{-15}$  s) a 100 ns ( $100 \times 10^{-9}$  s): Los láseres que emiten pulsos muy cortos están típicamente en modo bloqueado y pueden emitir series de pulsos en lugar de únicos pulsos de luz. Un destello de xenón puede tener una duración de pulso del orden de 1  $\mu$ s. El tiempo entre los pulsos posteriores, es decir el tiempo entre el final de un pulso y el comienzo de un pulso posterior, es preferiblemente significativamente mayor que el tiempo de recuperación de las partes del gas, que puede ser del orden de 2  $\mu$ s. Sin embargo, el tiempo de recuperación depende del compuesto gaseoso a medir y del ambiente. Por ejemplo, la vida útil del plomo (se presentará más adelante) es muy corta, con lo cual el tiempo de recuperación puede ser de solo unos pocos ns. El tiempo entre los pulsos posteriores no es necesariamente mayor que el tiempo de recuperación de las partes de las moléculas de gas. En una realización, el tiempo entre los pulsos posteriores fue 1 s. El tiempo entre los pulsos posteriores no necesita ser mayor que el tiempo de recuperación. En caso de que un pulso sea emitido durante el periodo de recuperación, esto afecta la intensidad atenuada  $I_{k0}$ , que en ese caso es levemente atenuada también debido a los átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte en la trayectoria óptica debido al pulso de luz disociativo previo.

35 El primer elemento óptico 740 se dispone para guiar el haz de luz 170 a una primera trayectoria óptica 160 y el pulso de luz 710 a una segunda trayectoria óptica 800 de modo que la segunda trayectoria óptica 800 se superponga a la primera trayectoria óptica 160. El primer elemento óptico 740 puede ser, por ejemplo, un reflector selectivo de longitud de onda que opera como un espejo para la longitud de onda  $\lambda_{p1}$  y como un objeto transparente para la longitud de onda  $\lambda_b$ , como se muestra en la Figura 5c. En una configuración diferente, el primer elemento óptico 740 podría reflejar la luz que tiene una longitud de onda larga y pasar luz que tiene una longitud de onda corta. El primer elemento óptico puede seleccionarse de una variedad de elementos ópticos conocidos. Por ejemplo, un prisma o una red también pueden operar como un reflector selectivo de longitud de onda. Un acoplador de fibra también puede operar como el primer elemento óptico.

45 El segundo elemento óptico 742 está dispuesto para pasar el haz de luz atenuado 175 y desviar, reflejar o absorber el pulso de luz atenuado 715. El segundo elemento óptico 742 está dispuesto para pasar luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_b$  al fotodetector 320. El segundo elemento óptico 742 también está dispuesto para evitar que el pulso de luz atenuado 715 ingrese al fotodetector 320. El segundo elemento óptico 742 puede ser cualquiera de aquellos que pueden utilizarse como el primer elemento óptico 740. El segundo elemento óptico también puede ser un filtro dispuesto para absorber luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p1}$ . En este caso, el dispositivo no comprende el segundo fotodetector 720.

50 El tercer elemento óptico 744 está dispuesto para reflejar una primera parte conocida (pequeña) de luz que golpea la superficie del tercer elemento óptico 744 y para pasar una segunda parte de la luz. De este modo, al medir la intensidad (o energía) de la primera parte reflejada del pulso de luz 710 utilizando el tercer fotodetector 722, puede calcularse la intensidad (o energía) de la segunda parte del pulso de luz 710.

55 Haciendo referencia a las Figuras 2a, 4c y 5c, una primera intensidad  $I_{k0}$  del haz de luz atenuado 175 se mide con el fotodetector 320 antes de emitir un pulso de luz 710. Además, después de disociar al menos parte de las moléculas de gas 525 en la primera trayectoria óptica 160 con el pulso de luz 710, se detecta una segunda intensidad  $I_k$  del haz de luz atenuado 175. El haz de luz 170 se atenúa, entre otras cosas, al haz de luz atenuado 175 mediante absorción de los átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte 520.

Ya que el pulso de luz 710 o haz de luz 170 no son necesariamente monocromáticos y todos los componentes que se muestran en la Figura 5c no son necesarios para llevar a cabo el método, un dispositivo 990 para medir el contenido de un compuesto gaseoso en una mezcla gaseosa comprende:

- 5           - una fuente de haz de luz 310, dispuesta para emitir un haz de luz 170 que comprende fotones con una longitud de onda de haz  $\lambda_b$ ,
- un fotodetector 320, dispuesto para detectar la intensidad de un haz de luz atenuado 175, en donde
- 10           o una primera trayectoria óptica 160 está ubicada entre el fotodetector 320 y la fuente de haz de luz 310,
- o la primera trayectoria óptica 160 pasa a través de un espacio 110 dispuesto para contener la mezcla gaseosa, y
- o el haz de luz 170 está dispuesto para atenuarse al haz de luz atenuado 175 en el espacio 110,
- 15           y el dispositivo comprende además
- una fuente de pulso de luz 700, en donde
- 20           o la fuente de pulso de luz 700 está dispuesta para generar un pulso de luz 710 que comprende fotones que tienen una segunda longitud de onda  $\lambda_{p1}$ , al menos parte de los fotones disocian al menos parte de (i) las moléculas de gas 510 o (ii) las moléculas de gas excitadas 510b en la primera trayectoria óptica 160 a una primera parte 520 y una segunda parte 525, y
- 25           - el fotodetector 320 está dispuesto para detectar, durante un periodo de recuperación, un segundo valor indicativo de una segunda intensidad  $I_k$  del haz de luz atenuado 175, en donde el haz de luz 170 se atenúa adicionalmente al haz de luz atenuado 175 mediante la absorción a los átomos o moléculas de la primera parte en la primera trayectoria óptica 160.

30           El contenido gaseoso puede calcularse en una unidad de procesamiento de datos 910 que recibe un primer valor, siendo el primer valor indicativo de una primera intensidad  $I_{k0}$  del haz de luz atenuado 175 en el fotodetector 320 y un segundo valor, siendo el segundo valor indicativo de una segunda intensidad  $I_k$  del haz de luz atenuado 175 en el fotodetector 320. La unidad de procesamiento de datos 910 puede comprenderse en el dispositivo 990 para medir el contenido gaseoso. En caso de que la unidad de procesamiento de datos esté ubicada lejos del fotodetector 320, el dispositivo 990 puede ser relativamente grande en tamaño. De este modo, el dispositivo 990 puede comprender

35           además

- 40           - una unidad de procesamiento de datos 910, en donde la unidad de procesamiento de datos está dispuesta para calcular el contenido gaseoso utilizando un primer valor, siendo el primer valor indicativo de una primera intensidad ( $I_{k0}$ ) del haz de luz atenuado (175) en el fotodetector (320) y un segundo valor, siendo el segundo valor indicativo de una segunda intensidad ( $I_k$ ) del haz de luz atenuado (175) en el fotodetector (320).

45           El dispositivo 990 puede estar dispuesto para medir el contenido de un compuesto gaseoso en la mezcla gaseosa, en donde el compuesto gaseoso no es un haluro alcalino. Por lo tanto, el dispositivo puede estar dispuesto para medir el contenido de un compuesto gaseoso de una mezcla gaseosa, en donde el compuesto gaseoso consiste en moléculas de compuesto gaseoso 510 y la molécula de compuesto gaseoso no es una molécula de haluro alcalino, en donde la molécula de haluro alcalino tiene forma  $MH^a$ , en donde M es un átomo de metal alcalino del grupo de Li, Na, K, Ru, Cs y Fr, y  $H^a$  es un átomo de halógeno del grupo de F, Cl, Br, I y At. El dispositivo puede estar dispuesto de tal manera mediante una selección apropiada de las longitudes de onda, como se describió anteriormente. De este modo, la fuente de haz de luz 310 o la fuente de haz de luz 310 y la fuente de pulso de luz 700 en combinación

50           están dispuestas para emitir luz un pulso de luz o un pulso de luz y haz de luz, en donde la longitud de onda del pulso o el pulso y el haz se seleccionan de tal modo que

- 55           - al menos parte de las moléculas de compuesto gaseoso están disociadas con el pulso de luz 710 y ninguna molécula de haluro alcalino está disociada con el pulso de luz 710 o
- al menos parte de las moléculas de compuesto gaseoso están disociadas con el pulso de luz 710 y esencialmente ninguna molécula de haluro alcalino está disociada con el pulso de luz o
- (a) al menos parte de las moléculas de compuesto gaseoso están disociadas con el pulso de luz 710 y al menos algunas moléculas de haluro alcalino están disociadas con el pulso de luz y
- 60           (b) la longitud de onda del haz de luz se selecciona de modo que no corresponda a un pico de absorción del átomo de metal alcalino (M) que resulta de la disociación de una molécula de haluro alcalino.

65           Más aun, las longitudes de onda del dispositivo pueden seleccionarse de modo que no entren en conflicto con la técnica anterior. Estas longitudes de onda se describieron en detalle anteriormente en el contexto con el método.

Más aun, el pulso de luz puede disponerse para disociar una molécula de compuesto gaseoso, en donde la molécula de compuesto gaseoso no es un haluro alcalino. Más aun, el pulso de luz puede disponerse para disociar una molécula de compuesto gaseoso, en donde la molécula de compuesto gaseoso comprende al menos tres átomos.

5 Incluso si no se muestra en las figuras 5a-5c, el dispositivo puede comprender una fuente de haz de luz dispuesta para emitir luz que comprende fotones que tienen una primera longitud de onda de haz  $\lambda_{b1}$  y fotones que tienen una segunda longitud de onda de haz  $\lambda_{b2}$ . La primera longitud de onda de haz puede corresponder a un pico de absorción de un primer compuesto gaseoso. La segunda longitud de onda de haz puede corresponder a un pico de absorción de un segundo compuesto gaseoso.

10 El dispositivo 990 puede comprender un fotodetector 320 que está dispuesto para medir la intensidad del haz de luz atenuado o atenuado adicionalmente, en dos longitudes de onda diferentes. Estas longitudes de onda pueden corresponder a la primera longitud de onda de haz  $\lambda_{b1}$  y a la segunda longitud de onda de haz  $\lambda_{b2}$ . Los valores indicativos de la intensidad en la primera longitud de onda de haz  $\lambda_{b1}$  pueden ser el valor primero y segundo, como se describió en el contexto del método. Los valores indicativos de la intensidad en la segunda longitud de onda de haz  $\lambda_{b2}$  pueden ser el valor tercero y cuarto, como se describió en el contexto del método.

15 El dispositivo 990 puede comprender dos fotodetectores, en donde el primero de estos dos fotodetectores está dispuesto para medir la intensidad del haz de luz atenuado o atenuado adicionalmente en la primera longitud de onda de haz  $\lambda_{b1}$  y el segundo de estos dos fotodetectores está dispuesto para medir la intensidad del haz de luz atenuado o atenuado adicionalmente, en la segunda longitud de onda de haz. Los valores indicativos de la intensidad en la primera longitud de onda de haz  $\lambda_{b1}$  pueden ser el valor primero y segundo, como se describió en el contexto del método. Los valores indicativos de la intensidad en la segunda longitud de onda de haz  $\lambda_{b2}$  pueden ser el valor tercero y cuarto, como se describió en el contexto del método.

20 Alternativamente, incluso si no se muestra en las figuras 5a-5c, el dispositivo puede comprender otra fuente de haz de luz dispuesta para emitir fotones que comprenden luz que tienen una segunda longitud de onda de haz  $\lambda_{b2}$ . La longitud de onda del haz  $\lambda_b$ , como se describe en el contexto de las Figuras 5a a 5c, puede corresponder a un pico de absorción de un primer compuesto gaseoso. La segunda longitud de onda de haz  $\lambda_{b2}$  puede corresponder a un pico de absorción de un segundo compuesto gaseoso. Estos temas también fueron descritos en conexión con el método.

25 El dispositivo 990 puede comprender un fotodetector 320 que está dispuesto para medir la intensidad del primero y segundo haz de luz atenuado o atenuado adicionalmente. Los valores indicativos de la intensidad del primer haz de luz atenuado pueden ser el valor primero y segundo, como se describió en el contexto del método. Los valores indicativos de la intensidad en la segunda longitud de onda de haz de luz atenuado pueden ser el valor tercero y cuarto, como se describió en el contexto del método.

30 El dispositivo 990 puede comprender dos fotodetectores, en donde el primero de estos dos fotodetectores está dispuesto para medir la intensidad del primer haz de luz atenuado, o atenuado adicionalmente y el segundo de estos dos fotodetectores está dispuesto para medir la intensidad del segundo haz de luz atenuado, o atenuado adicionalmente. Los valores indicativos de la intensidad del primer haz de luz atenuado pueden ser el valor primero y segundo, como se describió en el contexto del método. Los valores indicativos de la intensidad en la segunda longitud de onda de haz de luz atenuado pueden ser el valor tercero y cuarto, como se describió en el contexto del método.

35 El dispositivo 990 puede comprender además otra fuente de pulso de luz u otros medios para formar otro pulso de luz. La otra fuente de pulso de luz puede disponerse para emitir el otro pulso de luz que comprende fotones 515 que tienen la otra longitud de onda de pulso  $\lambda_{p1,1}$ . El otro pulso puede utilizarse para disociar una segunda molécula de compuesto gaseoso, como se describió en el contexto del método.

40 Más aun, si se utiliza excitación de dos fotones o excitación de múltiples fotones para disociar la molécula de gas (Figura 2b), el dispositivo puede comprender medios para formar otro pulso de luz, de modo que al menos parte de los fotones del otro pulso de luz estén dispuestos para

- 45
- excitar la molécula de gas a una molécula de gas excitada o
  - excitar una parte disociada a una parte disociada excitada.

50 Los medios para formar otro pulso de luz pueden comprender un divisor de pulso de luz y un retardador de pulso de luz. Los medios para formar otro pulso de luz pueden comprender una fuente de pulso de luz. Una fuente de pulso de luz, como se describió en conexión con la primera fuente de pulso de luz, puede utilizarse la fuente de pulso de luz para excitar a las moléculas de gas o las partes excitadas.

55 Una ventaja del método es que la primera trayectoria óptica 160 (y posiblemente también la segunda trayectoria óptica 800) puede extenderse a través de una línea de gas (tubería, ducto, canal), desde una pared 102a1 a una pared opuesta 102a2, como se representa en la Figura 1a. Por lo tanto, el contenido gaseoso puede medirse *in*

situ desde la primera trayectoria óptica 160. De este modo, el problema de recoger una muestra representativa de la mezcla gaseosa para las mediciones puede evitarse simplemente mediante la omisión del muestreo.

*Contenido gaseoso, disociación de un único paso*

A continuación, se asume que el pulso de luz es monocromático o esencialmente monocromático. A continuación, se asume que la molécula del compuesto gaseoso 510 está excitada hasta el estado disociativo 512 con un único fotón 515 (Figura 2a). A continuación, el haz de luz se asume que sea monocromático o esencialmente monocromático. A partir de las intensidades atenuadas  $I_{k0}$  y  $I_k$ , el cálculo del contenido del compuesto gaseoso en la mezcla gaseosa puede realizarse de la siguiente manera:

La intensidad del haz de luz 170 se disminuye en el espacio 110 en la menos uno de los siguientes

- (i) absorción debido a átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte producidos en la disociación de moléculas de gas utilizando el pulso de luz 710,
- (ii) otros procesos tales como dispersión o absorción por otros compuestos o partículas y
- (iii) absorción debido a otros átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte producidos por otros procesos de disociación de las moléculas de gas, por ejemplo, producidos por disociación térmica.

Por lo tanto, para la intensidad medida antes de la disociación de moléculas de gas, se puede escribir  $I_{k0} = \varphi I_0$ , en donde  $I_{k0}$  es la intensidad observada del haz de luz atenuado 175 antes de la disociación,  $I_0$  es la intensidad del haz de luz 170 antes de ingresar al espacio 110 y  $\varphi$  es un factor de atenuación. El factor de atenuación  $\varphi$  toma en cuenta la atenuación del haz de luz debido a los procesos (ii) y (iii) anteriores. La Ley de Beer-Lambert puede aplicarse para describir la absorción mediante átomos o moléculas de la primera parte disociada. Por lo tanto, para la intensidad después de la disociación se puede escribir:

$$(1) I_k = \varphi \exp\left(-\xi_M \frac{N}{V} \sigma_M L\right) I_0 = I_{k0} \exp\left(-\xi_M \frac{N}{V} \sigma_M L\right)$$

en donde  $I_k$  es la intensidad del haz de luz atenuado 175 después de la disociación de las moléculas de gas por el pulso de luz 710,  $I_{k0}$  es la intensidad antes de la disociación,  $\xi_M$  es el contenido de la primera parte (como se mide en proporción, por ejemplo en ppm o ppmm; el superíndice M significa metal, la molécula de gas puede ser, por ejemplo, un hidróxido de metal), N es el número total de átomos y moléculas en un volumen V y  $\sigma_M$  es la sección transversal de absorción del átomo o molécula de la primera parte para el haz de luz que tiene longitud de onda  $\lambda_b$ . El volumen V se refiere al volumen en la primera trayectoria óptica 160 donde ocurre la disociación y N se refiere al número total de átomos y moléculas dentro de este volumen. L es la distancia en donde ocurre la absorción de luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_b$  con los átomos o moléculas de la primera parte. Por ejemplo si el haz de luz 170 y el pulso de luz tienen la misma sección transversal, son concéntricos y son paralelos, el volumen V es esencialmente el área de sección transversal de la luz o pulso multiplicada por la distancia L.

La primera parte (átomo, molécula, ión o radical) está presente en la primera trayectoria óptica 160 debido al proceso de disociación. Cada proceso de disociación utiliza la energía de un fotón quantum del pulso de luz 710. La energía de un fotón del pulso de luz monocromático 710 es  $hc/\lambda_{p1}$ . De este modo, el número de átomos alcalinos disociados puede escribirse de la siguiente manera:

$$(2) N_M = \xi_M N = \frac{E_{0p1} - E_{p1}}{hc / \lambda_{p1}}$$

en donde  $N_M$  es el número de átomos alcalinos,  $E_{0p1}$  es la energía del pulso de luz 710 que ingresa al espacio 110 (o la energía de la segunda parte del pulso de luz 710, si se utiliza el tercer elemento óptico 744) y  $E_{p1}$  es la energía del pulso de luz atenuado 715 que sale del espacio 110. Se asume que la disminución del pulso de energía  $E_{p0} - E_p$  se utiliza totalmente para disociar las moléculas de gas. Al aplicar la Ley de Beer-Lambert para el pulso de luz 710:

$$(3) E_{p1} = E_{0p1} \exp\left(-\xi_G \frac{N}{V} \sigma_G L\right)$$

en donde  $\xi_G$  es el contenido de compuesto gaseoso de interés (como se mide en proporción, por ejemplo en ppm o ppmm) y  $\sigma_G$  es la sección transversal de absorción para el compuesto gaseoso y el pulso de luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p1}$ . Por ejemplo, para NaOH a la temperatura 300 K la sección transversal de absorción  $\sigma_G$  para la longitud de onda 310 nm puede ser aproximadamente  $(1-10) \times 10^{-18} \text{cm}^2$ . Sin embargo, la temperatura afecta la sección transversal de absorción y, por lo tanto, este valor puede no ser aplicable a todos los casos de medición. Las secciones transversales de absorción  $\sigma_G$  y  $\sigma_M$  no dependen en gran medida de la temperatura, al menos para una temperatura por debajo de 2000°C. Por otro lado, el compuesto gaseoso debe estar en una forma gaseosa para la aplicabilidad del método. El método se utiliza preferiblemente para la mezcla gaseosa que se origina a partir de un

proceso térmico. De este modo, el método puede ser aplicable por ejemplo para una mezcla gaseosa que tiene una temperatura de hasta 2000°C y el método se utiliza preferiblemente para una mezcla gaseosa que tiene una temperatura en el rango de 300°C a 2000°C. En una temperatura más alta la dependencia de los parámetros de la temperatura debe tomarse en cuenta.

