

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 656 155**

51 Int. Cl.:

**G01N 21/31** (2006.01)

**G01J 3/42** (2006.01)

**G01J 3/427** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **10.09.2013 PCT/FI2013/050870**

87 Fecha y número de publicación internacional: **20.03.2014 WO14041240**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **10.09.2013 E 13837545 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.11.2017 EP 2895842**

54 Título: **Medida de compuestos gaseosos usando espectroscopía**

30 Prioridad:

**13.09.2012 FI 20125947**

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

**23.02.2018**

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**SORVAJÄRVI, TAPIO y  
TOIVONEN, JUHA**

74 Agente/Representante:

**ELZABURU, S.L.P**

ES 2 656 155 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

Medida de compuestos gaseosos usando espectroscopía

**Campo de la invención**

5 La invención se refiere a un método para medir el contenido de un compuesto gaseoso en una mezcla de gases usando espectroscopía óptica. La invención se refiere a un método, en el que la mezcla de gases y el compuesto gaseoso son resultado de un proceso térmico. El proceso térmico puede ser, p. ej., uno de combustión, pirólisis, torrefacción y gasificación. La invención se refiere además a un método para medir el perfil del contenido del compuesto gaseoso en una mezcla de gases usando espectroscopía óptica. La invención se refiere además a un dispositivo dispuesto para medir el perfil del contenido del compuesto gaseoso en la mezcla de gases usando espectroscopía óptica.

**Antecedentes de la invención**

15 Los aspectos ambientales y el precio en aumento de los combustibles fósiles han aumentado el interés en los combustibles renovables en la producción de energía. Una alternativa, como combustible renovable en gran medida neutro en CO<sub>2</sub>, es la biomasa. La biomasa puede ser, p. ej., cosechada como residuos de la industria forestal. Además, la biomasa puede comprender al menos uno de residuos agrícolas, turba, tocones, ramas y madera de desecho, tales como corteza, desechos de construcción de madera y residuos de productos de madera. La biomasa puede usarse en un proceso térmico. P. ej., la biomasa puede quemarse para producir energía. Alternativamente, la biomasa puede gasificarse para producir gases de síntesis, que pueden procesarse adicionalmente para producir biocombustibles. Aún más, la biomasa puede tratarse en un proceso de pirólisis para producir gas de pirólisis, que puede condensarse en aceite de pirólisis. Aún más, la biomasa puede tratarse en un proceso de torrefacción para producir biocoque, que puede utilizarse en otros lugares en los procesos de combustión y/o gasificación. Estos procesos térmicos producen una mezcla de diversos gases, p. ej., gases de combustión, 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 varias razones. P. ej., los gases de combustión, como resultado de la combustión de biomasa, causan problemas de corrosión y escorificación en las calderas de combustión. Las causas conocidas de los problemas incluyen vapores de haluros alcalinos y vapores de hidróxidos alcalinos, que se forman durante la combustión. Con el fin de cuantificar el problema de corrosión es necesario medir el contenido de haluros y/o hidróxidos de los gases de combustión. Además de estos compuestos, los cloruros metálicos tales como PbCl<sub>2</sub>, los carbonatos metálicos tales como K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> y los sulfatos metálicos tales como K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pueden causar problemas similares.

35 En general, la espectroscopia óptica puede utilizarse para medir el contenido de gases nocivos de los gases. Los métodos incluyen la espectroscopía de absorción, en la que se mide la atenuación de la luz. Como los diferentes compuestos gaseosos absorben la luz de manera diferente, el espectro de atenuación puede usarse para deducir el contenido de diferentes compuestos gaseosos. La sensibilidad del método es relativamente baja, estando en el intervalo 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 las fluctuaciones en los gases de combustión.

40 Los métodos ópticos incluyen también los basados en la fluorescencia inducida por láser de excímeros. En estos métodos, las moléculas de cloruros alcalinos se disocian y el átomo alcalino liberado es excitado usando un láser de excímeros. A medida que el átomo alcalino se relaja desde el estado excitado, se emite un fotón. La longitud de onda del fotón corresponde a la especie alcalina y el contenido de álcali se mide a partir del espectro de emisión. En principio, la sensibilidad del método está en el intervalo de ppb (partes por billón, 10<sup>-9</sup>). Sin embargo, en un entorno de combustión, la dispersión de la luz, p. ej., de partículas de hollín, diluye la sensibilidad de los métodos.