5 Al utilizar las ecuaciones (2) y (3), puede calcularse el número de moléculas de gas disociadas. La ecuación (3) describe cuánta energía del pulso de luz se utiliza para disociar las moléculas de gas y la ecuación (2) describe cómo esta energía está relacionada con el número de moléculas disociadas. El número de primeras partes inducidas por disociación puede ser relativamente bajo. El número depende por ejemplo de la energía del pulso de luz y también del contenido de moléculas de gas. Como ejemplo 1/10000 - 1/1000 de moléculas de gas 510 pueden disociarse con el pulso de luz 710.

La relación entre el número de moléculas o átomos y el volumen puede escribirse en términos de otras constantes utilizando la ley de gas ideal:  $pV=NkT$ , en donde  $p$  es la presión,  $T$  es la temperatura y  $k$  es la constante del gas.

Utilizando estas ecuaciones, se puede derivar una ecuación para el contenido gaseoso:

$$(4) \xi_G = -\ln \left[ 1 + \ln \left( 1 - \frac{I_{k0} - I_k}{I_{k0}} \right) \frac{hc / \lambda_{p1} A_p}{E_{0p1} \sigma_M} \right] \frac{kT}{p} \frac{1}{\sigma_G L}$$

20 en donde  $A_p$  es el área de sección transversal del pulso de luz 710. Como se describió anteriormente, cuando el perfil de intensidad es no uniforme, puede utilizarse un área efectiva  $A_{p,eff}$  en lugar de  $A_p$ . De este modo, para un pulso de luz coherente,  $A_p L$  es el volumen  $V$ , en donde las moléculas de gas se disocian. Un ejemplo de la distancia  $L$ , en donde ocurre la absorción de luz que tiene una longitud de onda  $\lambda_b$  con los componentes de la primera parte, se describe en la Figura 5c. En caso de que la primera trayectoria óptica 160 y la segunda trayectoria óptica 800 no sean paralelas (Figuras 5a y 5b), la distancia  $L$  puede ser mucho más corta. En caso de que las trayectorias 160 y 800 sean perpendiculares, la distancia  $L$  es del orden si el diámetro del pulso óptico, es decir  $2r_2$ . Para el cálculo del contenido gaseoso, las trayectorias ópticas son preferiblemente esencialmente paralelas y esencialmente concéntricas.

30 La ecuación 4 asume por ejemplo que el pulso de luz 710 es atenuado solo debido a la absorción al compuesto gaseoso 510. En la práctica, también puede ocurrir alguna otra absorción o dispersión. Sin embargo, se puede derivar una ecuación que tome en cuenta estos procesos.

35 A partir de la ecuación (4) se puede ver que la sensibilidad del método depende por ejemplo de la energía del pulso de luz  $E_{0p1}$ , el área del pulso de luz  $A_p$  y la distancia  $L$ . Aumentar la energía del pulso, aumentar la distancia  $L$  o disminuir el área del pulso aumenta la sensibilidad. En principio no existe límite para la distancia  $L$ . Sin embargo, en algunas realizaciones, la distancia  $L$  puede estar en el rango de 1 cm a 50 m.

40 En las ecuaciones anteriores (2) y (3), se asumió que todos los fotones del pulso de luz 710 que son absorbidos en el espacio 110 disocian una molécula de gas. En un proceso térmico, también puede ocurrir la dispersión y absorción a otras moléculas. La precisión del método puede mejorarse al medir la energía del pulso  $E_{0p1}$  antes de la disociación con el tercer fotodetector 722 y la energía del pulso  $E_p$  después de la disociación con el segundo fotodetector 720. La diferencia entre estas energías puede compararse entonces con el estimado teórico de la ecuación (3). En caso de que las desviaciones de la ecuación (3) sean grandes, ambas energías pueden utilizarse para deducir un valor para el contenido  $\xi_G$ .

En las ecuaciones 1 a 4 se asume que la anchura espectral de las longitudes de onda del haz de luz y pulso de luz es angosta, es decir que se utiliza un haz de luz monocromático y un pulso de luz monocromático.

50 La energía del pulso,  $E_{0p1}$ , puede tener un valor de 1 nJ a 10 J, preferiblemente de 0,5  $\mu$ J a 500  $\mu$ J y en algunas realizaciones se han utilizado las energías de pulso de 0,8  $\mu$ J, 1,6  $\mu$ J, 10  $\mu$ J y 20  $\mu$ J. Puede utilizarse una energía de pulso más alta para detectar contenidos gaseosos más bajos. En estas realizaciones se utilizó una distancia de  $L=60$  cm. En otras realizaciones se han utilizado las distancias de  $L=1$  m,  $L=5$  m y  $L=7$  m. Más aun, se utilizó un haz de luz coherente y monocromático 170 que tiene una sección transversal circular y el diámetro de 3 mm. Cabe destacar que las intensidades son relativamente altas. Por ejemplo, un pulso de 10  $\mu$ J que tiene la duración de 10 ns significa una energía de 1kW. Si el pulso tiene una sección transversal circular con el radio de 1 cm, la intensidad del pulso de luz 710 es aproximadamente 3 MW/m<sup>2</sup>, es decir 300 W/cm<sup>2</sup>.

*Principio de medición, disociación de dos pasos*

60 También se ha notado que no todas las moléculas de gas pueden disociarse con un pulso de luz a la primera parte y la segunda parte de modo que la primera parte (o la segunda parte) tiene al menos un pico claro en su sección transversal de absorción de modo que una fuente de haz de luz para la longitud de onda estaría disponible. Por ejemplo, algunos dihaluros de metal del tipo  $M^2H^a_2$ , en donde  $M^2$  de metal es un átomo de metal (por ejemplo, un

metal pesado o un metal alcalinotérreo del grupo II) y  $H^a$  es un átomo de halógeno (como se definió anteriormente) son difíciles de disociar en un átomo de metal y en una molécula de dihaluro utilizando un fotón. Por ejemplo, dicloruro de plomo,  $PbCl_2$  es de este tipo. El dicloruro de plomo podría disociarse en un átomo de plomo y otro compuesto o compuestos utilizando un pulso de luz que tiene una longitud de onda muy corta. Por ejemplo, para el cloruro de plomo, la longitud de onda puede estar en el rango de 150 nm a 200 nm. Sin embargo, las fuentes de luz que emiten dichos pulsos de energía alta son relativamente costosos. Más aun, la luz que tiene una longitud de onda tan corta es absorbida a otros gases, tales como oxígeno y, de este modo, no puede propagarse largas distancias. En muchas aplicaciones es preferible una distancia de medición relativamente larga (es decir trayectoria óptica larga). Se notó que  $PbCl_2$  puede disociarse en una molécula de monocloruro de plomo y un átomo de cloro. Sin embargo, la molécula de monocloruro de plomo no tiene picos de absorción bien definidos en la longitud de onda visible o cerca de ultravioleta (UV). Tiene bandas de absorción en el régimen UV. Sin embargo, estas bandas se mezclan fácilmente con las bandas de absorción de otros compuestos, por ejemplo  $HgCl_2$ . Más aun, la sección transversal de absorción en estas bandas es mucho más pequeña que la sección transversal de absorción del átomo de plomo en otra longitud de onda. La relación de estas secciones transversales puede estar, por ejemplo, en el rango de  $10^{-6}$  a  $10^{-5}$ . Por lo tanto, la absorción de la mezcla gaseosa que corresponde a las longitudes de onda del haz de luz 170 no puede aumentarse significativamente mediante disociación  $PbCl_2$  en  $PbCl$  y  $Cl$ .

Haciendo referencia a la Figura 6a se notó que el dicloruro de plomo puede disociarse en un átomo de plomo (es decir en un átomo de plomo excitado) y dos átomos de cloro. Sin embargo, la disociación se realiza en dos pasos. En el primer paso,  $PbCl_2$  se disocia en  $PbCl$  y  $Cl$ . En el segundo paso,  $PbCl$  se disocia adicionalmente en  $Pb$  y  $Cl$ . En una realización, se utilizan dos pulsos de luz disociativos posteriores de diferentes longitudes de onda. En otra realización, se utiliza un único pulso capaz de realizar ambos pasos. En el último caso, el pulso de luz puede comprender fotones dispuestos para disociar las moléculas en el primer paso y comprende además fotones dispuestos para disociar las moléculas en el segundo paso. Más aun, los fotones para el primer y segundo paso pueden tener la misma longitud de onda. Sin embargo, los fotones para el primer y segundo paso pueden tener diferentes longitudes de onda. Por ejemplo, un pulso de luz que comprende fotones que tienen la longitud de onda 266 nm puede disociar  $PbCl_2$  en  $PbCl$  y  $Cl$  y disociar además  $PbCl$  en  $Pb$  y  $Cl$ .

Sin embargo, se prefiere disociar la molécula del compuesto gaseoso en dos pasos controlados. Esto puede realizarse utilizando un primer pulso de luz para la primera disociación (por ejemplo  $PbCl_2$  en  $PbCl$  y  $Cl$ ) y un segundo pulso de luz para la segunda disociación (por ejemplo  $PbCl$  en  $Pb$  y  $Cl$ ). En este caso, los fotones para el primer y segundo paso preferiblemente tienen diferentes longitudes de onda. De esta manera, el proceso se controla mejor resultando en una fácil calibración. Más aun, el cálculo del contenido del compuesto gaseoso se vuelve más simple.

Después de la primera y segunda disociación, el átomo de plomo disociado está en un estado excitado. La vida útil del estado excitado es muy corta, solo unos pocos nanosegundos. De este modo, las mediciones deben calcularse de manera precisa. En particular si la vida útil de los estados en los cuales el penúltimo pulso de luz 710b disocia la molécula de gas 510 es corta, la medición del último pulso de luz 710a debe realizarse cuidadosamente.

En la Figura 6a, la molécula de dicloruro de plomo se disocia primero con un penúltimo pulso de luz 710b. El penúltimo pulso de luz 710b comprende fotones 516 que tienen la longitud de onda  $\lambda_{p2}$ . El penúltimo pulso de luz 710b puede comprender además fotones que tienen diferentes longitudes de onda. Preferiblemente el penúltimo pulso de luz es monocromático. La longitud de onda  $\lambda_{p2}$  se selecciona de modo que la molécula de gas 510 (dicloruro de plomo en la Figura 6a) primero se excita a una molécula 512 en un estado disociativo que se disocia adicionalmente en la segunda parte 525 (cloro en la Figura 6a) y una tercera parte 530 (monocloruro de plomo en la Figura 6a). Para el dicloruro de plomo, puede utilizarse una longitud de onda  $\lambda_{p2} = 355$  nm. Aquí la longitud de onda es proporcionada con la precisión de un nm.

Luego, la tercera parte 530 se excita a un estado disociativo 531 con un último pulso de luz 710a. El último pulso 710a de luz comprende los fotones 515 que tienen la longitud de onda  $\lambda_{p1}$ . El último pulso de luz 710a puede comprender además fotones que tienen diferentes longitudes de onda. Preferiblemente el último pulso de luz es monocromático. La longitud de onda  $\lambda_{p1}$  se selecciona de modo que la tercera parte 530 se excita a un estado disociativo 531 con el último pulso de luz 710a. En la Figura 6a, donde monocloruro de plomo se excita, se utilizó la longitud de onda  $\lambda_{p1} = 266$  nm. Luego, el estado disociativo 531 se disocia en una cuarta parte 532 (átomo de cloro) y a la primera parte (átomo de plomo excitado). La primera parte 520 se detecta utilizando una espectroscopía de absorción y un haz de luz 170 según se describió anteriormente. El haz de luz 170 se atenúa además al haz de luz atenuado 175 debido a la absorción a la primera parte 520; átomo de plomo excitado en la Figura 6a.

En la realización de la Figura 6a, la cuarta parte puede estar en un estado excitado o un estado relajado. Esto no afecta mucho las mediciones. Sin embargo, la primera parte está en un estado excitado. Cuando se detecta la primera parte utilizando espectroscopía de absorción, la longitud de onda del haz  $\lambda_b$  debe seleccionarse de modo que la longitud de onda del haz corresponda al perfil de absorción del átomo de plomo excitado. El haz de luz comprende fotones que tienen la longitud de onda de haz  $\lambda_b$ . El haz de luz 170 puede comprender además fotones que tienen diferentes longitudes de onda. Preferiblemente el haz de luz 170 es monocromático. En la realización de la Figura 6a, se utilizó un haz de luz monocromático con la longitud de onda de haz  $\lambda_b = 406$  nm.

Más aun, según se describió en conexión con la disociación de un paso (Figura 2b) también en este caso la molécula de gas 510 puede excitarse a un estado excitado 510b antes de excitarla adicionalmente hasta el estado disociativo 512. Además, la tercera (parte disociada) 530 puede excitarse a un estado (más) excitado 530b (no se muestra) antes de excitarse además hasta el estado disociativo 531. De este modo, la molécula de compuesto gaseoso 510 puede excitarse hasta el estado disociativo 512 utilizando al menos un fotón. Más aun, haciendo referencia de nuevo a la Figura 2b, la tercera parte 530 puede excitarse hasta el estado disociativo 531 utilizando al menos un fotón. De este modo, la excitación de dos fotones o excitación de múltiples fotones pueden utilizarse para excitar la molécula 510 o la tercera parte 530.

La Figura 6b muestra las escalas temporales para las mediciones de dicloruro de plomo y las intensidades de los pulsos y haz de luz. Al momento  $t=0$   $\mu\text{s}$ , se emite el penúltimo pulso de luz 710b que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p2}$ . Después de un tiempo  $\Delta t_1$ , se emite el último pulso de luz 710a que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p1}$ . Estos pulsos se muestran en la Figura 6b como los picos de intensidad para las longitudes de onda correspondientes. Para el haz de luz 170 se muestra la intensidad del haz de luz atenuado 175. La intensidad del haz de luz atenuado 175 que tiene la longitud de onda  $\lambda_b$  disminuye poco después del último pulso de luz 170a, debido a que algunos átomos de plomo excitados están presentes en la primera trayectoria óptica 160.

La vida útil del estado excitado del átomo de plomo es muy corta. Por lo tanto, la intensidad del haz de luz atenuado aumenta rápidamente después del último pulso de luz. Por lo tanto, en esta realización, el periodo de recuperación está en gran medida definido por la duración del último pulso de luz 710a. Los átomos de plomo excitados están presentes en la primera trayectoria óptica cuando el último pulso de luz disocia las moléculas de cloro de plomo y sólo unos pocos nanosegundos después el pulso.

Para algunos de los otros gases el penúltimo pulso de luz 710b puede excitar el átomo de gas 510 a la segunda parte 525 y una tercera parte 530, en donde la tercera parte está en un estado excitado. La longitud de onda del último pulso 710a puede seleccionarse de modo de excitar la tercera parte 530 del estado excitado hasta el estado disociativo 531. Más aun, si la vida útil del estado excitado de la tercera parte 530 es corta, el último pulso 710a tiene que coordinarse de modo que el último pulso 710a en realidad excite las moléculas o radicales de la tercera parte excitada. Más aun, si la tercera parte 530 está en un estado excitado, es posible coordinar el último pulso de modo que la tercera parte 530 tiene tiempo suficiente para relajarse del estado excitado a un estado relajado o a otro estado excitado antes de disociar la tercera parte 530. El tiempo para esta relajación puede ser típicamente de 1 ns a 100 ns. En este caso la longitud de onda del último pulso de luz debe seleccionarse de modo que el último pulso de luz es capaz de disociar la tercera parte 530 en el estado relajado o el otro estado excitado.

Los compuestos gaseosos que pueden medirse utilizando una disociación de dos pasos incluyen haluros metálicos de la forma  $M^2H^a_2$ , en donde  $M^2$  es un átomo de metal tal como Ni o un átomo de metal pesado, por ejemplo Sn, Cu, Zn, Pb o Hg o un átomo de metal alcalinotérreo del grupo II y el halógeno  $H^a$  puede seleccionarse del grupo de F, Cl, Br, I y At. Por ejemplo, el contenido de los dicloruros  $NiCl_2$ ,  $SnCl_2$ ,  $CuCl_2$ ,  $ZnCl_2$  y  $PbCl_2$  son de interés en muchos procesos térmicos. Más aun, pueden disociarse algunos trihaluros primero a un monohaluro. Por ejemplo, algunos trihaluros de Bi, Sb y P pueden disociarse en un monohaluro correspondiente utilizando un pulso. El monohaluro puede disociarse además en un átomo de halógeno y otro átomo. Estos deben considerarse solamente como gases ejemplares para el método.

Como se describió anteriormente para la disociación de un único paso, puede utilizarse un único haz para medir dos compuestos gaseosos diferentes que comprenden el mismo átomo. Por ejemplo si la mezcla gaseosa comprende cloruro de plomo ( $PbCl_2$ ) y bromuro de plomo ( $PbBr_2$ ), puede utilizarse un haz de luz común para detectar el cloruro y el bromuro. La molécula de cloruro de plomo se disociaría en un átomo de plomo utilizando dos pulsos de luz (el último y el penúltimo). Más aun, el bromuro de plomo se disociaría en un átomo de plomo utilizando (i) otro pulso de luz, (ii) otros dos pulsos o (iii) otro pulso y uno del último pulso y penúltimo pulso. De este modo, la disminución de la intensidad del haz de luz atenuado después de disociar el cloruro de plomo podría utilizarse para determinar el contenido de cloruro de plomo. Más aun, la disminución de la intensidad del haz de luz atenuado después de disociar el bromuro de plomo podría utilizarse para determinar el contenido de bromuro de plomo.

Como se describió anteriormente para la disociación de un único paso, pueden utilizarse dos haces o un haz que comprende fotones que corresponden a longitudes de onda pico de dos compuestos para medir dos compuestos gaseosos diferentes que comprenden diferentes átomos. Por ejemplo si la mezcla gaseosa comprende cloruro de plomo ( $PbCl_2$ ) y cloruro de zinc ( $ZnCl_2$ ), pueden utilizarse dos haces de luz o un haz de luz que comprende fotones que corresponden a longitudes de onda de zinc pico y fotones que corresponden a longitudes de onda de plomo pico para detectar ambos cloruros. Posiblemente la misma fuente o fuentes de pulso de luz pueden utilizarse para disociar ambos cloruros. La disminución de la intensidad del haz de luz atenuado que corresponde al pico de absorción de zinc podría utilizarse para determinar el contenido de cloruro de zinc. La disminución de la intensidad del haz de luz atenuado que corresponde al pico de absorción de plomo podría utilizarse para determinar el contenido de cloruro de plomo. De este modo, un único haz que tiene picos correspondientes a dos átomos diferentes pueden utilizarse para medir el contenido de dos compuestos gaseosos. En una manera similar dos haces pueden utilizarse para medir dos compuestos gaseosos.

*Dispositivo de medición, disociación de dos pasos*

La Figura 6c muestra una realización de un dispositivo 990 para medir el contenido de un compuesto gaseoso 510 de una mezcla gaseosa. El dispositivo 990 está dispuesto para utilizar el penúltimo pulso de luz 710b y el último pulso 710a para disociar la molécula de gas en la primera parte y en las otras partes. El dispositivo 990 está dispuesto para utilizar un haz de luz 170 para detectar el contenido de la primera parte.

La Figura 6c muestra una realización preferida de la invención utilizando dos pulsos de luz para disociar una molécula de gas. El dispositivo 990 de la Figura 6c comprende:

- una fuente de haz de luz 310, dispuesta para emitir un haz de luz monocromático y coherente 170 que tiene la longitud de onda de haz  $\lambda_b$ ,
- una primera fuente de pulso de luz 700a, dispuesta para emitir un último pulso de luz monocromático y coherente 710a que tiene la longitud de onda de pulso  $\lambda_{p1}$ ,
- opcionalmente, una segunda fuente de pulso de luz 700b, dispuesta para emitir un penúltimo pulso de luz monocromático y coherente 710b que tiene la longitud de onda de pulso  $\lambda_{p2}$ ,
- un primer elemento óptico 740a, dispuesto para guiar
  - o el haz de luz 170 a una primera trayectoria óptica 160 y
  - o el último pulso de luz 710a a una segunda trayectoria óptica 800 de modo que la segunda trayectoria óptica 800 se superpone a la primera trayectoria óptica 160,
- un segundo elemento óptico 740b, dispuesto para guiar
  - o el haz de luz 170 a la primera trayectoria óptica 160,
  - o el último pulso de luz 710a a la segunda trayectoria óptica 800 y
  - o el penúltimo pulso de luz 710b a una tercera trayectoria óptica 810 de modo que la tercera trayectoria óptica 810 se superpone a la segunda trayectoria óptica 800 y la primera trayectoria óptica 160,
- un tercer elemento óptico 742a, dispuesto para pasar el haz de luz atenuado 175, es decir la luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_b$ , dispuesta para pasar el último pulso de luz (atenuado) 715a, es decir luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p1}$  y desviar, reflejar o absorber el penúltimo pulso de luz atenuado 715b, es decir luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p2}$ ,
- un cuarto elemento óptico 742b dispuesto para pasar el haz de luz atenuado 175, es decir la luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_b$  y desviar, reflejar o absorber el pulso de luz atenuado 715a, es decir luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p1}$ ,
- un quinto elemento óptico 744a, dispuesto para reflejar una primera parte de luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p1}$  y pasar una segunda parte de luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p1}$ ,
- un sexto elemento óptico 744b, dispuesto para reflejar una primera parte de luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p2}$  y pasar una segunda parte de luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p2}$ ,
- un primer fotodetector 320, dispuesto para detectar la intensidad del haz de luz atenuado 175 que tiene la longitud de onda  $\lambda_b$ ,
- una lente 746, dispuesta para hacer converger el haz de luz atenuado 175 al primer fotodetector 320,
- un segundo fotodetector 720a, dispuesto para detectar la intensidad del último pulso de luz atenuado 715a, teniendo el último pulso de luz atenuado la longitud de onda  $\lambda_{p1}$ ,
- un tercer fotodetector 720b, dispuesto para detectar la intensidad del penúltimo pulso de luz atenuado 715b, teniendo el penúltimo pulso de luz atenuado la longitud de onda  $\lambda_{p2}$ ,
- un cuarto fotodetector 722a, dispuesto para detectar la intensidad de luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p1}$ ,
- un quinto fotodetector 722a, dispuesto para detectar la intensidad de luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p2}$  y
- una unidad de procesamiento de datos 910, en donde la unidad de procesamiento de datos está dispuesta para calcular el contenido de compuesto gaseoso en la mezcla gaseosa utilizando un primer valor, siendo el primer valor indicativo de una primera intensidad  $I_{k0}$  del haz de luz atenuado 175 en el fotodetector 320 y un segundo valor, siendo el segundo valor indicativo de una segunda intensidad  $I_k$  del haz de luz atenuado 175 en el fotodetector 320.

La segunda fuente de pulso de luz es opcional. El segundo pulso de luz puede invalidarse con la primera fuente de pulso de luz. Por ejemplo la primera fuente de pulso de luz puede emitir dos pulsos posteriores. Como otro ejemplo, la primera fuente de luz puede emitir un pulso de luz que se divide en dos pulsos. El primero de estos pulsos puede utilizarse directamente para disociar la molécula de gas 510 o la molécula de gas excitada y los últimos de estos pulsos pueden retrasarse y utilizarse para disociar la tercera parte 530 (Figura 6a) o la tercera parte excitada. La primera fuente de pulso de luz y el divisor de pulso de luz pueden denominarse medios para generar un segundo pulso de luz. El segundo pulso de luz comprende fotones 516 que tienen una segunda longitud de onda de pulso  $\lambda_{p2}$ , al menos parte de los fotones 516 que disocian al menos parte de (i) las moléculas del compuesto gaseoso 510 o (ii) moléculas del compuesto gaseoso excitado 510 en átomos, moléculas, iones o radicales de la tercera parte 530 de la primera trayectoria óptica 160 y en otra parte 525.

Como se describió anteriormente, la segunda fuente de pulso 700b puede omitirse en algunas realizaciones, en donde un único pulso de luz es capaz de disociar la tercera parte 530 y la molécula de gas 510 (Figura 6a).

5 Como se verá, las energías de los pulsos antes de las disociaciones necesitan conocerse de modo de aplicar la ecuación 12 para el contenido gaseoso. Estas energías se miden preferiblemente con los fotodetectores 722a y 722b. En el caso que las energías de los pulsos de luz sean conocidas sin medirlas, los fotodetectores 722a y 722b son opcionales. De este modo, los componentes ópticos 744a y 744b son opcionales. Las energías de los pulsos de luz pueden conocerse por ejemplo de las mediciones de calibración, siempre que las fuentes de pulso de luz sean estables.

10 Sin embargo, no se necesita la energía de los pulsos de luz atenuados necesariamente. Por lo tanto, el fotodetector 720a es opcional. De este modo, el componente óptico 742a es opcional. Por lo tanto, también el fotodetector 720b es opcional. De este modo, el componente óptico 742b es opcional.

15 Preferiblemente los pulsos de luz no son guiados al fotodetector 320. Esto puede tomarse en cuenta por el elemento óptico 742a, que puede disponerse para que pase solamente fotones que tienen aproximadamente la longitud de onda de haz  $\lambda_b$  y disponerse para reflejar o absorber los fotones 516, 515 de los pulsos de luz 710b, 710a. Los tamaños de los pulsos de luz se seleccionan preferiblemente de modo que el penúltimo pulso de luz 710b tenga una sección transversal mayor que el último pulso de luz 710a. Más aun, la tercera trayectoria óptica 810 (del penúltimo pulso de luz 710b) y la segunda trayectoria óptica 800 (del último pulso de luz 710a) son preferiblemente esencialmente paralelas y concéntricas en el significado definido para el caso de la primera y segunda trayectoria óptica (ver arriba). Por lo tanto, el volumen de la segunda trayectoria óptica 800 está comprendido preferiblemente en el volumen de la tercera trayectoria óptica 810. Es decir la tercera trayectoria óptica es mayor en diámetro que la segunda trayectoria óptica.

20 Más aun, el tamaño del último pulso de luz 710a y el haz de luz 170 se seleccionan preferiblemente de modo que el último pulso de luz 710a tenga una sección transversal mayor que el haz de luz 170, según se describió para el caso de solo un pulso disociativo. Más aun, la segunda trayectoria óptica 800 (del último pulso de luz) y la primera trayectoria óptica 160 (del haz de luz) son preferiblemente esencialmente paralelas y concéntricas (en el significado descrito anteriormente). Por lo tanto, el volumen de la primera trayectoria óptica 160 está comprendido preferiblemente en el volumen de la segunda trayectoria óptica 800. Es decir la segunda trayectoria óptica es mayor en diámetro que la primera trayectoria óptica.

25 En las mediciones, la intensidad del haz de luz atenuado que tiene la longitud de onda  $\lambda_b$  disminuye poco después del último pulso de luz, debido a que algunos átomos de plomo excitados están presentes en la primera trayectoria óptica. La intensidad atenuada que se muestra en la Figura 6b (superior) muestra un comportamiento similar al ya representado en la Figura 4c para el caso de un único pulso de luz.

30 La longitud de onda para el haz de luz 170 puede seleccionarse como se describió anteriormente para la disociación de un único pulso.

35 La longitud de onda para el último pulso de luz 710a puede seleccionarse como la longitud de onda para el único pulso de luz 710, según se describió anteriormente para la disociación de un único pulso. En particular, la longitud de onda puede seleccionarse de modo que se disocia la tercera parte 530. Sin embargo, para controlar los diferentes pasos del proceso de disociación, la longitud de onda puede seleccionarse también de modo que la molécula de compuesto gaseoso 510 no se disocia con el último pulso de luz o al menos una parte significativa de las moléculas de compuesto gaseoso 510 no se disocian con el último pulso de luz.

40 La longitud de onda para el penúltimo pulso de luz 710b puede seleccionarse de modo que disocia la molécula de gas 510. La longitud de onda del penúltimo pulso de luz 710b puede ser, por ejemplo, menor que 430 nm. En particular, la longitud de onda puede seleccionarse de modo que se disocia el compuesto gaseoso 510. Sin embargo, para controlar los diferentes pasos del proceso de disociación, la longitud de onda puede seleccionarse también de modo que la tercera parte 530 no se disocia con el último pulso de luz o al menos una parte significativa de las terceras partes 530 no se disocian con el último pulso de luz. El último criterio no es crítico, ya que el tiempo entre los pulsos, en particular el tiempo entre un último pulso y un penúltimo pulso posterior puede seleccionarse de modo que las terceras partes 530 no estén presentes en la trayectoria óptica al momento del penúltimo pulso.

45 Se miden dos valores,  $I_{k0}$  y  $I_k$ , indicativos de la intensidad del haz de luz atenuado 175, según se describió anteriormente: En el presente caso, el método comprende

- detectar un segundo valor indicativo de una segunda intensidad  $I_k$ , del haz de luz atenuado 175, en donde el haz de luz atenuado 175 se atenúa adicionalmente por los átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte 520 en la primera trayectoria óptica 160.

50

En el presente caso la primera parte 520 se produce mediante la disociación de las moléculas o radicales de la tercera parte 530.

5 Los valores  $I_{k0}$  y  $I_k$  pueden obtenerse promediando o mediante ajuste de curva, en caso de ser necesario, como se describió anteriormente. Estos valores se obtienen para cada disminución en la intensidad del haz de luz atenuado 175, es decir antes o después del penúltimo pulso 710a. Esto se describió en mayor detalle para el caso de disociación en un paso. Por ejemplo, el valor  $I_{k0}$  puede seleccionarse como el valor de intensidad antes de la disminución, no como un valor promedio a largo plazo. Los valores se utilizan para determinar el contenido del compuesto gaseoso en la mezcla gaseosa.

10 Contenido gaseoso, disociación de dos pasos

15 A partir de las intensidades atenuadas  $I_{k0}$  y  $I_k$  el cálculo del contenido del compuesto gaseoso en la mezcla gaseosa puede realizarse de la siguiente manera cuando los pulsos de luz de dos longitudes de onda se utilizan para disociar la molécula de gas. Los cálculos son en gran medida similares a la deducción de contenido gaseoso, cuando se utiliza solo un pulso de luz (ver arriba). En los siguientes cálculos se asume que

- el haz de luz 170 es esencialmente monocromático,
- el último pulso de luz 710a es esencialmente monocromático,
- 20 - el penúltimo pulso de luz 710b es esencialmente monocromático,
- las trayectorias ópticas 160, 800, 810 son esencialmente paralelas y concéntricas,
- el área de sección transversal del penúltimo pulso de luz 710b es mayor que el área de sección transversal del último pulso de luz 710a,
- el área de sección transversal del último pulso de luz 710a es mayor que el área de sección transversal del haz de luz 170,
- 25 - se asume que la molécula del compuesto gaseoso 510 está excitada hasta el estado disociativo 512 con un único fotón 516 (Figura 6a) y
- se asume que la tercera parte 530 está excitada hasta el estado disociativo 531 con un único fotón 515 (Figura 6a).

30 Los cálculos se llevan a cabo para  $PbCl_2$ . Sin embargo, en base a la descripción, es evidente para un experto en la técnica llevar a cabo los cálculos para otros gases.

35 Primero, cuando el penúltimo pulso de luz 710b es guiado a la segunda trayectoria óptica 810, disocia algunas de las moléculas de gas 510. Por lo tanto, la energía del pulso disminuye. Al aplicar la Ley de Beer-Lambert para el penúltimo pulso:

$$(5) \frac{E_{p2}}{E_{0p2}} = \exp\left(-\frac{N_{PbCl_2}}{V} \sigma_{PbCl_2} L\right)$$

40 Aquí  $E_{0p2}$  es la energía del penúltimo pulso de luz 710b que ingresa al espacio 110,  $E_{p2}$  es la energía del penúltimo pulso de luz atenuado 715b que sale del espacio 110 y que ha sido atenuado debido a que excita las moléculas 510 a las moléculas 512 en el estado disociativo (Figuras 6a, 6c).  $N_{PbCl_2}$  es el número de moléculas de  $PbCl_2$ ,  $V$  es el volumen, donde las moléculas de gas están ubicadas,  $\sigma_{PbCl_2}$  es la sección transversal de absorción para  $PbCl_2$  y para la longitud de onda  $\lambda_{p2}$  del penúltimo pulso y  $L$  es la longitud de la parte de la tercera trayectoria óptica 810 que atenúa el penúltimo pulso de luz. La longitud puede ser, por ejemplo, el ancho del espacio 110. Asumiendo que no hay pérdidas de energía, por ejemplo todas las disminuciones en la energía del penúltimo pulso de luz se deben a excitar las moléculas de  $PbCl_2$ , el número de moléculas de  $PbCl_2$  puede calcularse como:

$$(6) N_{PbCl_2} = \frac{\frac{E_{0p2} - E_{p2}}{E_{0p2}} E_{0p2}}{\frac{hc}{\lambda_{p2}}} = \frac{\left(1 - \exp\left(-\frac{N_{PbCl_2}}{V} \sigma_{PbCl_2} L\right)\right) E_{0p2}}{\frac{hc}{\lambda_{p2}}}$$

50 Aquí  $h$  es la constante de Planck y  $c$  es la velocidad de la luz.

55 Después del penúltimo pulso 710b al menos algunas de estas moléculas de monocloruro de plomo están presentes en la segunda trayectoria óptica 800. El último pulso de luz 710a es guiado a través de la segunda trayectoria óptica 800, por lo cual al menos parte de estas moléculas de monocloruro de plomo se excitan por el último pulso de luz 710a. Al aplicar la Ley de Beer-Lambert para el último pulso:

$$(7) \frac{E_{p1}}{E_{0p1}} = \exp\left(-\frac{N_{PbCl}}{V_{p2}} \sigma_{PbCl} L\right)$$

Aquí  $E_{0p1}$  es la energía del último pulso de luz 710a que ingresa al espacio 110,  $E_{p1}$  es la energía del último pulso de luz atenuado 715a que sale del espacio 110 y que ha sido atenuado por ejemplo debido a que excita las moléculas 530 al estado excitado 531 (Figuras 6a, 6c).  $N_{PbCl}$  es el número de moléculas de PbCl,  $V_{p2}$  es el volumen, donde las moléculas de gas de PbCl están ubicadas (nota:  $V_{p2}$  también es el volumen de la trayectoria óptica para el penúltimo pulso de luz, ya que PbCl se produce por la disociación inducida por el penúltimo pulso de luz),  $\sigma_{PbCl}$  es la sección transversal de absorción para PbCl y para la longitud de onda  $\lambda_{p1}$  del último pulso.  $L$  es la longitud de la parte de la segunda trayectoria óptica 800 que atenúa el último pulso de luz. La longitud puede ser, por ejemplo, el ancho del espacio 110. Como es evidente, en estos cálculos se asumen que estas longitudes son iguales. Sin embargo, En caso de que un dispositivo 990 esté ubicado en ambiente, estas longitudes no son necesariamente iguales. Como se describió anteriormente, el número de moléculas excitadas de este modo, que iguala al número de átomos de plomo, ya que cada molécula de PbCl excitada disocia, puede calcularse como:

$$(8) N_{Pb} = \frac{\frac{E_{0p1} - E_{p1}}{E_{0p1}} E_{0p1}}{\frac{hc}{\lambda_{p1}}} = \frac{\left(1 - \exp\left(-\frac{N_{PbCl}}{V_{p2}} \sigma_{PbCl} L\right)\right) E_{0p1}}{\frac{hc}{\lambda_{p1}}}$$

El haz de luz 170 se vuelve más atenuado por la presencia de átomos de plomo (excitados) (o más generalmente primeras partes 520) en la primera trayectoria óptica 160. Por lo tanto, la relación entre el haz de luz atenuado 175 y el haz de luz atenuado adicionalmente 175 puede escribirse como:

$$(9) \frac{I_k}{I_{k0}} = \exp\left(-\frac{N_{Pb}}{V_{p1}} \sigma_{Pb} L\right) \Leftrightarrow N_{Pb} = \frac{-\ln\left(\frac{I_k}{I_{k0}}\right) V_{p1}}{\sigma_{Pb} L}$$

Aquí  $V_{p1}$  es el volumen de la segunda trayectoria óptica, es decir el volumen en el cual el último pulso de luz 710a disocia las moléculas de monoclورو de plomo a átomos de plomo excitados. La atenuación del haz de luz 170 se debe a la presencia de estos átomos de plomo excitados. Al insertar  $N_{Pb}$  de la ecuación 9 a la ecuación 8 y resolver para  $N_{PbCl}$  proporciona:

$$(10) N_{PbCl} = -\ln\left(1 - \frac{N_{Pb} hc}{\lambda_{p1} E_{0p1}}\right) \frac{V_{p2}}{\sigma_{PbCl} L}$$

Al insertar  $N_{PbCl}$  de la ecuación 10 a la ecuación 6 puede utilizarse para calcular el número de moléculas de dicloruro de plomo  $N_{PbCl_2}$ . Sin embargo, el contenido del compuesto gaseoso en una mezcla gaseosa a menudo es de mayor interés. De la teoría de gases se conoce que:

$$(11) N_{PbCl_2} = \xi_{PbCl_2} N = \xi_{PbCl_2} \frac{pV}{kT} \Leftrightarrow \frac{N_{PbCl_2}}{V} = \xi_{PbCl_2} \frac{p}{kT}$$

Aquí  $\xi_{PbCl_2}$  es el contenido de dicloruro de plomo en una mezcla gaseosa. Al insertar las ecuaciones 11 y 10 en la ecuación 6 obtenemos el contenido del compuesto gaseoso:

$$(12) \xi_{PbCl_2} = -\ln\left\{1 + \ln\left[1 + \ln\left(\frac{I_k}{I_{k0}}\right) \frac{A_{p1} hc}{\sigma_{Pb} E_{0p1} \lambda_{p1}}\right] \frac{A_{p2} hc}{\sigma_{PbCl} E_{0p2} \lambda_{p2}}\right\} \frac{kT}{p} \frac{1}{\sigma_{PbCl_2} L}$$

Aquí también se ha utilizado la ecuación  $V_{p2}=A_{p2}L$  y  $V_{p1}=A_{p1}L$ . De la ecuación 12 puede calcularse el contenido de cloruro de plomo, una vez que se conocen los parámetros. Como se describió anteriormente, por ejemplo en el contexto de la ecuación 4, pueden utilizarse áreas efectivas en lugar de  $A_{p1}$  y  $A_{p2}$  si el perfil de intensidad no es uniforme.

Como en la ecuación 4, la ecuación 12 también asume por ejemplo que los pulsos de luz 710a, 710b son atenuados solamente debido a la absorción al compuesto gaseoso 510 y a la tercera parte 530. En la práctica, también puede ocurrir alguna otra absorción o dispersión. Sin embargo, se puede derivar una ecuación que tome en cuenta estos procesos.

La ecuación 12 asume por ejemplo que

- 5           - el penúltimo pulso de luz 710b se atenúa solamente debido a que la absorción al compuesto gaseoso 510 y  
           - el último pulso de luz 710a se atenúa solamente debido a la absorción a la tercera parte 530.

En la práctica, también puede ocurrir alguna otra absorción o dispersión. Sin embargo, se puede derivar una ecuación que tome en cuenta estos procesos.

- 10       A la temperatura  $T=1000$  K y presión  $p=1,012 \times 10^5$  Pa y para las longitudes de onda descritas anteriormente, los valores de algunos parámetros son:  $h = 6,626 \times 10^{-34}$  Js,  $c = 2,998 \times 10^8$  m/s,  $k = 1,38 \times 10^{-23}$  J/K,  $\lambda_{p1} = 266 \times 10^{-9}$  m,  $\lambda_{p2} = 355 \times 10^{-9}$  m,  $\lambda_b = 406 \times 10^{-9}$  m,  $\sigma_{PbCl_2} = 10^{-21} \text{ m}^2$ ,  $\sigma_{PbCl} = 10^{-21} \text{ m}^2$  y  $\sigma_{Pb} = 10^{-16} \text{ m}^2$ .