45 El documento US 6.384.903 describe medidas de absorción de dos fotones realizadas en diversos puntos alejados del aparato de monitorización. Los láseres están sintonizados de tal manera que la suma de las energías de los fotones en haces láser es igual a la asociada con una única transición predeterminada.

Y. He et al. midieron las transiciones hiperfinas de átomos de yodo durante y después de la excitación y disociación multifotónica de CF<sub>3</sub>I inducida por radiación infrarroja, como se publicó en Chem. Phys. Lett. (vol. 215, nº 1, 2, 3, página 228).

**Sumario de la invención**

50 Un método para medir el perfil espacial del contenido de un compuesto gaseoso en una mezcla de gases se presenta y define en la reivindicación 1. El método es especialmente útil en casos en los que la mezcla de gases es un producto gaseoso de un proceso térmico. Mediante el método, se puede lograr una sensibilidad en el intervalo de ppb (10<sup>-9</sup>).

55 Además, se presenta un método para medir el contenido de un compuesto gaseoso en una mezcla de gases, y el contenido de oxígeno de la mezcla de gases. El método es especialmente útil en casos en los que la mezcla de

gases es un producto gaseoso de un proceso térmico.

Una realización del método para medir el perfil del contenido de un compuesto gaseoso en una mezcla de gases comprende:

- 5 - Generar un haz de luz (170), en el que el haz de luz (170) comprende fotones que tienen una longitud de onda del haz ( $\lambda_b$ ), y
- Guiar al menos parte del haz de luz (170) a un primer camino óptico (160) de manera que al menos parte de los fotones del haz de luz (170) recorra el primer camino óptico (160) en una primera dirección, donde
- El primer camino óptico (160) pasa a través de un espacio (110) que contiene la mezcla de gases que comprende el compuesto gaseoso, con lo que el haz de luz (170) se atenúa a un haz de luz atenuado (175).

10 La realización además comprende:

- Generar al menos un último pulso de luz (710, 710a), en el que el último pulso de luz (710, 710a) comprende fotones (515, 515b) que tienen una primera longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p1}$ ),
- Transformar (es decir, disociar, ionizar), utilizando el último pulso de luz (710, 710a) o una secuencia de pulsos de luz (710, 710a, 710b, 710c), al menos parte de los átomos, moléculas, iones o radicales del compuesto gaseoso (510), a al menos una primera parte (520), donde la secuencia de pulsos de luz (710, 710a, 710b, 710c) comprende al menos el último pulso de luz (710, 710a),
- Seleccionar la longitud de onda del haz ( $\lambda_b$ ) tal que la longitud de onda del haz ( $\lambda_b$ ) corresponda a un perfil de absorción de la primera parte (520),
- Guiar al menos parte del último pulso de luz (710, 710a) o al menos parte de un pulso de luz (710, 710a, 710b, 710c) de la secuencia de pulsos de luz a el primer camino óptico (160), de manera que los fotones (515, 515b) de la parte guiada del pulso de luz viajen en una segunda dirección, donde
- La segunda dirección es inversa a la primera dirección,
- Detectar un primer perfil ( $I_k(t)$ ) indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado (175) en función del tiempo, y
- 25 - Determinar, utilizando el primer perfil ( $I_k(t)$ ) indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado (175) en función del tiempo, el perfil ( $\xi_G(x)$ ) del contenido del compuesto gaseoso en el primer camino óptico (160).

Otras características del método se resumen en los ejemplos adjuntos 2 a 27.

Una realización del método para medir el contenido de oxígeno de la mezcla de gases comprende las características del ejemplo 28. Otras características del método se resumen en los ejemplos adjuntos 29 a 32.