- 15       Las otras constantes dependen de la energía del pulso, tamaño del pulso y longitud de la trayectoria óptica. Por ejemplo, estas pueden ser  $E_{op2} = 50 \times 10^{-3}$  J,  $E_{op1} = 50 \times 10^{-6}$  J,  $A_{p1} = 25 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ ,  $A_{p2} = 25 \times 10^{-6} \text{ m}^2$  y  $L = 1$  m. Se destaca además que si el límite de detección para  $I_k/I_{k0}$  es por ejemplo 0,01, el límite de detección para el contenido gaseoso (cloruro de plomo) es aproximadamente 0,7 ppm.

*Principio de medición, disociación de tres pasos*

- 20       Se ha notado además que el contenido de algunas moléculas del compuesto gaseoso 510 en una mezcla gaseosa puede medirse utilizando tres pulsos de luz posteriores para disociar la molécula de gas. Haciendo referencia a la Figura 7a, una molécula de  $\text{CrCl}_3$  cloruro de cromo 510 puede disociarse utilizando tres pulsos de luz disociativos posteriores en un átomo de cromo (primera parte 520), que puede o no estar en un estado excitado y en otras partes (530, 532, 536), en donde las otras partes son átomos de cloro.

- 25       La molécula de tricloruro de cromo 510 (molécula de gas) puede excitarse con un antepenúltimo pulso de luz 710c a la molécula de gas 512 en un estado disociativo. El antepenúltimo pulso de luz 710c comprende fotones 517 que tienen la tercera longitud de onda de pulso  $\lambda_{p3}$ . El antepenúltimo pulso de luz 710c puede comprender además fotones que tienen otra longitud de onda. Preferiblemente el antepenúltimo pulso de luz 710c es monocromático. La tercera longitud de onda de pulso  $\lambda_{p3}$  se selecciona de modo de excitar la molécula de gas 510 a la molécula de gas excitada 512 en un estado disociativo. La molécula de gas 512 se disocia en la segunda parte 525 y la tercera parte 530. En la Figura 7a la segunda parte 525 es un átomo de cloro y la tercera parte 530 es una molécula de dicloruro de cromo.

- 35       La molécula de dicloruro de cromo 530 (tercera parte) puede excitarse con un penúltimo pulso de luz 710b a una tercera parte excitada 531 en un estado disociativo. El penúltimo pulso de luz 710b comprende fotones 516 que tienen la segunda longitud de onda de pulso  $\lambda_{p2}$ . El penúltimo pulso de luz 710b puede comprender además fotones que tienen otra longitud de onda. Preferiblemente el penúltimo pulso de luz 710b es monocromático. La segunda longitud de onda de pulso  $\lambda_{p2}$  se selecciona de modo de excitar la tercera parte 530 a una tercera parte excitada 531 en un estado disociativo. La tercera parte excitada 531 se disocia en una cuarta parte 532 y una quinta parte 534. En la Figura 7a la cuarta parte 532 es un átomo de cloro y la quinta parte 534 es una molécula de monocloruro de cromo.

- 45       La molécula de monocloruro de cromo 534 (quinta parte) puede excitarse con el último pulso de luz 710a a una quinta parte excitada 531 en un estado disociativo. El último pulso de luz 710a comprende fotones 515 que tienen la primera longitud de onda de pulso  $\lambda_{p1}$ . El último pulso de luz 710a puede comprender además fotones que tienen otra longitud de onda. Preferiblemente el último pulso de luz 710a es monocromático. La primera longitud de onda de pulso se selecciona de modo de excitar la quinta parte 530 a una quinta parte excitada 534 en un estado disociativo. La quinta parte excitada 535 se disocia en la primera parte 520 y en una sexta parte 536. En la Figura 7a la primera parte 520 es un átomo de cromo y la sexta parte 536 es un átomo de cloro.

- 50       La primera parte 520 (es decir el átomo de cromo) puede estar en un estado relajado o en un estado excitado. También las otras partes 525, 530, 532, 534 y 536 pueden estar en un estado relajado o en un estado excitado. La longitud de onda del penúltimo pulso de luz 710b se selecciona de modo que la tercera parte 530 se excita a un estado disociable, tomando en cuenta si la tercera parte 530 está en un estado excitado o en un estado relajado. La longitud de onda del último pulso de luz 710a se selecciona de modo que la quinta parte 534 se excita a un estado disociable, tomando en cuenta si la quinta parte 534 está en un estado excitado o en un estado relajado.

- 60       La primera parte 520 se sondea con el haz de luz 170, que se atenúa al haz de luz atenuado 175. La atenuación puede deberse a al menos uno de los siguientes

(i) absorción debido a átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte producidos en la disociación de moléculas de gas utilizando el último pulso de luz 710a y

(ii) otros procesos, tales como dispersión o absorción por otros compuestos o partículas, por los cuales el primer valor indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado puede medirse, según se describió anteriormente. Además, la atenuación puede deberse a

5 (iii) absorción debido a otros átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte producidos por otros procesos de disociación de las moléculas de gas, por ejemplo producidas por disociación térmica, por lo cual el segundo valor indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado puede medirse, según se describió anteriormente.

10 El haz de luz 170 comprende fotones que tienen la longitud de onda de haz  $\lambda_b$ . El último haz de luz 170 puede comprender además fotones que tienen otra longitud de onda. Preferiblemente el haz de luz 170 es monocromático. La longitud de onda del haz  $\lambda_b$  se selecciona de modo que corresponde al perfil de absorción de la primera parte 520 (excitada o relajada). De este modo, la disociación de la molécula de gas 510 eventualmente en la primera parte 520 aumenta la absorción del haz de luz a la mezcla gaseosa a la longitud de onda de haz  $\lambda_b$ .

15 La tercera parte 530 puede estar en un estado excitado, en donde la vida útil del estado excitado es corta. Por lo tanto, la sincronización del penúltimo pulso de luz 710b necesita seleccionarse de modo que excite la tercera parte 530 a un estado disociativo.

20 La quinta parte 534 puede estar en un estado excitado, en donde la vida útil del estado excitado es corta. Por lo tanto, la sincronización del último pulso de luz 710a necesita seleccionarse de modo que excite la quinta parte 530 a un estado disociativo.

Puede utilizarse una excitación de dos fotones o excitación de múltiples fotones para excitar al menos uno de los siguientes

- 25
- la molécula de gas 510,
  - la tercera parte 530 y
  - la quinta parte 534,

30 hasta el estado disociativo correspondiente, según se describió anteriormente en el contexto de disociación de un paso y disociación de dos pasos.

35 Los gases que pueden ser posibles para medir con la disociación de tres pasos incluyen también otros tricloruros de metal tales como  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{AlCl}_3$  y  $\text{ThCl}_3$ .

*Dispositivo de medición, disociación de tres pasos*

40 La Figura 7b muestra una realización de un dispositivo 990 para medir el contenido de un compuesto gaseoso 510 de una mezcla gaseosa. El dispositivo 990 está dispuesto para utilizar el antepenúltimo pulso de luz 710c, el penúltimo pulso de luz 710b y el último pulso de luz 710a para disociar la molécula de gas 510 en la primera parte 520 y en las otras partes (525, 530, 532, 534, 536; Figura 7a). El dispositivo 990 está dispuesto para utilizar un haz de luz 170 para detectar el contenido de la primera parte.

Además de los componentes que se muestran en la Figura 6c, el dispositivo de la Figura 7b comprende además:

- 45
- una tercera fuente de pulso de luz 700c, dispuesta para emitir un antepenúltimo pulso de luz monocromático y coherente 710c que tiene la longitud de onda de pulso  $\lambda_{p3}$ ,
  - un séptimo elemento óptico 740c, dispuesto para guiar

- 50
- o el haz de luz 170 a la primera trayectoria óptica 160,
  - o el último pulso de luz 710a a la segunda trayectoria óptica 800,
  - o el penúltimo pulso de luz 710b a la tercera trayectoria óptica y
  - o el antepenúltimo pulso de luz 710c a una cuarta trayectoria óptica 820 de modo que la cuarta trayectoria óptica 820 se superpone a la tercera trayectoria óptica 810, la segunda trayectoria óptica 800 y la primera trayectoria óptica 160,

- 55
- un octavo elemento óptico 742c, dispuesto para pasar el haz de luz atenuado 175, es decir la luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_b$ , dispuesta para pasar el último pulso de luz (atenuado) 715a, es decir luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p1}$  dispuesta para pasar el penúltimo pulso de luz (atenuado) 715b, es decir luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p2}$  y desviar o reflejar el antepenúltimo pulso de luz atenuado 715c, es decir luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p3}$ ,

- 60
- un noveno elemento óptico 744c, dispuesto para reflejar una primera parte de luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p3}$  y pasar una segunda parte de luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p3}$ ,

- 65
- un sexto fotodetector 720c, dispuesto para detectar la intensidad del antepenúltimo pulso de luz atenuado 715c, teniendo el antepenúltimo pulso de luz atenuado la longitud de onda  $\lambda_{p3}$ ,

- un séptimo fotodetector 722c, dispuesto para detectar la intensidad de luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p3}$ .

Según se describió anteriormente en conexión con la penúltima fuente de pulso de luz, la tercera fuente de pulso de luz 700c es opcional. Más generalmente el dispositivo comprende medios para generar un antepenúltimo pulso de luz 710c que tiene la longitud de onda de pulso  $\lambda_{p3}$ . Los medios pueden comprender al menos uno de la primera fuente de pulso de luz, la segunda fuente de pulso de luz y un divisor del pulso de luz.

5 Como se describió anteriormente, los fotodetectores 720c, 720b y 720a son opcionales. De este modo, los componentes ópticos 742c, 742b y 742a son opcionales.

10 Sin embargo, preferiblemente los pulsos de luz no son guiados al fotodetector 320. El elemento óptico puede tomar esto en cuenta 742a. Más aun, medir el contenido gaseoso puede requerir información sobre la energía de los pulsos de luz. La energía de los pulsos puede medirse con los fotodetectores 722a, 722b y 722c. En el caso que la energía sea conocida de otro modo, los fotodetectores 722a, 722b y 722c son opcionales, por lo cual los elementos ópticos 744a, 744b y 744c son opcionales. La energía de los pulsos atenuados puede medirse con los fotodetectores 720a, 722b y 722c.

15 Las trayectorias ópticas 160, 800, 810, 820 son preferiblemente paralelas y concéntricas.

20 Los tamaños de los pulsos de luz preferiblemente se seleccionan de modo que el antepenúltimo pulso de luz 710c tenga una sección transversal mayor que el penúltimo pulso de luz 710b. Más aun, la cuarta trayectoria óptica 820 (del antepenúltimo pulso de luz) y la tercera trayectoria óptica 810 (del penúltimo pulso de luz) son preferiblemente esencialmente paralelas y concéntricas en el significado descrito anteriormente. Por lo tanto, el volumen de la tercera trayectoria óptica 810 está preferiblemente comprendido en el volumen de la cuarta trayectoria óptica 820. Es decir la cuarta trayectoria óptica es mayor en diámetro que la tercera trayectoria óptica.

25 Más aun, el tamaño del penúltimo pulso de luz 710b se selecciona preferiblemente de modo que el penúltimo pulso de luz 710b tenga una sección transversal mayor que el último pulso de luz 710a. Más aun, la tercera trayectoria óptica 810 (del penúltimo pulso de luz) y la segunda trayectoria óptica 800 (del último pulso de luz) son preferiblemente esencialmente paralelas y concéntricas en el significado descrito anteriormente. Por lo tanto, el volumen de la segunda trayectoria óptica 800 está comprendido preferiblemente en el volumen de la tercera trayectoria óptica 810. Es decir la tercera trayectoria óptica es mayor en diámetro que la segunda trayectoria óptica.

30 Más aun, el tamaño del último pulso de luz 710a y el haz de luz 170 se selecciona preferiblemente de modo que el último pulso de luz 710a tenga una sección transversal mayor que el haz de luz 170. Más aun, la segunda trayectoria óptica 800 (del último pulso de luz) y la primera trayectoria óptica 160 (del haz de luz) son preferiblemente esencialmente paralelas y concéntricas (en el significado descrito anteriormente). Por lo tanto, el volumen de la primera trayectoria óptica 160 está comprendido preferiblemente en el volumen de la segunda trayectoria óptica 800. Es decir la segunda trayectoria óptica es mayor en diámetro que la primera trayectoria óptica.

#### *Otras características*

40 El dispositivo 990 puede comprender una fuente de luz integrada. La fuente de luz integrada comprende al menos dos de la fuente de haz de luz 310, la tercera fuente de pulso de luz 700c, la segunda fuente de pulso de luz 700b, la primera fuente de pulso de luz 700a y la fuente de pulso de luz 700. La fuente de luz integrada puede estar dispuesta para emitir luz de modo que las trayectorias ópticas sean esencialmente paralelas. Al menos ningunos del haz de luz y pulsos de luz puede guiarse utilizando reflectores dentro de la fuente de luz integrada. Además, al menos ningunos del haz de luz y pulsos de luz puede guiarse utilizando al menos una fibra óptica dentro de la fuente de luz integrada.

50 El dispositivo 990 puede estar integrado con una caldera. De este modo, puede medirse el contenido de un compuesto gaseoso emitido por la caldera, por ejemplo, en los gases de combustión. La medición puede realizarse *in situ*. La Figura 8 muestra una realización de una caldera 100. El dispositivo 990 para medir el contenido de gas puede integrarse con la caldera. El dispositivo puede integrarse por ejemplo de modo que la caldera 100 comprenda al menos una entrada óptica 130. La caldera 100 puede comprender al menos una salida óptica 135 (ver las Figuras 1a-1d).

55 La caldera 100 de la Figura 8 comprende las paredes 102. Las paredes 102 separan el interior de la caldera y el exterior de la caldera. Por lo tanto, también el techo y el piso se consideran paredes 102. En el interior de la caldera se forma el espacio 110. El espacio 110 puede comprender por ejemplo un espacio de combustión 120, un canal de gas de combustión 122 y/o una chimenea 124. La caldera 100 comprende intercambiadores de calor 150 ubicados en el espacio 110. Un intercambiador de calor 150 puede ser por ejemplo: un dispositivo sobrecalentador, un economizador, un precalentador de aire o un precalentador de alimentación de agua. La caldera 100 comprende, en al menos una pared 102, al menos una entrada óptica 130, tal como una ventana 140 o un agujero 132, para las mediciones ópticas. Una ventana 140 es transparente de modo que la luz puede propagarse a través de la ventana. Preferiblemente la luz del haz de luz de medición no está significativamente atenuada mientras viaja a través de la ventana. La caldera 100 puede comprender al menos una salida óptica 135, tal como una ventana 140 o un agujero 132. En el caso que se utilice un agujero 132 como una entrada óptica, pueden soplarse aire u otro gas a través del agujero 132 en la caldera 100 de modo de retener los gases de combustión en la caldera 100.

De manera similar, el dispositivo 990 puede integrarse con un reactor de gasificación. El reactor de gasificación está dispuesto para gasificar biomasa a gas de síntesis.

5 De manera similar, el dispositivo 990 puede integrarse con un reactor de pirólisis. El reactor de pirólisis está dispuesto para descomponer termoquímicamente material orgánico a temperaturas elevadas.

10 De manera similar, el dispositivo 990 puede integrarse con un reactor de torrefacción. El reactor de torrefacción está dispuesto para extraer termoquímicamente componentes volátiles del material orgánico a temperaturas elevadas (temperaturas más bajas que en el reactor de pirólisis).

#### Ejemplos:

15 1. Un método para medir el contenido de un compuesto gaseoso de una mezcla gaseosa, en donde el compuesto gaseoso consiste en moléculas de compuesto gaseoso (510) y la molécula de compuesto gaseoso (510) no es una molécula de haluro alcalino, en donde la molécula de haluro alcalino tiene forma  $MH^a$ , en donde M es un átomo de metal alcalino del grupo de Li, Na, K, Ru, Cs y Fr y  $H^a$  es un átomo de halógeno del grupo de F, Cl, Br, I y At, comprendiendo el método

20 - generar un haz de luz (170), en donde el haz de luz (170) comprende fotones que tienen una longitud de onda de haz ( $\lambda_b$ ),  
 - guiar el haz de luz (170) a una primera trayectoria óptica (160), en donde  
 - la primera trayectoria óptica (160) corre a través de un espacio (110) que contiene la mezcla gaseosa que comprende el compuesto gaseoso, por lo cual el haz de luz (170) se atenúa a un haz de luz atenuado (175) y  
 - detectar un primer valor indicativo de una primera intensidad ( $I_{k0}$ ) del haz de luz atenuado (175),

25 **caracterizado por**

30 - generar un último pulso de luz (710, 710a), en donde el último pulso de luz (710, 710a) comprende fotones (515, 515b) que tienen una primera longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p1}$ ),  
 - opcionalmente generar otro pulso de luz (710b, 710c),  
 - disociar al menos parte de las moléculas de compuesto gaseoso (510) o al menos parte de las moléculas de compuesto gaseoso excitadas (510b) en la primera trayectoria óptica (160) en al menos dos partes disociadas (520, 525, 530, 532, 534) utilizando el último pulso de luz (710, 710a) o el otro pulso de luz (710b, 710c),  
 35 - disociar (i) al menos parte de las moléculas de compuesto gaseoso (510), (ii) al menos parte de las moléculas de compuesto gaseoso excitadas (510b), (iii) al menos parte de las partes disociadas (530, 534) o (iv) al menos parte de las partes disociadas excitadas (530, 534) en la primera trayectoria óptica (160) en átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte (520) y en otra parte (525, 532, 536) utilizando el último pulso de luz (710, 710a), por lo cual el haz de luz (170) se atenúa adicionalmente a un haz de luz atenuado (175) mediante absorción a los átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte (520) en la primera trayectoria óptica (160),  
 40 - detectar un segundo valor indicativo de una segunda intensidad ( $I_k$ ) del haz de luz atenuado (175) y  
 - determinar, utilizando el primer valor y el segundo valor, el contenido del compuesto gaseoso de la mezcla gaseosa.

45 2. El método del ejemplo 1, caracterizado por

50 - disociar al menos parte de (i) las moléculas de compuesto gaseoso (510) o (ii) moléculas de compuesto gaseoso excitadas (510b) en la primera trayectoria óptica (160) en átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte (520) y en otra parte (525) utilizando el último pulso de luz (710).

3. El método del ejemplo 1, caracterizado por

55 - generar un penúltimo pulso de luz (710b), en donde el penúltimo pulso de luz (710b) comprende fotones (516) que tienen una segunda longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p2}$ ),  
 - disociar al menos parte de (i) las moléculas de compuesto gaseoso (510) o (ii) moléculas de compuesto gaseoso excitadas (510b) en la primera trayectoria óptica (160) en átomos, moléculas, iones o radicales de la tercera parte (530) y en otra parte (525) utilizando el penúltimo pulso de luz (710b) y  
 60 - disociar al menos parte de (i) los átomos, moléculas, iones o radicales de la tercera parte (530) o (ii) los átomos, moléculas, iones o radicales de la tercera parte excitada (530) en átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte (520) y en otra parte (532) utilizando el último pulso de luz (710<sup>a</sup>).

4. El método del ejemplo 1, **caracterizado por**

65 - generar un penúltimo pulso de luz (710b), en donde el penúltimo pulso de luz (710b) comprende fotones (516) que tienen una segunda longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p2}$ ).