30 Además, se ha presentado un dispositivo para medir el perfil del contenido de un compuesto gaseoso en una mezcla de gases. El dispositivo comprende:

- Una fuente de haz de luz (310), dispuesta para generar un haz de luz (170) que comprende fotones que tienen una longitud de onda de haz ( $\lambda_b$ ) y
- Un fotodetector (320), en el que
- 35 - Un primer camino óptico (160) está dispuesta ópticamente entre el fotodetector (320) y la fuente del haz de luz (310),
- Un espacio (110), a través del cual el primer camino óptico (160) está dispuesta para funcionar, está dispuesto para contener la mezcla de gases que absorbe el haz de luz (170),
- El haz de luz (170) está dispuesto para ser atenuado a un haz de luz atenuado (175) mediante dicha absorción del haz de luz (170), y el dispositivo comprende
- 40 - Medios para guiar al menos parte del haz de luz (170) a el primer camino óptico (160) de manera que al menos parte de los fotones del haz de luz (170) viajen en una primera dirección.

El dispositivo además comprende:

- Al menos una primera fuente de pulsos de luz (700, 700a), en la que
- 45 - La primera fuente de pulsos 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

- 5 fotonos (515) transformando al menos parte de (i) átomos, moléculas, iones o radicales del compuesto gaseoso (510), (ii) átomos, moléculas, iones, o radicales del compuesto gaseoso (510b) preexcitado, (iii) partes transformadas (530, 534), o (iv) partes transformadas preexcitadas (530, 534) en el primer camino óptico (160) en al menos átomos, moléculas, iones, o radicales de la primera parte (520), por lo que el haz de luz (170) se atenúa aún más al haz de luz atenuado (175) por absorción a los átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte (520) en el primer camino óptico (160), donde las partes transformadas (530, 534) han sido opcionalmente producidas a partir de los átomos, moléculas, iones o radicales del compuesto gaseoso (510) por transformación (es decir, disociación, ionización) usando al menos otro pulso de luz, donde
- 10 - La fuente del haz de luz (310) está dispuesta para emitir un haz de luz (170) que comprende fotonos que tienen una longitud de onda del haz ( $\lambda_b$ ) que corresponde a un perfil de absorción de la primera parte (520), y el dispositivo además comprende
- 15 - Medios para guiar al menos parte del último pulso de luz (710, 710a) o al menos parte de otro pulso de luz (710b, 710c) al primer camino óptico (160), tal que los fotonos (515, 515b) de la parte guiada del último pulso de luz (710, 710a) o los fotonos (516, 517) de la parte guiada del otro pulso de luz (710b, 710c) viajan en una segunda dirección, donde
- La segunda dirección es inversa a la primera dirección, y
- El fotodetector (320) está dispuesto para detectar un primer perfil ( $I_k(t)$ ) indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado (175) en función del tiempo, y
- 20 - El dispositivo (990) comprende una unidad de procesamiento de datos (910) dispuesta para determinar, usando el primer perfil ( $I_k(t)$ ) indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado (175) en función del tiempo, el perfil del contenido del compuesto gaseoso en la mezcla de gases en el primer camino óptico (160).

Otras características del dispositivo se presentan en los ejemplos anexos 34 a 52. El dispositivo puede integrarse en un dispositivo térmico, como se describe en los ejemplos adjuntos 53 a 57.

- 25 Una realización de un dispositivo para medir el contenido de oxígeno de una mezcla de gases comprende la característica del ejemplo 58. Otras características del dispositivo se resumen en los ejemplos adjuntos 59 y 60.

### Descripción de los dibujos

- La Fig. 1a muestra un haz de luz que viaja a lo largo de un camino óptico, un átomo, molécula, ion o radical de la primera parte, a la que se atenúa el haz de luz, y un haz de luz atenuado.
- 30 La Fig. 1b muestra, además de los artículos de la Fig. 1a, un átomo molécula, ion o radical del compuesto gaseoso, que se disocia, además de en la primera parte, en una segunda parte,
- La Fig. 1c muestra un haz de luz que se desplaza a lo largo de un camino óptico, mediante lo cual el haz de luz puede atenuarse y un haz de luz atenuado.
- La Fig. 2a muestra la disociación de una molécula de cloruro de potasio en un átomo de potasio y un átomo de cloro utilizando un fotón de un pulso óptico,
- 35 La Fig. 2b muestra la disociación de una molécula gaseosa en una primera parte y una segunda parte utilizando dos fotonos de dos pulsos ópticos.
- La Fig. 2c muestra la ionización de un átomo a una primera parte (ion) y una segunda parte (electrón) usando un fotón de un pulso óptico,
- 40 La Fig. 2d muestra la excitación de un átomo en un átomo excitado (primera parte) usando un fotón de un pulso óptico,
- La Fig. 3a muestra la sección transversal de absorción del cloruro de potasio en función de la longitud de onda,
- La Fig. 3b muestra la sección transversal de absorción del átomo de potasio en función de la longitud de onda,
- La Fig. 4 muestra una señal de medición que se puede obtener en un dispositivo de cualquiera de las figs. 7a - 7b 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,
- 45 La Fig. 5a muestra el perfil del contenido de gas y algunos componentes de un dispositivo para medir el perfil del contenido de gas en una mezcla de gases.
- La Fig. 5b muestra un primer perfil  $I_k(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en función del tiempo, medido a partir de la configuración de la Fig. 5a,

La Fig. 5c muestra la derivada en el tiempo del primer perfil de la Fig. 5b, donde la derivada en el tiempo muestra evidencia del perfil del contenido de gas de la Fig. 5a,

La Fig. 6 muestra un primer perfil  $I_k(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en función del tiempo,

5 La Fig. 7a muestra un dispositivo para medir el perfil del contenido de gas y el contenido de un compuesto gaseoso en una mezcla de gases,

La Fig. 7b muestra un dispositivo para medir el contenido de un compuesto gaseoso y el contenido de oxígeno en una mezcla de gases,

La Fig. 7c muestra un dispositivo para medir el contenido de un compuesto gaseoso y el perfil del contenido de gas en una mezcla de gases,

10 La Fig. 7d muestra un dispositivo para medir el contenido de un compuesto gaseoso y el perfil del contenido de gas en una mezcla de gases,

La Fig. 7e muestra un dispositivo para medir el contenido de un compuesto gaseoso y el perfil del contenido de gas en una mezcla de gases,

15 La Fig. 8a muestra la disociación de una molécula de cloruro de plomo en un átomo de plomo y en dos átomos de cloro utilizando dos pulsos ópticos,

La Fig. 8b 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 Fig. 9a muestra un dispositivo para medir el contenido de un compuesto gaseoso y el perfil del contenido de gas en una mezcla de gases, donde el dispositivo es capaz de emitir dos pulsos ópticos disociativos,

20 La Fig. 9b muestra un dispositivo para medir el contenido de un compuesto gaseoso y el perfil del contenido de gas en una mezcla de gases, donde el dispositivo es capaz de emitir dos pulsos ópticos disociativos,

La Fig. 9c muestra un dispositivo para medir el contenido de un compuesto gaseoso y el perfil del contenido de gas en una mezcla de gases, donde el dispositivo es capaz de emitir dos pulsos ópticos disociativos,

25 La Fig. 9d muestra un dispositivo para medir el contenido de un compuesto gaseoso y el perfil del contenido de gas en una mezcla de gases, en donde el dispositivo es capaz de emitir dos pulsos ópticos disociativos.

La Fig. 9e muestra un dispositivo para medir el contenido de un compuesto gaseoso y el perfil del contenido de gas en una mezcla de gases, en donde el dispositivo es capaz de emitir dos pulsos ópticos disociativos.

La Fig. 10 muestra la disociación de una molécula de cloruro de cromo (tri) en un átomo de cromo y en tres átomos de cloro utilizando tres pulsos ópticos.

30 La Fig. 11a muestra un dispositivo para medir el perfil del contenido de un compuesto gaseoso, dispuesto parcialmente en una caldera.

La Fig. 11b muestra un dispositivo para medir el contenido de oxígeno, dispuesto parcialmente en una caldera,

La Fig. 12 muestra una caldera y posibles ubicaciones para medidas ópticas dentro de la caldera, y

35 Las Figs. 13a a 13f muestran algunos caminos ópticos entre una entrada óptica y una salida óptica de un contenedor de mezcla de gases.