- generar un antepenúltimo pulso de luz (710c), en donde el antepenúltimo pulso de luz (710c) comprende fotones (517) que tienen una tercera longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p3}$ ).
- disociar al menos parte de (i) las moléculas de compuesto gaseoso (510) o (ii) moléculas de compuesto gaseoso excitadas (510) en la primera trayectoria óptica (160) en átomos, moléculas, iones o radicales de la tercera parte (530) y en otra parte (525) utilizando el antepenúltimo pulso de luz (710c),
- disociar al menos parte de (i) los átomos, moléculas, iones o radicales de la tercera parte (530) o (ii) los átomos, moléculas, iones o radicales de la tercera parte excitada (530) en átomos, moléculas, iones o radicales de la quinta parte (534) y en otra parte (532) utilizando el penúltimo pulso de luz (710b),
- disociar al menos parte de (i) los átomos, moléculas, iones o radicales de la quinta parte (534) o (ii) los átomos, moléculas, iones o radicales de la quinta parte excitada (534) en átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte (520) y en otra parte (536) utilizando el último pulso de luz (710<sup>a</sup>).
5. El método de cualquiera de los ejemplos 1 a 4, **caracterizado** por excitar
- al menos parte de las moléculas de compuesto gaseoso (510) a moléculas de compuesto gaseoso excitadas (510b) o
- al menos parte de las partes disociadas (530, 534) en partes disociadas excitadas en la primera trayectoria óptica (160) utilizando fotones (515b) comprendidos por el último pulso de luz (710, 710<sup>a</sup>), el otro pulso de luz (710b, 710c) u otro pulso de luz.
6. El método de cualquiera de los ejemplos 1 a 5, **caracterizado** por
- disociar al menos parte de las moléculas del segundo compuesto gaseoso o al menos parte de las moléculas del segundo compuesto gaseoso excitadas en la primera trayectoria óptica (160) en al menos dos partes disociadas,
- generar un segundo haz de luz, en donde el segundo haz de luz comprende fotones que tienen una segunda longitud de onda de haz ( $\lambda_{b2}$ ),
- detectar un tercer valor indicativo de una primera intensidad  $I_{k0}$  del segundo haz de luz atenuado,
- detectar un cuarto valor indicativo de una segunda intensidad  $I_k$  del segundo haz de luz atenuado y
- determinar, utilizando el tercer valor y el cuarto valor, el contenido del segundo contenido de compuesto gaseoso de la mezcla gaseosa.
7. El método de cualquiera de los ejemplos 1 a 5, **caracterizado** por
- disociar al menos parte de las moléculas del segundo compuesto gaseoso o al menos parte de las moléculas del segundo compuesto gaseoso excitadas en la primera trayectoria óptica (160) en al menos dos partes disociadas,
- generar un haz de luz (170), en donde el haz de luz (170) comprende fotones que tienen una primera longitud de onda de haz  $\lambda_{b1}$  y fotones que tienen una segunda longitud de onda de haz  $\lambda_{b2}$ ,
- detectar el primer valor indicativo de una primera intensidad  $I_{k0}$  del haz de luz atenuado (175) a la primera longitud de onda de haz  $\lambda_{b1}$ ,
- detectar un tercer valor indicativo de una primera intensidad  $I_{k0}$  del haz de luz atenuado (175) a la segunda longitud de onda de haz  $\lambda_{b2}$ ,
- detectar el segundo valor indicativo de una segunda intensidad  $I_k$  del haz de luz atenuado (175) a la primera longitud de onda de haz  $\lambda_{b1}$ ,
- detectar un cuarto valor indicativo de una segunda intensidad  $I_k$  del haz de luz atenuado (175) a la segunda longitud de onda de haz  $\lambda_{b2}$  y
- determinar, utilizando el tercer valor y el cuarto valor, el contenido del segundo contenido de compuesto gaseoso de la mezcla gaseosa.
8. El método de cualquiera de los ejemplos 1 a 5, **caracterizado** por
- opcionalmente detectar un tercer valor indicativo de una intensidad  $I_{k0}$  del haz de luz atenuado (175),
- generar otro pulso de luz, en donde el otro pulso de luz comprende fotones (515) que tienen otra longitud de onda de pulso  $\lambda_{p1,1}$ ,
- disociar al menos parte de (i) las moléculas del segundo compuesto gaseoso o (ii) moléculas del segundo compuesto gaseoso excitado en la primera trayectoria óptica (160) utilizando el otro pulso de luz, por lo cual el haz de luz (170) se atenúa adicionalmente a un haz de luz atenuado (175) mediante absorción (i) a un producto de disociación de las moléculas del segundo compuesto gaseoso o (ii) a un producto de disociación de las moléculas del segundo compuesto gaseoso excitado en la primera trayectoria óptica (160),
- detectar un cuarto valor indicativo de una segunda intensidad  $I_k$  del haz de luz atenuado (175),
- determinar, utilizando el cuarto valor y al menos uno del tercer valor y el primer valor, el contenido del segundo contenido de compuesto gaseoso de la mezcla gaseosa.
9. El método de cualquiera de los ejemplos 1 a 8, **caracterizado** por

- 5 - seleccionar la longitud de onda de pulso  $\lambda_{p1}$  y espectro de longitudes de onda del último pulso de luz (710, 710a) de modo que  
 - al menos parte de (i) las moléculas de compuesto gaseoso (510), (ii) las moléculas de compuesto gaseoso excitadas (510b), (iii) las partes disociadas (530, 534) o (iv) las partes disociadas excitadas se disocian con el último pulso de luz (710, 710a) y esencialmente ninguna molécula de haluro alcalino se disocia con el último pulso de luz (710, 710a), en donde la molécula de haluro alcalino tiene la forma  $MH^a$ , en donde M es un átomo de metal alcalino del grupo de Li, Na, K, Ru, Cs y Fr, y  $H^a$  es un átomo de halógeno del grupo de F, Cl, Br, I y At.
- 10 10. El método de cualquiera de los ejemplos 1 a 9, **caracterizado** porque  
 - el último pulso de luz (710, 710a) comprende fotones de modo que  
 - al menos un fotón (515, 515b) es capaz de excitar la molécula de compuesto gaseoso (510), la molécula de compuesto gaseoso excitado (510b), una parte disociada (530, 534) o una parte disociada excitada a un estado disociativo (512, 531, 535) que tiene una energía de al menos 2,88 eV por encima del estado fundamental de la molécula de compuesto gaseoso (510) o el estado fundamental de la parte disociada (530,534).
- 15 11. El método del ejemplo 10, **caracterizado** porque  
 - el último pulso de luz (710, 710a) comprende fotones que tienen la primera longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p1}$ ), en donde  
 - la primera longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p1}$ ) es a lo sumo 430 nm.
- 20 12. El método del ejemplo 11, **caracterizado** porque  
 - el último pulso de luz (710, 710<sup>a</sup>) no comprende fotones que tienen una longitud de onda seleccionada del grupo de 420 nm, 370 nm, 270 nm y 266 nm.
- 25 13. El método del ejemplo 11 o 12, **caracterizado** porque  
 - el último pulso de luz (710, 710a) no comprende fotones que tienen una longitud de onda de 230 nm a 290 nm.
- 30 14. El método de cualquiera del ejemplo 13, **caracterizado** porque  
 - el haz de luz (170) no comprende fotones que tienen la longitud de onda 766 nm o 266 nm.
- 35 15. El método de cualquiera de los ejemplos 1 a 14, **caracterizado** porque  
 - el último pulso de luz (710, 710<sup>a</sup>) es esencialmente monocromático.
- 40 16. El método de cualquiera de los ejemplos 1 a 15, **caracterizado** porque  
 - el haz de luz (170) comprende fotones que tienen la longitud de onda de haz ( $\lambda_b$ ), en donde  
 - la longitud de onda de haz es a lo sumo 1800 nm.
- 45 17. El método de cualquiera de los ejemplos 1 a 16, **caracterizado** porque  
 - el haz de luz (170) es monocromático o esencialmente monocromático.
- 50 18. El método de cualquiera de los ejemplos 1 a 17, **caracterizado** porque  
 - el haz de luz (170) tiene una primera sección transversal,  
 - el último pulso de luz (710, 710<sup>a</sup>) tiene una segunda sección transversal y  
 - la segunda sección transversal es mayor que la primera sección transversal.
- 55 19. El método de cualquiera de los ejemplos 1 a 18, **caracterizado** porque  
 - el haz de luz (170) es monocromático o esencialmente monocromático y tiene la longitud de onda de haz ( $\lambda_b$ )  
 - el último pulso de luz (710, 710a) es monocromático o esencialmente monocromático y tiene la primera longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p1}$ ) y
- 60 el método comprende
- 65

- guiar al menos parte del último pulso de luz (710, 710a) a una segunda trayectoria óptica (800) de modo que
- la segunda trayectoria óptica (800) es esencialmente paralela a la primera trayectoria óptica (160).

- 5
20. El método del ejemplo 19, **caracterizado** porque
- la primera trayectoria óptica (160) y la segunda trayectoria óptica (800) son esencialmente concéntricas.
- 10
21. El método de cualquiera de los ejemplos 1 a 20, **caracterizado** porque
- la molécula de compuesto gaseoso (510) comprende al menos tres átomos, por lo cual el método comprende
  - disociar al menos parte de las moléculas de compuesto gaseoso (510) que comprenden al menos tres átomos con un pulso de luz (710, 710a, 710b, 710c).
- 15
22. El método del ejemplo 1 o 2, **caracterizado** porque el compuesto gaseoso se selecciona del grupo que comprende
- hidróxidos alcalinos de la forma MOH, en donde M es un átomo alcalino (metal) del grupo IA de la tabla periódica de los elementos, excluyendo hidrógeno,
  - monóxidos de metal, tales como PbO, NiO, MnO y CrO,
  - sales de metal de polihaluro disociadas térmicamente, tales como PbCl, HgCl,
  - NO<sub>2</sub>,
  - sulfatos por ejemplo sulfatos de metal tales como sulfato de potasio (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>),
  - carbonatos, por ejemplo carbonatos de metal tales como carbonato de potasio (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) y
  - sulfuros de metal de la forma M<sup>1</sup>S, en donde M<sup>1</sup> es un átomo de metal y S es un átomo de azufre.
- 20
- 25
23. El método del ejemplo 22, **caracterizado** porque
- el compuesto gaseoso es hidróxido de sodio (NaOH),
  - la primera longitud de onda ( $\lambda_{p1}$ ) es de 300 nm a 350 nm y
  - la longitud de onda de haz ( $\lambda_b$ ) es una de 285 nm, 330 nm y 589 nm.
- 30
24. El método del ejemplo 1 o 3, **caracterizado** porque
- el compuesto gaseoso se selecciona del grupo de haluros de metal de la forma M<sup>2</sup>H<sup>a</sup><sub>2</sub>, en donde M<sup>2</sup> es un átomo de metal tal como Ni, Sn, Cu, Zn, Pb o Hg o un átomo de metal alcalinotérreo del grupo II y el halógeno H<sup>a</sup> se selecciona del grupo de F, Cl, Br, I y At.
- 35
- 40
25. El método del ejemplo 24, **caracterizado** porque
- el compuesto gaseoso es cloruro de plomo (PbCl<sub>2</sub>),
  - el haz de luz (170) es monocromático que tiene la longitud de onda de haz ( $\lambda_b$ ) de 406 nm,
  - el último pulso de luz (710<sup>a</sup>) es monocromático que tiene la primera longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p1}$ ) de 266 nm,
  - el penúltimo pulso de luz (710b) es monocromático que tiene la segunda longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p2}$ ) de 355 nm, en donde el método comprende
  - guiar al menos parte del último pulso de luz (710<sup>a</sup>) a una segunda trayectoria óptica (800) y
  - guiar al menos parte del penúltimo pulso de luz (710b) a una tercera trayectoria óptica (810) de modo que
  - la tercera trayectoria óptica (810), la segunda trayectoria óptica (800) y la primera trayectoria óptica (160) son esencialmente paralelas y concéntricas.
- 45
- 50
26. El método del ejemplo 1 o 4, **caracterizado** porque
- el compuesto gaseoso se selecciona del grupo de trihaluros de metal, por ejemplo, FeCl<sub>3</sub>, AlCl<sub>3</sub>, CrCl<sub>3</sub> y ThCl<sub>3</sub>.
- 55
27. El método de cualquiera de los ejemplos 1 a 26, **caracterizado** por
- 60
- producir la mezcla gaseosa en un proceso térmico, en donde el proceso térmico es uno de combustión, pirólisis, gasificación y torrefacción, en donde la mezcla gaseosa comprende las moléculas de compuesto gaseoso (510).
- 65
28. Un dispositivo (990) para medir el contenido de un compuesto gaseoso de una mezcla gaseosa, en donde el compuesto gaseoso consiste en moléculas de compuesto gaseoso (510) y la molécula de compuesto gaseoso no es una molécula de haluro alcalino, en donde la molécula de haluro alcalino tiene forma MH<sup>a</sup>, en

donde M es un átomo de metal alcalino del grupo de Li, Na, K, Ru, Cs y Fr y H<sup>a</sup> es un átomo de halógeno del grupo de F, Cl, Br, I y At, comprendiendo el dispositivo

- 5 - una fuente de haz de luz (310), dispuesta para emitir un haz de luz (170) que comprende fotones con una longitud de onda de haz ( $\lambda_b$ ) y  
 - un fotodetector (320), en donde  
 - una primera trayectoria óptica (160) está dispuesta ópticamente entre el fotodetector (320) y la fuente de haz de luz (310),  
 10 - un espacio (110), a través del cual la primera trayectoria óptica (160) está dispuesta para correr, se dispone para contener la mezcla gaseosa que absorbe el haz de luz (170),  
 - un haz de luz (170) está dispuesto para atenuarse a un haz de luz atenuado (175) mediante dicha absorción del haz de luz (170) y  
 - el fotodetector (320) está dispuesto para detectar un primer valor indicativo de una primera intensidad ( $I_{k0}$ ) del haz de luz atenuado (175),  
 15 caracterizado porque el dispositivo (990) comprende  
 - al menos una primera fuente de pulso de luz (700, 700a), en donde  
 - la primera fuente de pulso de luz (700, 700a) está dispuesta para generar un último pulso de luz (710, 710a) que comprende fotones (515) que tienen una primera longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p1}$ ), al menos parte de los fotones (515) disocian al menos parte de las (i) moléculas de compuesto gaseoso (510), (ii) moléculas de compuesto gaseoso excitadas (510b), (iii) partes disociadas (530, 534) o (iv) partes disociadas excitadas (530, 534) en la primera trayectoria óptica (160) en átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte (520) y en otra parte (525, 532, 536), en donde el haz de luz (170) se atenúa adicionalmente al haz de luz atenuado (175) mediante absorción a los átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte (520) en la primera trayectoria óptica (160), en donde las partes disociadas (530, 534) han sido producidas  
 20 opcionalmente a partir de las moléculas de compuesto gaseoso (510) mediante disociación utilizando al menos otro pulso de luz,  
 - el fotodetector (320) está dispuesto para detectar un segundo valor indicativo de una segunda intensidad ( $I_k$ ) del haz de luz atenuado (175) y  
 - el dispositivo (990) comprende una unidad de procesamiento de datos dispuesta para determinar, utilizando  
 25 el primer valor y el segundo valor, el contenido de compuesto gaseoso en la mezcla gaseosa.

29. El método del ejemplo 28, **caracterizado** porque

- 35 - la primera fuente de pulso de luz (700, 700a), está dispuesta para generar el último pulso de luz (710, 710a) que comprende fotones (515) que tienen una primera longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p1}$ ), al menos parte de los fotones (515) que disocian al menos parte de las (i) moléculas de compuesto gaseoso (510) o (ii) moléculas de compuesto gaseoso excitadas (510b) en la primera trayectoria óptica (160) en los átomos, moléculas, iones, o radicales de la primera parte (520) y en otra parte (525).

40 30. El dispositivo del ejemplo 28, **caracterizado** porque el dispositivo (990) comprende

- medios para generar un penúltimo pulso de luz (710b), en donde  
 - el penúltimo pulso de luz (710b) comprende fotones (516) que tienen una segunda longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p2}$ ), al menos parte de los fotones (516) que disocian al menos parte de (i) las moléculas del compuesto gaseoso (510) o (ii) moléculas del compuesto gaseoso excitado (510b) en la primera trayectoria óptica (160) en átomos, moléculas, iones o radicales de la tercera parte (530) y en otra parte (525) y  
 45 - la primera fuente de pulso de luz (700a) está dispuesta para generar el último pulso de luz (710a) que comprende fotones (515) que tienen una primera longitud de onda ( $\lambda_{p1}$ ), al menos parte de los fotones (515) disocian al menos parte de (i) los átomos, moléculas, iones o radicales de la tercera parte (530) o (ii) átomos, moléculas, iones o radicales de la tercera parte excitada (530) en átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte (520) y en otra parte (532).

31. El dispositivo del ejemplo 30, **caracterizado** porque el dispositivo (990) comprende

- 55 - medios para generar un antepenúltimo pulso de luz (710c) y  
 - medios para generar un penúltimo pulso de luz (710b), en donde  
 - el antepenúltimo pulso de luz (710c) comprende fotones (517) que tienen una tercera longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p3}$ ), al menos parte de los fotones (517) que disocian al menos parte de (i) las moléculas del compuesto gaseoso (510) o (ii) moléculas del compuesto gaseoso excitado (510) en la primera trayectoria óptica (160) en átomos, moléculas, iones o radicales de la tercera parte (530) y en otra parte (525) ,  
 60 - el penúltimo pulso de luz (700b) comprende fotones (516) que tienen una segunda longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p2}$ ), al menos parte de los fotones (516) disocian al menos parte de (i) los átomos, moléculas, iones o radicales de la tercera parte (530) o (ii) átomos, moléculas, iones o radicales de la tercera parte excitada (530) en átomos, moléculas, iones o radicales de la quinta parte (534) y en otra parte (532) y  
 65 - la primera fuente de pulso de luz (700<sup>a</sup>) está dispuesta para generar el último pulso de luz (710<sup>a</sup>) que comprende fotones (515) que tienen una primera longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p1}$ ), al menos parte de los

fotones (515) disocian al menos parte de (i) los átomos, moléculas, iones o radicales de la quinta parte (534) o (ii) átomos, moléculas, iones o radicales de la quinta parte excitada (534) en átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte (520) y en otra parte (536).

5 32. El dispositivo de cualquiera de los ejemplos 28 a 31, **caracterizado** porque el dispositivo (990) comprende

10 - una fuente de haz de luz dispuesta para emitir luz que comprende fotones que tienen la primera longitud de onda de haz  $\lambda_{b1}$  y fotones que tienen una segunda longitud de onda de haz  $\lambda_{b2}$  y  
 - (a) un fotodetector dispuesto para detectar la intensidad de luz en la primera longitud de onda de haz  $\lambda_{b1}$  y la intensidad de luz en la segunda longitud de onda de haz  $\lambda_{b2}$ ; o (b) un fotodetector dispuesto para detectar la intensidad de luz en la primera longitud de onda de haz  $\lambda_{b1}$  y otro fotodetector dispuesto para detectar la intensidad de luz en la segunda longitud de onda de haz  $\lambda_{b2}$ .

15 33. El dispositivo de cualquiera de los ejemplos 28 a 31, **caracterizado** porque el dispositivo (990) comprende

20 - una segunda fuente de haz de luz y  
 - (a) el fotodetector (320) está dispuesto para detectar también la intensidad del segundo haz de luz atenuado; o (b) el dispositivo comprende otro fotodetector, dispuesto para detectar la intensidad del segundo haz de luz atenuado.

25 34. El dispositivo de cualquiera de los ejemplos 28 a 31, **caracterizado** porque el dispositivo (990) comprende

30 - medios para generar un segundo pulso de luz, en donde  
 - el segundo pulso de luz comprende fotones que tienen otra longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p1,1}$ ), al menos parte de los fotones que disocian al menos parte de (i) las moléculas del segundo compuesto gaseoso o (ii) moléculas del segundo compuesto gaseoso excitado en la primera trayectoria óptica (160).

35 35. El dispositivo de cualquiera de los ejemplos 28 a 34, **caracterizado** porque la fuente de pulso de luz (700) está dispuesta para emitir el último pulso de luz (710, 710a) de modo que al menos parte de (i) las moléculas del compuesto gaseoso (510) (ii) las moléculas de compuesto gaseoso excitadas, (iii) las partes disociadas (530, 534) o (iv) las partes disociadas excitadas se disocian con el último pulso de luz (710, 710a) y esencialmente ninguna molécula de haluro alcalino se disocia con el último pulso de luz (710, 710a), en donde la molécula de haluro alcalino tiene la forma  $MH^a$ , en donde M es un átomo de metal alcalino del grupo de Li, Na, K, Ru, Cs y Fr, y  $H^a$  es un átomo de halógeno del grupo de F, Cl, Br, I y At.

40 36. El dispositivo de cualquiera de los ejemplos 28 a 35, **caracterizado** porque

45 - la primera fuente de pulso de luz (700, 700a) está dispuesta para emitir un pulso de luz que comprende fotones de modo que  
 - al menos un fotón (515, 515b) es capaz de excitar la molécula de compuesto gaseoso (510), la molécula de compuesto gaseoso excitado (510), una parte disociada (530, 534) o una parte disociada excitada (530, 534) a un estado disociativo (512) que tiene una energía de al menos 2,88 eV por encima del estado fundamental de la molécula de compuesto gaseoso (510) o el estado fundamental de la parte disociada (530,534).

50 37. El dispositivo del ejemplo 36, **caracterizado** porque

- la primera fuente de pulso de luz (700, 700a) está dispuesta para emitir un pulso de luz que comprende fotones que tienen la primera longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p1}$ ), en donde  
 - la primera longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p1}$ ) es a lo sumo 430 nm.

55 38. El dispositivo de cualquiera de los ejemplos 28 a 37, **caracterizado** porque

- la primera fuente de pulso de luz (700, 700a) está dispuesta para emitir un pulso de luz que no comprende fotones que tienen una longitud de onda seleccionada del grupo de 420 nm, 370 nm, 270 nm y 266 nm.

60 39. El dispositivo de cualquiera de los ejemplos 28 a 38, **caracterizado** porque

- la primera fuente de pulso de luz (700, 700a) está dispuesta para emitir un pulso de luz que no comprende fotones que tienen una longitud de onda de 230 nm a 290 nm.

65 40. El dispositivo de cualquiera de los ejemplos 28 a 39, **caracterizado** porque

- la primera fuente de pulso de luz (700, 700a) es un láser.

41. El dispositivo de cualquiera de los ejemplos 28 a 40, **caracterizado** porque
- 5 - una fuente de haz de luz (310) está dispuesta para emitir un haz de luz que comprende fotones con la longitud de onda de haz ( $\lambda_b$ ), en donde  
 - la longitud de onda de haz ( $\lambda_b$ ) es a lo sumo 1800 nm.
42. El dispositivo de cualquiera de los ejemplos 28 a 41, **caracterizado** porque
- 10 - la fuente de haz de luz (310) es un láser.
43. El dispositivo de cualquiera de los ejemplos 28 a 42, **caracterizado** porque el dispositivo comprende
- 15 - una fuente de luz integrada (730), en donde la fuente de luz integrada (730) comprende al menos dos fuentes de luz (310, 700, 700a, 700b, 700c).
44. El dispositivo de cualquiera de los ejemplos 28 a 43, **caracterizado** porque el dispositivo comprende
- 20 - un primer elemento óptico (740), en donde el primer elemento óptico (740) está dispuesto  
 - para guiar el haz de luz (170) a la primera trayectoria óptica (160) y  
 - para guiar el último pulso de luz (710, 710a) a una segunda trayectoria óptica (800), en donde  
 - la segunda trayectoria óptica (800) es esencialmente paralela a la primera trayectoria óptica (160) y
- 25 - la primera trayectoria óptica (160) y la segunda trayectoria óptica (800) son esencialmente concéntricas.
45. El dispositivo del ejemplo 44, **caracterizado** porque el dispositivo comprende
- un segundo elemento óptico (742), en donde el segundo elemento óptico (742) está dispuesto
- 30 - para pasar el haz de luz atenuado (175) al fotodetector (320) y  
 - para desviar, reflejar o absorber el último pulso de luz atenuado (715, 715a).
46. El dispositivo de cualquiera de los ejemplos 28 a 45, **caracterizado** porque
- 35 - la fuente de haz de luz (310) está dispuesta para emitir un haz de luz (170) que tiene una primera sección transversal y  
 - la primera fuente de pulso de luz (700, 700a) está dispuesta para emitir el último pulso de luz (710, 710a) que tiene una segunda sección transversal, de modo que  
 - la segunda sección transversal es mayor que la primera sección transversal.
- 40
47. El dispositivo de cualquiera de los ejemplos 28 a 46, **caracterizado** porque una fuente de pulso de luz (700, 700a, 700b, 700c) está dispuesta para generar un pulso de luz (710, 710a, 710b, 710c) que comprende fotones (515, 516, 517) que tienen una longitud de onda de pulso, de modo que los fotones (515, 516, 517) están dispuestos para disociar una molécula de compuesto gaseoso (510) o una molécula de compuesto gaseoso excitado (510b) que comprende al menos tres átomos.
- 45
48. El dispositivo del ejemplo 28 o 29, **caracterizado** porque
- 50 - el compuesto gaseoso es hidróxido de sodio (NaOH),  
 - la primera longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p1}$ ) es de 300 nm a 350 nm y  
 - la longitud de onda de haz ( $\lambda_b$ ) es una de 285 nm, 330 nm y 589 nm.
49. El dispositivo del ejemplo 28 o 30, **caracterizado** porque el compuesto gaseoso es cloruro de plomo ( $\text{PbCl}_2$ ) y el dispositivo comprende
- 55 - la fuente de haz de luz (310), dispuesta para emitir un haz de luz monocromática (170) que tiene la longitud de onda de haz ( $\lambda_b$ ) de 406 nm,  
 - la primera fuente de pulso de luz (700a), dispuesta para emitir un último pulso de luz monocromático (710a) que tiene la primera longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p1}$ ) de 266 nm,  
 - la segunda fuente de pulso de luz (700b), dispuesta para emitir un penúltimo pulso de luz monocromático (710b) que tiene la primera longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p2}$ ) de 355 nm,  
 - al menos un elemento óptico, dispuesto para guiar el haz de luz (170) a la primera trayectoria óptica (160), el último pulso de luz (710a) a la segunda trayectoria óptica (800) y el penúltimo pulso de luz (710b) a una tercera trayectoria óptica de modo que la primera, segunda y tercera trayectorias ópticas (160, 800, 810) son esencialmente paralelas y concéntricas.
- 60
- 65

50. Una caldera (100) que comprende el dispositivo de cualquiera de los ejemplos 28 a 49.
51. Un reactor de gasificación que comprende el dispositivo de cualquiera de los ejemplos 28 a 49.
52. Un reactor de pirólisis que comprende el dispositivo de cualquiera de los ejemplos 28 a 49.
53. Un reactor de torrefacción que comprende el dispositivo de cualquiera de los ejemplos 28 a 49.

## REIVINDICACIONES

1. Un método para medir el contenido de un compuesto gaseoso de una mezcla gaseosa, en donde el compuesto gaseoso consiste en moléculas de compuesto gaseoso (510) y la molécula de compuesto gaseoso (510) no es una molécula de haluro alcalino, en donde la molécula de haluro alcalino tiene la forma  $MH^a$ , en donde M es un átomo de metal alcalino del grupo de Li, Na, K, Ru, Cs y Fr, y  $H^a$  es un átomo de halógeno del grupo de F, Cl, Br, I y At, comprendiendo el método

- generar un haz de luz (170), en donde el haz de luz (170) comprende fotones que tienen una longitud de onda de haz ( $\lambda_b$ ),
- guiar el haz de luz (170) a una primera trayectoria óptica (160), en donde
- la primera trayectoria óptica (160) corre a través de un espacio (110) que contiene la mezcla gaseosa que comprende el compuesto gaseoso, por lo cual el haz de luz (170) se atenúa a un haz de luz atenuado (175),
- detectar un primer valor indicativo de una primera intensidad ( $I_{k0}$ ) del haz de luz atenuado (175),
- generar un último pulso de luz (710, 710a), en donde el último pulso de luz (710, 710a) comprende fotones (515, 515b) que tienen una primera longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p1}$ ) y
- opcionalmente generar otro pulso de luz (710b, 710c),

**caracterizado porque**

- el haz de luz (170) es monocromático o esencialmente monocromático y tiene la longitud de onda de haz ( $\lambda_b$ )
- el último pulso de luz (710, 710a) es monocromático o esencialmente monocromático y tiene la primera longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p1}$ ), comprendiendo además el método
- guiar al menos parte del último pulso de luz (710, 710a) a una segunda trayectoria óptica (800), que corre a través del espacio (110), de modo que la segunda trayectoria óptica (800) es esencialmente paralela a la primera trayectoria óptica (160),
- disociar al menos parte de las moléculas de compuesto gaseoso (510) o al menos parte de las moléculas de compuesto gaseoso excitadas (510b) en la primera trayectoria óptica (160) en al menos dos partes disociadas (520, 525, 530, 532, 534) utilizando el último pulso de luz (710, 710a) o el otro pulso de luz (710b, 710c),
- disociar (i) al menos parte de las moléculas de compuesto gaseoso (510), (ii) al menos parte de las moléculas de compuesto gaseoso excitadas (510b), (iii) al menos parte de las partes disociadas (530, 534) o (iv) al menos parte de las partes disociadas excitadas (530, 534) en la primera trayectoria óptica (160) en átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte (520) y en otra parte (525, 532, 536) utilizando el último pulso de luz (710, 710a), por lo cual el haz de luz (170) se atenúa adicionalmente a un haz de luz atenuado (175) mediante absorción a los átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte (520) en la primera trayectoria óptica (160),
- seleccionar la longitud de onda de haz ( $\lambda_b$ ) de modo que corresponda al perfil de absorción de la primera parte (520),
- detectar un segundo valor indicativo de una segunda intensidad ( $I_k$ ) del haz de luz atenuado (175) y
- determinar, utilizando el primer valor y el segundo valor, el contenido del compuesto gaseoso de la mezcla gaseosa.

2. El método de la reivindicación 1, **caracterizado por**

- disociar al menos parte de (i) las moléculas de compuesto gaseoso (510) o (ii) moléculas de compuesto gaseoso excitadas (510b) en la primera trayectoria óptica (160) en átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte (520) y en otra parte (525) utilizando el último pulso de luz (710).

3. El método de la reivindicación 1, **caracterizado por**

- generar un penúltimo pulso de luz (710b), en donde el penúltimo pulso de luz (710b) comprende fotones (516) que tienen una segunda longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p2}$ ),
- disociar al menos parte de (i) las moléculas de compuesto gaseoso (510) o (ii) moléculas de compuesto gaseoso excitadas (510b) en la primera trayectoria óptica (160) en átomos, moléculas, iones o radicales de la tercera parte (530) y en otra parte (525) utilizando el penúltimo pulso de luz (710b) y
- disociar al menos parte de (i) los átomos, moléculas, iones o radicales de la tercera parte (530) o (ii) los átomos, moléculas, iones o radicales de la tercera parte excitada (530) en los átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte (520) y en otra parte (532) utilizando el último pulso de luz (710a).

4. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, **caracterizado por**

- disociar al menos parte de las moléculas del segundo compuesto gaseoso o al menos parte de las moléculas del segundo compuesto gaseoso excitadas en la primera trayectoria óptica (160) en al menos dos partes disociadas,

- generar un segundo haz de luz, en donde el segundo haz de luz comprende fotones que tienen una segunda longitud de onda de haz ( $\lambda_{b2}$ ),
- detectar un tercer valor indicativo de una primera intensidad  $I_{k0}$  del segundo haz de luz atenuado,
- detectar un cuarto valor indicativo de una segunda intensidad  $I_k$  del segundo haz de luz atenuado y
- determinar, utilizando el tercer valor y el cuarto valor, el contenido del segundo contenido de compuesto gaseoso de la mezcla gaseosa.

5. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, **caracterizado por**

- opcionalmente detectar un tercer valor indicativo de una intensidad  $I_{k0}$  del haz de luz atenuado (175),
- generar otro pulso de luz, en donde el otro pulso de luz comprende fotones (515) que tienen otra longitud de onda de pulso  $\lambda_{p1,1}$ ,
- disociar al menos parte de las (i) moléculas del segundo compuesto gaseoso o (ii) moléculas del segundo compuesto gaseoso excitado en la primera trayectoria óptica (160) utilizando el otro pulso de luz, por lo cual el haz de luz (170) se atenúa adicionalmente a un haz de luz atenuado (175) mediante absorción (i) a un producto de disociación de las moléculas del segundo compuesto gaseoso o (ii) a un producto de disociación de las moléculas del segundo compuesto gaseoso excitado en la primera trayectoria óptica (160),
- detectar un cuarto valor indicativo de una segunda intensidad  $I_k$  del haz de luz atenuado (175),
- determinar, utilizando el cuarto valor y al menos uno del tercer valor y el primer valor, el contenido del segundo contenido de compuesto gaseoso de la mezcla gaseosa.

6. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, **caracterizado porque**

- el último pulso de luz (710, 710a) comprende fotones que tienen una primera longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p1}$ ), donde la primera longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p1}$ ) es a lo sumo 430 nm y al menos un fotón (515, 515b) es capaz de excitar la molécula de compuesto gaseoso (510), la molécula de compuesto gaseoso excitado (510b), una parte disociada (530, 534) o una parte disociada excitada a un estado disociativo (512, 531, 535) que tiene una energía de al menos 2,88 eV por encima del estado fundamental de la molécula de compuesto gaseoso (510) o el estado fundamental de la parte disociada (530,534) y/o
- el haz de luz (170) comprende fotones que tienen la longitud de onda de haz ( $\lambda_b$ ), en donde la longitud de onda de haz es a lo sumo 1800 nm.

7. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, **caracterizado porque**

- el haz de luz (170) tiene una primera sección transversal,
- el último pulso de luz (710, 710a) tiene una segunda sección transversal y
- la segunda sección transversal es mayor que la primera sección transversal.

8. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, **caracterizado porque**

- la primera trayectoria óptica (160) y la segunda trayectoria óptica (800) son esencialmente concéntricas.

9. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, **caracterizado por**

- producir la mezcla gaseosa en un proceso térmico, en donde el proceso térmico es uno de combustión, pirólisis, gasificación y torrefacción, en donde la mezcla gaseosa comprende las moléculas de compuesto gaseoso (510).

10. Un dispositivo (990) para medir el contenido de un compuesto gaseoso de una mezcla gaseosa, en donde el compuesto gaseoso consiste en moléculas de compuesto gaseoso (510) y la molécula de compuesto gaseoso no es una molécula de haluro alcalino, en donde la molécula de haluro alcalino tiene forma  $MH^a$ , en donde M es un átomo de metal alcalino del grupo de Li, Na, K, Ru, Cs y Fr y  $H^a$  es un átomo de halógeno del grupo de F, Cl, Br, I y At, comprendiendo el dispositivo

- una fuente de haz de luz (310), dispuesta para emitir un haz de luz (170) que comprende fotones que tienen una longitud de onda de haz ( $\lambda_b$ ) y
- un fotodetector (320), en donde
- una primera trayectoria óptica (160) está dispuesta ópticamente entre el fotodetector (320) y la fuente de haz de luz (310),
- un espacio (110), a través del cual la primera trayectoria óptica (160) está dispuesta para correr, se dispone para contener la mezcla gaseosa que absorbe el haz de luz (170),
- un haz de luz (170) está dispuesto para atenuarse a un haz de luz atenuado (175) mediante dicha absorción del haz de luz (170),
- el fotodetector (320) está dispuesto para detectar un primer valor indicativo de una primera intensidad ( $I_{k0}$ ) del haz de luz atenuado (175),
- al menos una primera fuente de pulso de luz (700, 700a), en donde

**caracterizado porque**

- la fuente de haz de luz (310) es un láser,
- la primera fuente de pulso de luz (700, 700a) está dispuesta para generar un último pulso de luz (710, 710a) que comprende fotones (515) que tienen una primera longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p1}$ ), al menos parte de los fotones (515) disocian al menos parte de las (i) moléculas de compuesto gaseoso (510), (ii) moléculas de compuesto gaseoso excitadas (510b), (iii) partes disociadas (530, 534) o (iv) partes disociadas excitadas (530, 534) en la primera trayectoria óptica (160) en átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte (520) y en otra parte (525, 532, 536), en donde el haz de luz (170) se atenúa adicionalmente al haz de luz atenuado (175) mediante absorción a los átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte (520) en la primera trayectoria óptica (160), en donde las partes disociadas (530, 534) han sido producidas opcionalmente a partir de las moléculas de compuesto gaseoso (510) mediante disociación utilizando al menos otro pulso de luz,
- la longitud de onda de haz ( $\lambda_b$ ) se selecciona de modo que corresponde al perfil de absorción de la primera parte (520),
- el fotodetector (320) está dispuesto para detectar un segundo valor indicativo de una segunda intensidad ( $I_k$ ) del haz de luz atenuado (175) y el dispositivo (990) comprende
- un primer elemento óptico (740), en donde el primer elemento óptico (740) está dispuesto (i) para guiar el haz de luz (170) a la primera trayectoria óptica (160) y (ii) para guiar el último pulso de luz (710, 710a) a una segunda trayectoria óptica (800) que corre a través del espacio (110), en donde (iii) la segunda trayectoria óptica (800) es esencialmente paralela a la primera trayectoria óptica (160) y
- una unidad de procesamiento de datos dispuesta para determinar el primer valor y el segundo valor, el contenido de compuesto gaseoso en la mezcla gaseosa.

25 11. El dispositivo de la reivindicación 10, **caracterizado porque**

- la primera fuente de pulso de luz (700, 700a), está dispuesta para generar el último pulso de luz (710, 710a) que comprende fotones (515) que tienen una primera longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p1}$ ), al menos parte de los fotones (515) que disocian al menos parte de las (i) moléculas de compuesto gaseoso (510) o (ii) moléculas de compuesto gaseoso excitadas (510b) en la primera trayectoria óptica (160) en los átomos, moléculas, iones, o radicales de la primera parte (520) y en otra parte (525).

12. El dispositivo de la reivindicación 10, **caracterizado porque** el dispositivo (990) comprende

- medios para generar un penúltimo pulso de luz (710b), en donde
- el penúltimo pulso de luz (710b) comprende fotones (516) que tienen una segunda longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p2}$ ), al menos parte de los fotones (516) que disocian al menos parte de (i) las moléculas del compuesto gaseoso (510) o (ii) moléculas del compuesto gaseoso excitado (510b) en la primera trayectoria óptica (160) en átomos, moléculas, iones o radicales de la tercera parte (530) y en otra parte (525) y
- la primera fuente de pulso de luz (700a) está dispuesta para generar el último pulso de luz (710a) que comprende fotones (515) que tienen una primera longitud de onda ( $\lambda_{p1}$ ), al menos parte de los fotones (515) disocian al menos parte de (i) los átomos, moléculas, iones o radicales de la tercera parte (530) o (ii) átomos, moléculas, iones o radicales de la tercera parte excitada (530) en átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte (520) y en otra parte (532).

13. El dispositivo de cualquiera de las reivindicaciones 10 a 12, **caracterizado porque**

- la primera fuente de pulso de luz (700, 700a) es un láser.

14. El dispositivo de cualquiera de las reivindicaciones 10 a 13, **caracterizado porque**

- la primera trayectoria óptica (160) y la segunda trayectoria óptica (800) son esencialmente concéntricas.

15. El dispositivo de cualquiera de las reivindicaciones 10 a 14, **caracterizado porque**

- la fuente de haz de luz (310) está dispuesta para emitir un haz de luz (170) que tiene una primera sección transversal y
- la primera fuente de pulso de luz (700, 700a) está dispuesta para emitir el último pulso de luz (710, 710a) que tiene una segunda sección transversal, de modo que
- la segunda sección transversal es mayor que la primera sección transversal.

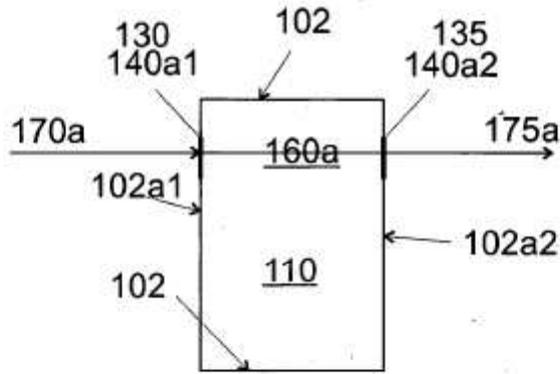


Fig. 1a

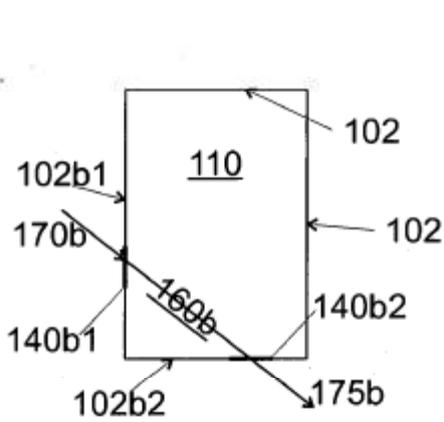


Fig. 1b

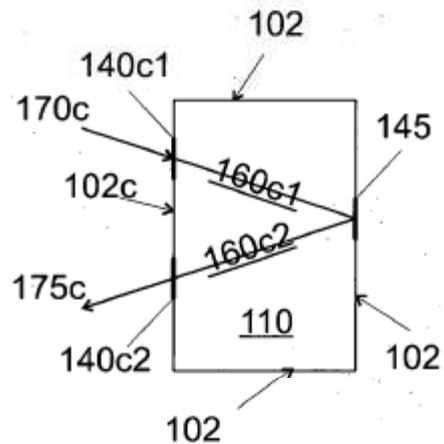


Fig. 1c

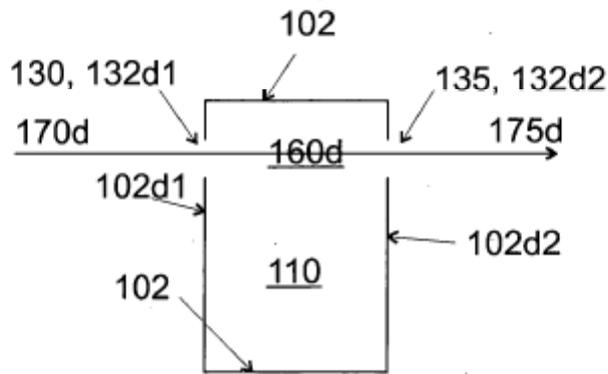
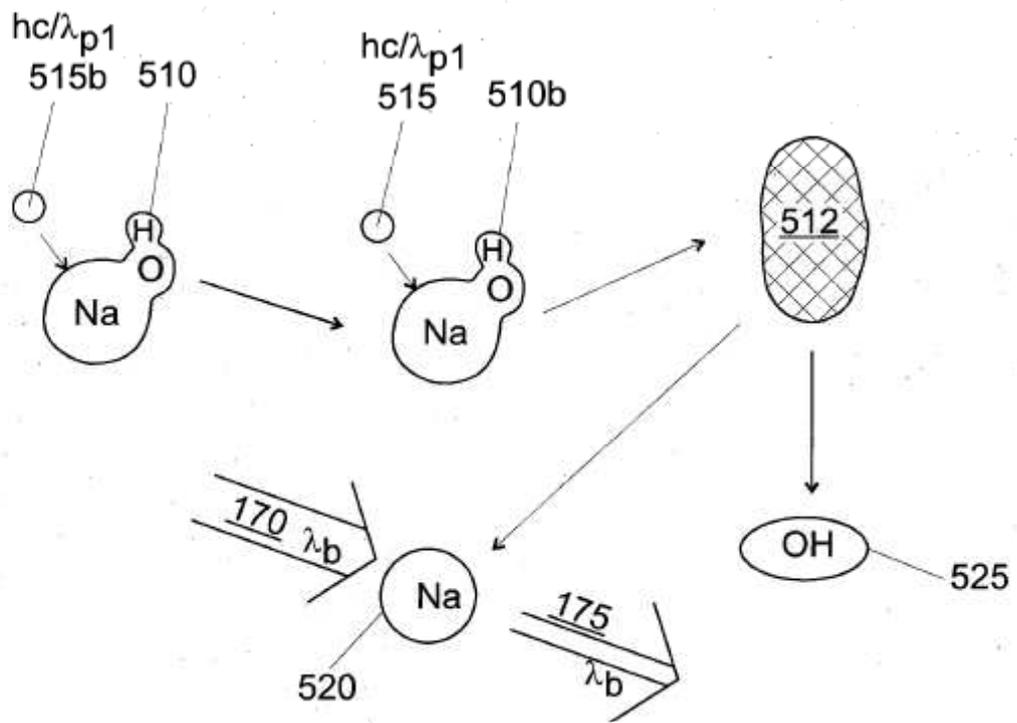
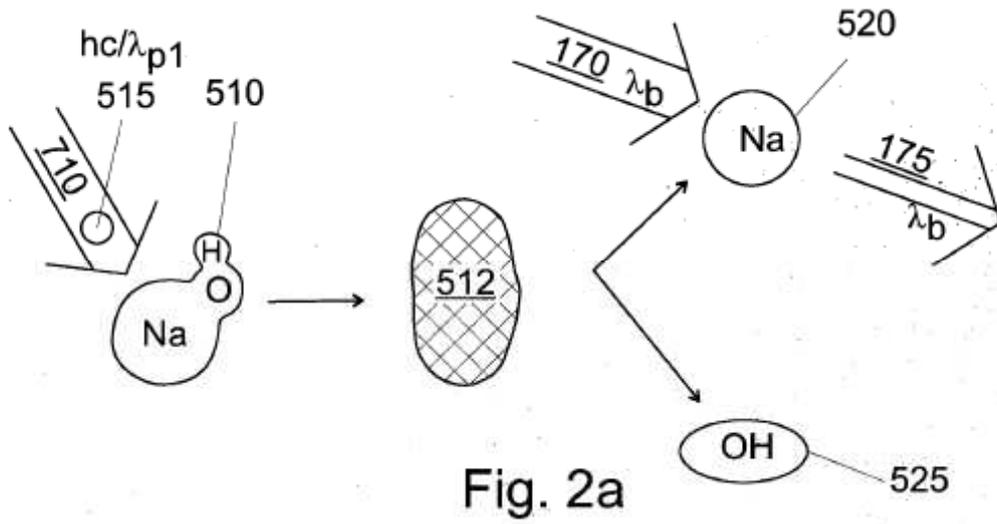


Fig. 1d



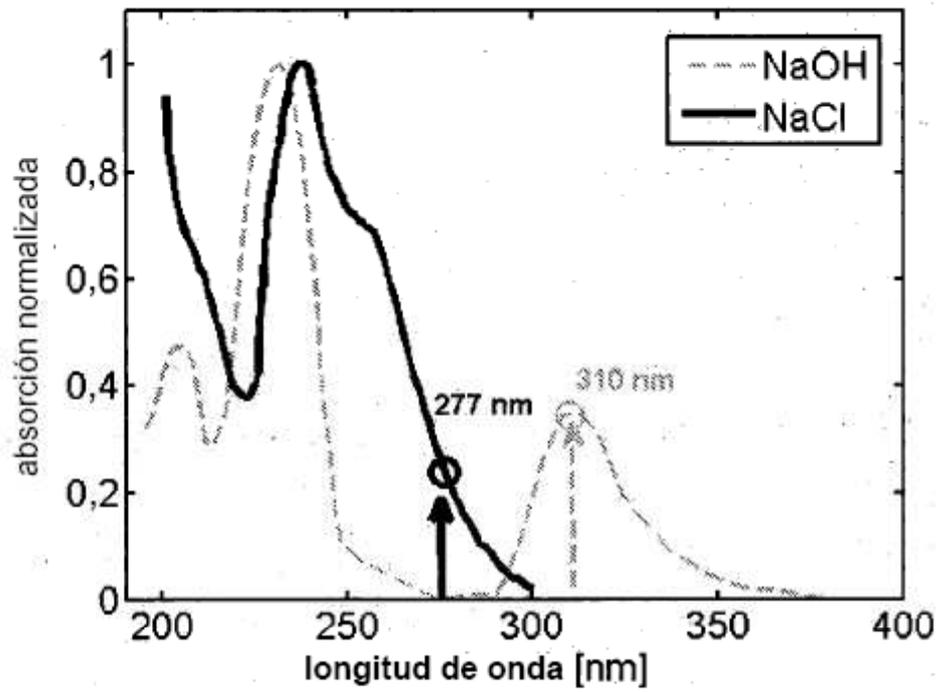


Fig. 3a

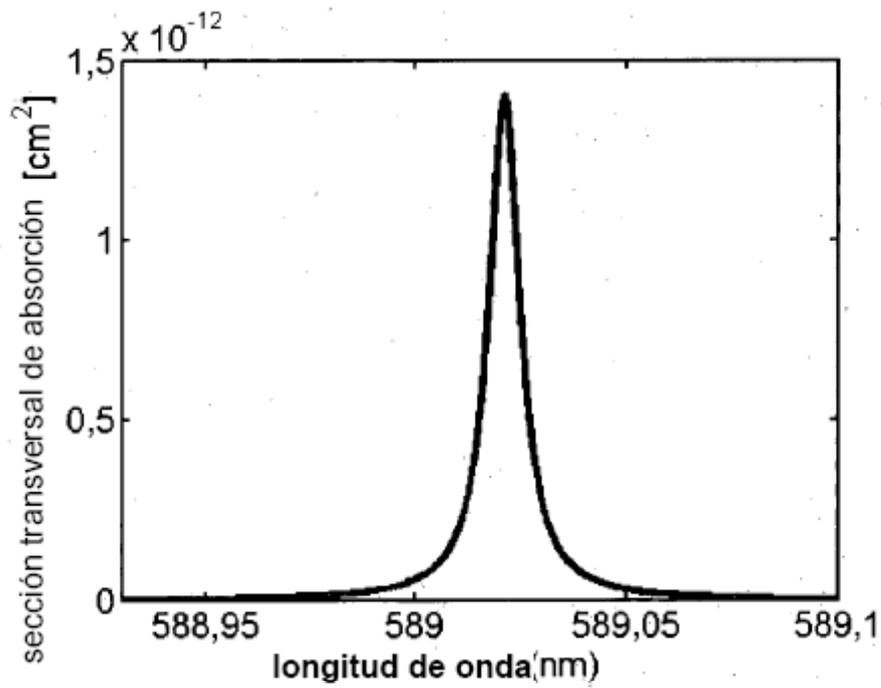


Fig. 3b

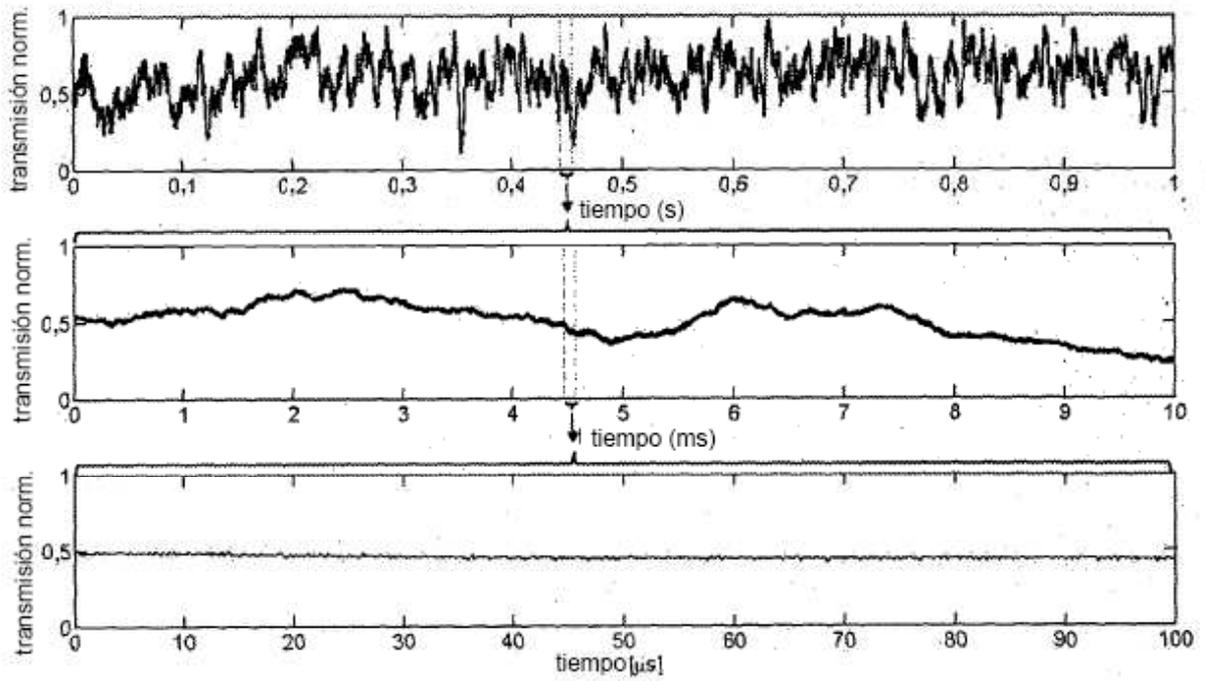


Fig. 4a

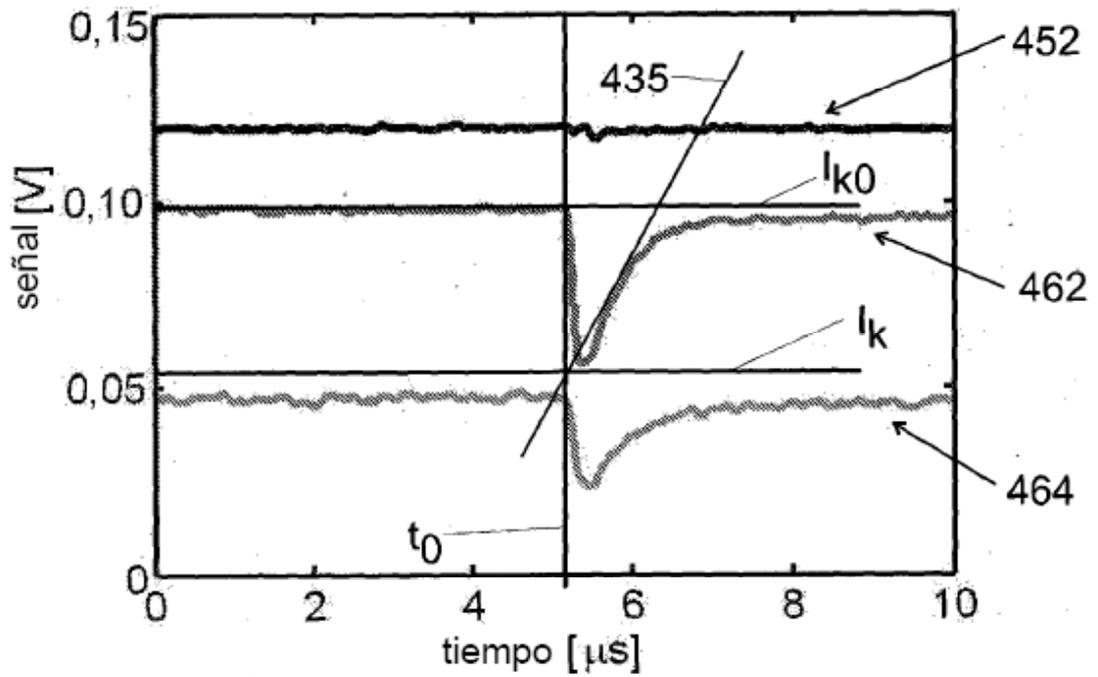


Fig. 4b

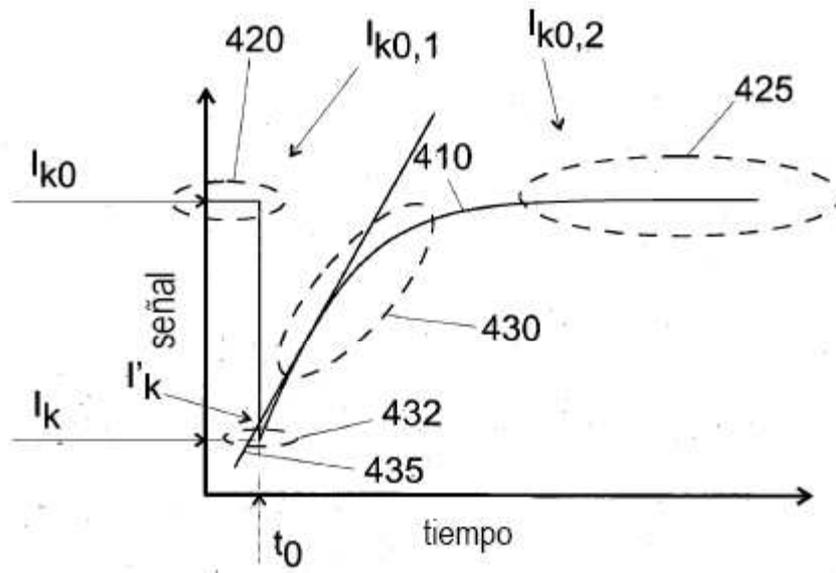


Fig. 4c

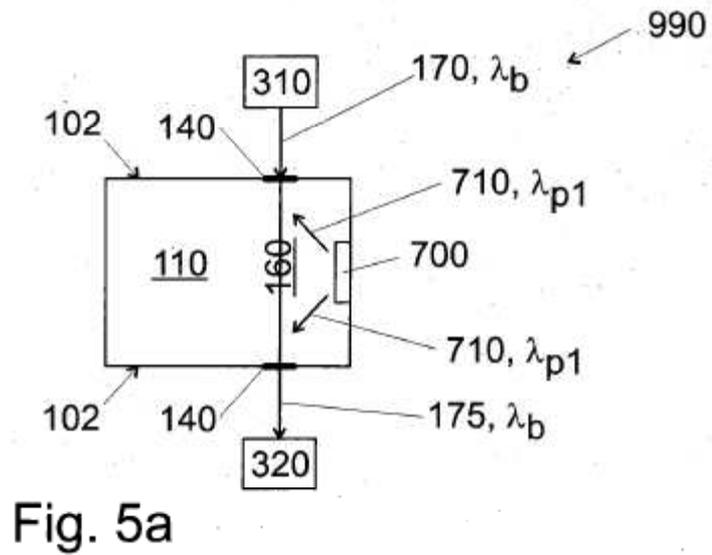


Fig. 5a

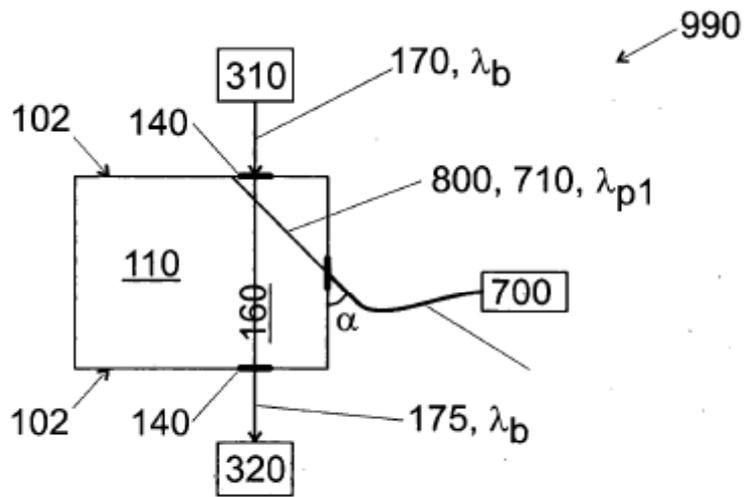


Fig. 5b

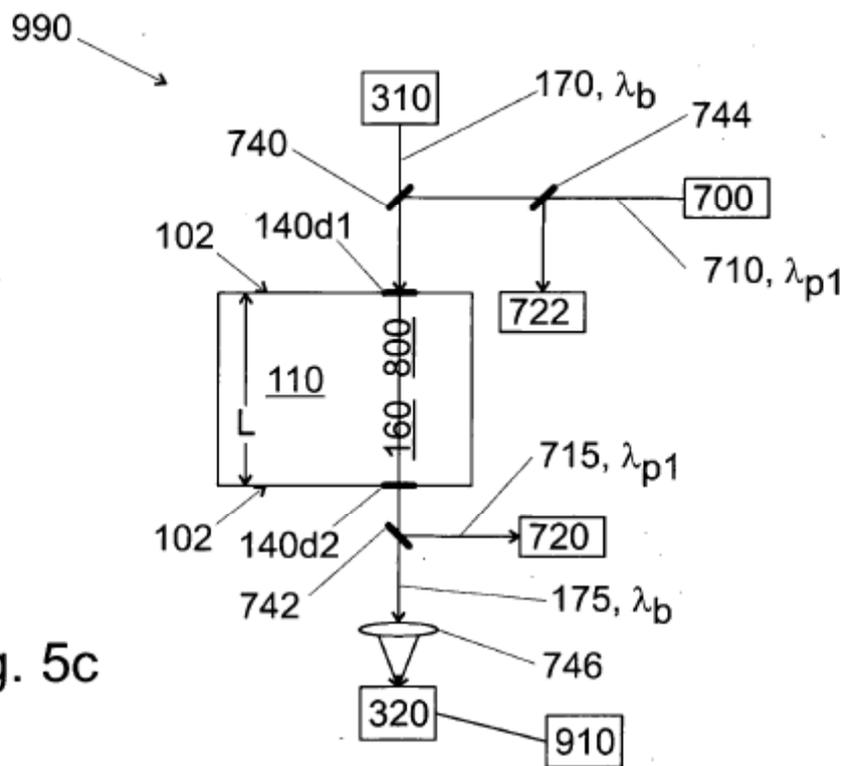
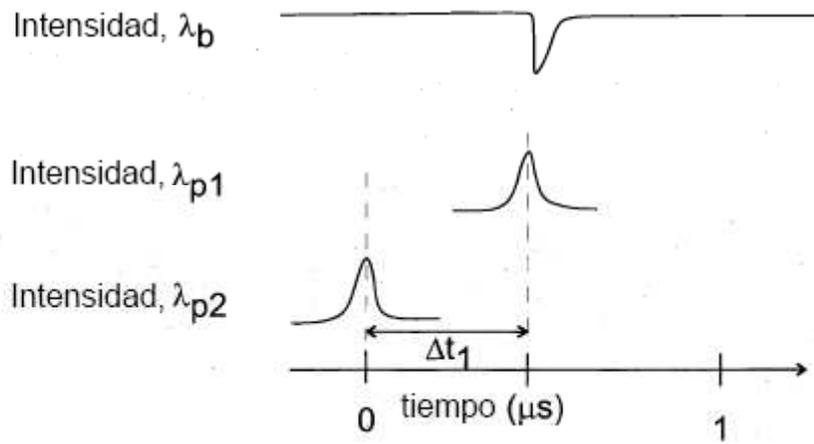
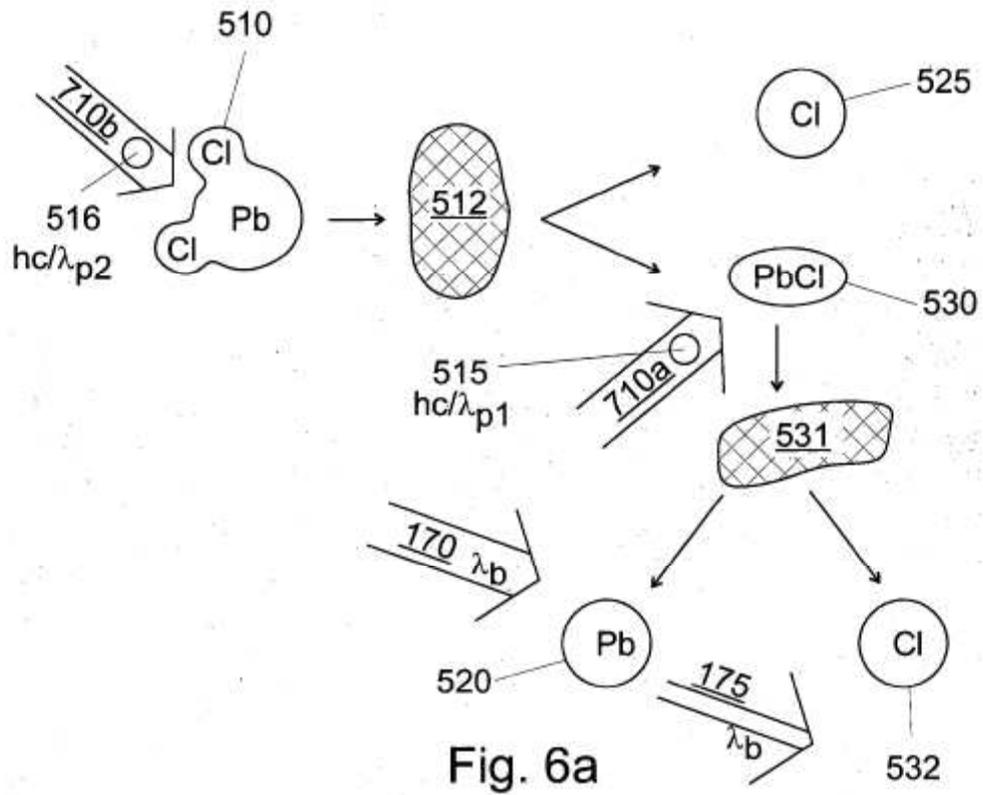
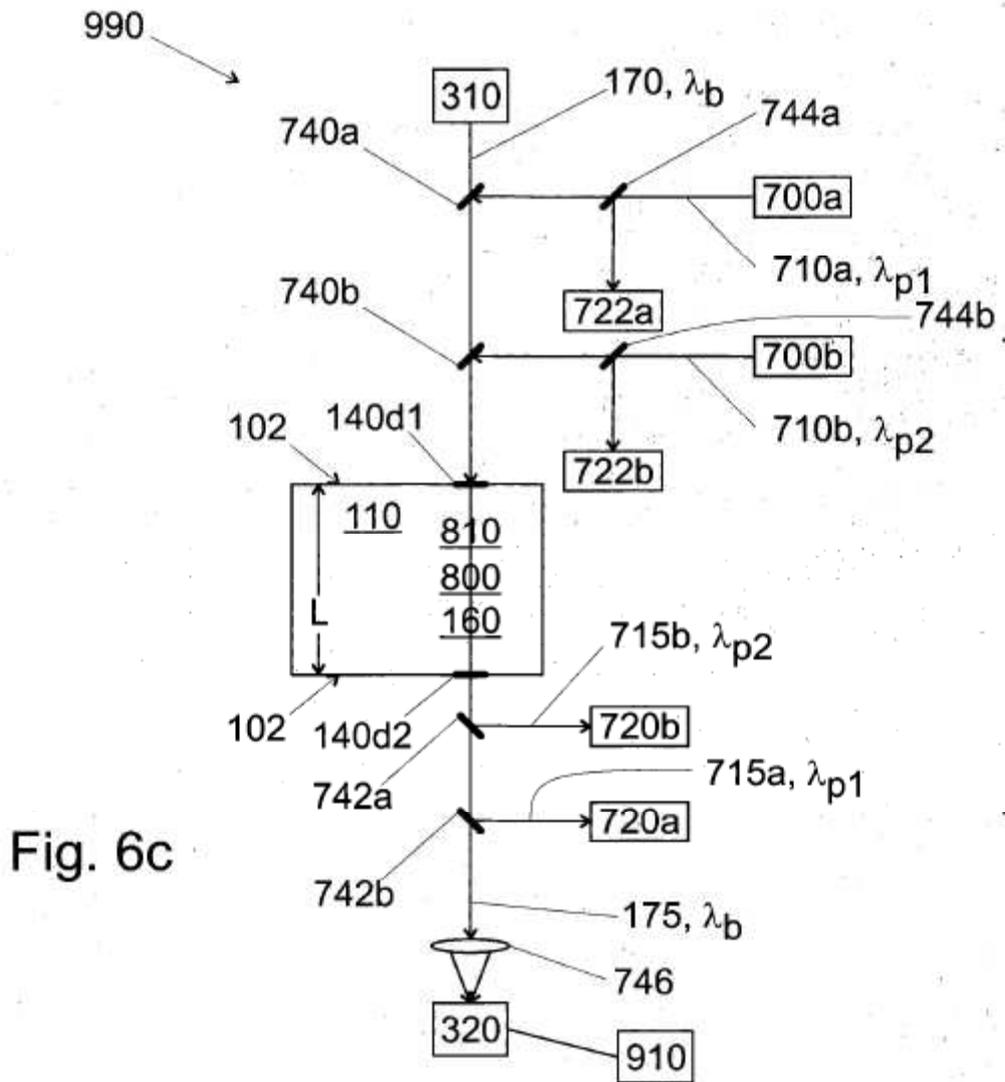


Fig. 5c



**Fig. 6b**



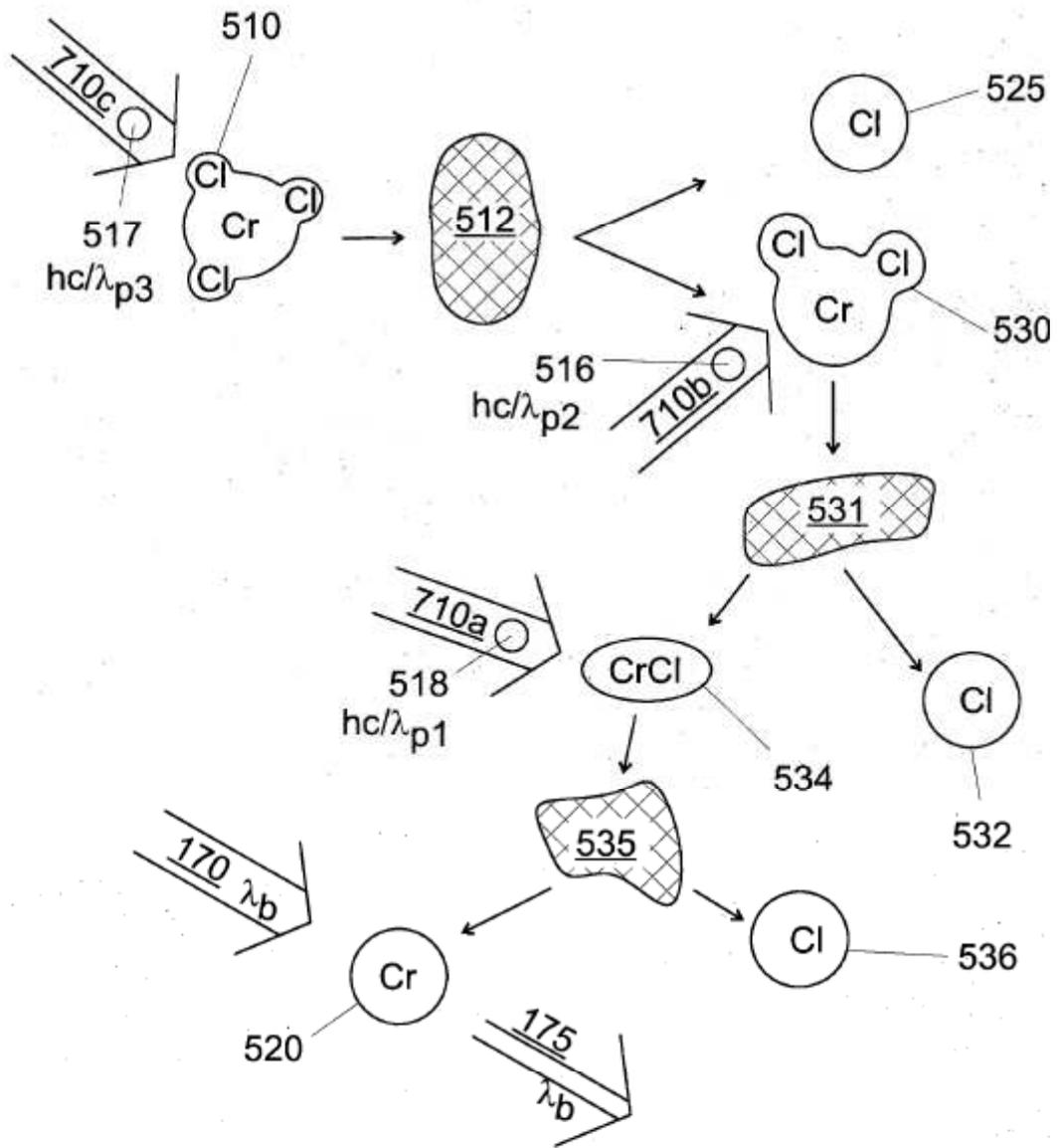


Fig. 7a

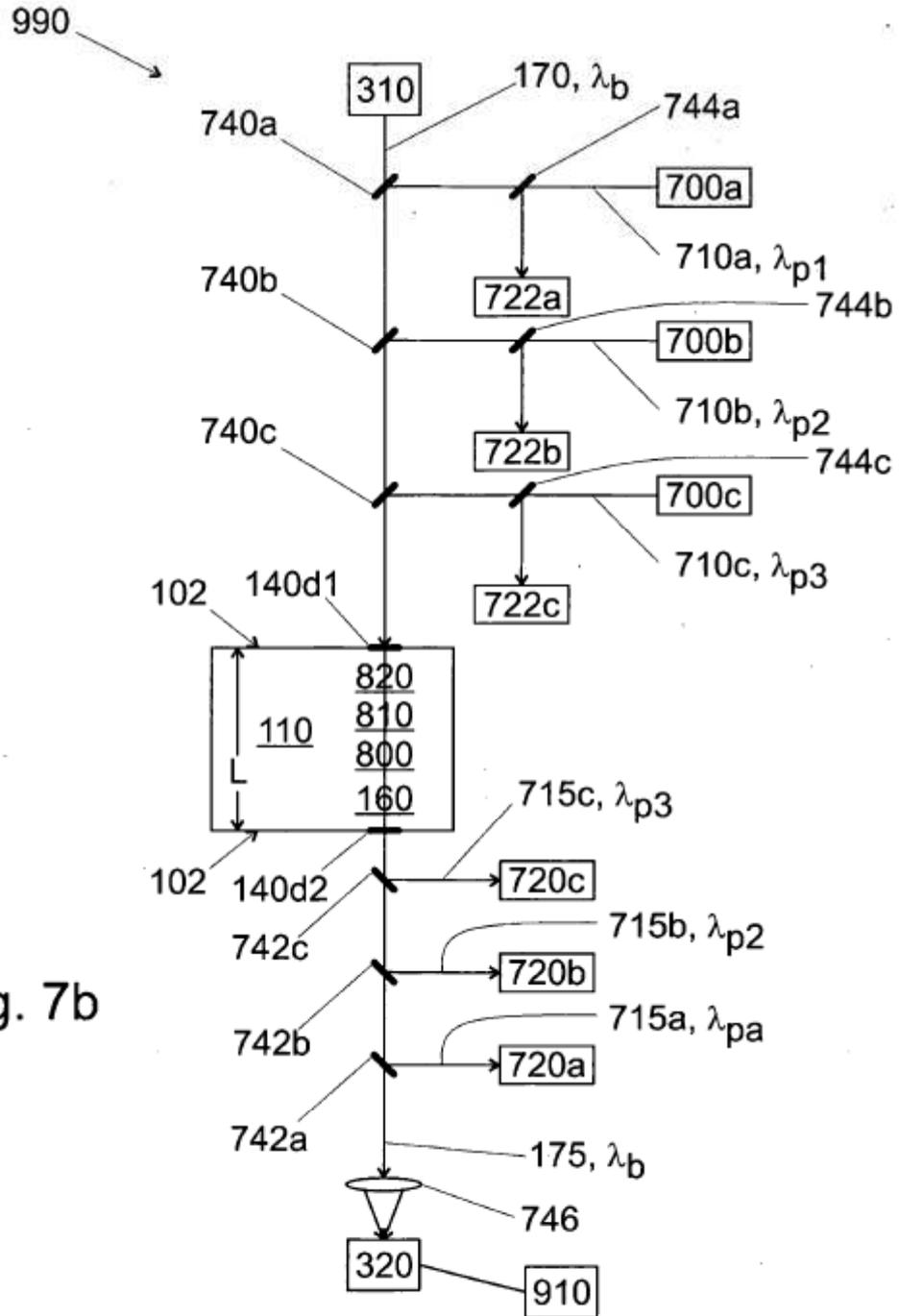


Fig. 7b

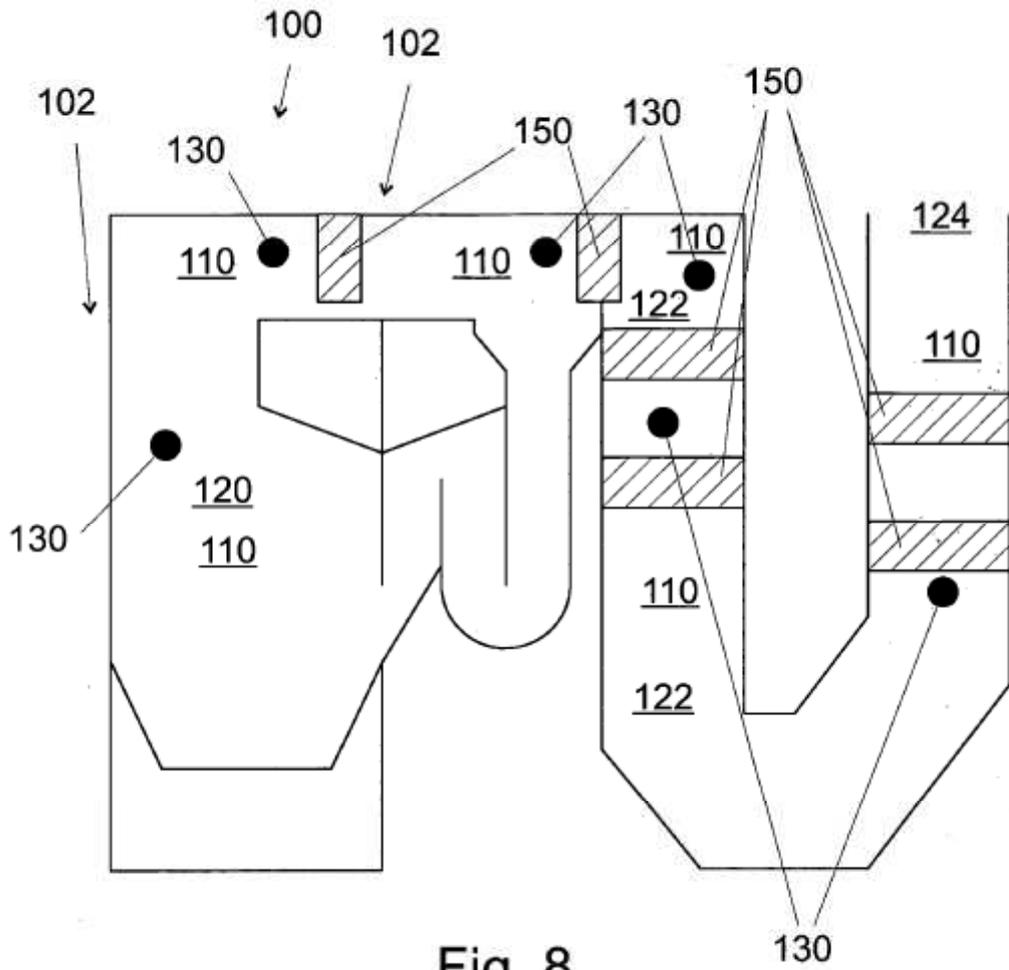


Fig. 8