### Descripción detallada de la invención

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

45 La mezcla de gases puede ser, p. ej., el resultado de un proceso térmico. El proceso térmico puede ser, p. ej., uno de combustión, pirólisis, torrefacción y gasificación. En particular, la temperatura de la mezcla de gases puede ser relativamente alta, p. ej., de 300°C a 1300°C. Sin embargo, el método es aplicable también a temperatura ambiente, y por debajo. P. ej., la mezcla de gases puede tener una temperatura superior a -50°C. El al menos un compuesto gaseoso de la mezcla de gases está en su estado gaseoso a la temperatura y la presión. Otros compuestos pueden estar en estado líquido o sólido, como se trató anteriormente. El contenido del compuesto gaseoso de la mezcla de gases se puede medir con el método que se describirá, p. ej., usando un dispositivo que se describirá. Además, el

perfil del contenido del compuesto gaseoso se puede medir con el método que se divulgará, p. ej., usando un dispositivo que será revelado. Además, el contenido de oxígeno del compuesto gaseoso se puede medir con el método que se divulgará, p. ej., usando un dispositivo que se describirá.

5 La medición se basa en la espectroscopía de absorción. Con referencia a la Fig. 1a, en el método se genera un haz de luz 170, el haz de luz 170 es guiado a través de la mezcla de gases a medir, a lo largo de un camino óptico 60, mediante lo cual una parte de la luz es absorbida y dispersada por la mezcla de gases, mediante lo cual el haz de luz 170 es atenuado a un haz de luz atenuado 175. El primer camino óptico está situado en un espacio 110. La expresión "camino óptico" se refiere al camino del haz de luz en el espacio 110. En caso de que el haz 170 sea guiado al exterior del espacio desde el espacio, el camino óptico 160 se refiere a la parte del espacio por la que viaja el haz de luz. Es evidente que el espacio 110 contiene la mezcla de gases y el compuesto gaseoso.

10 Se mide la intensidad del haz de luz atenuado 175. En particular, el haz de luz 170 puede atenuarse por absorción de algún átomo, molécula, ion o radical 520. El átomo, molécula, ion o radical 520 se denomina una "primera parte". La expresión "perfil del contenido del compuesto gaseoso" se refiere al contenido del compuesto gaseoso en función de la ubicación en el camino óptico 160. El perfil del contenido del compuesto gaseoso se mide en un sentido discreto, y la resolución espacial se tratará a continuación.

20 Con referencia a la Fig. 1b, en el método, la primera parte 520 es un resultado de la disociación, ionización o excitación de una molécula 510 del compuesto gaseoso, en la que el átomo, molécula, ion o radical del compuesto gaseoso 510 está compuesto por el compuesto gaseoso del cual se mide el contenido. Como se trató anteriormente, el compuesto gaseoso está compuesto por la mezcla de gases. Además de la primera parte 520, la molécula de compuesto gaseoso 510 puede disociarse en una segunda parte 525. Además de la primera parte 520, la molécula de compuesto gaseoso 510 se puede ionizar en una segunda parte 525. Si el compuesto gaseoso es 510 es excitado, solo se obtiene la primera parte en el proceso. La disociación, ionización o excitación se puede hacer usando un pulso óptico 710. El proceso de disociación, ionización o excitación se denominará transformación. Como quedará claro, la disociación, la ionización o la excitación pueden hacerse en una sola etapa o en múltiples etapas disociando posteriormente los productos de disociación. Por otra parte, la disociación puede hacerse directamente desde un estado fundamental o excitando previamente la molécula de gas a un estado excitado antes de la disociación. La primera parte 520 puede ser producida por uno de:

- Disociar el compuesto gaseoso 510 o el compuesto gaseoso preexcitado 510b en la primera parte 520 y la segunda parte 525 (Figs. 2a y 2b),
- 30 - Ionizar el compuesto gaseoso 510 o el compuesto gaseoso preexcitado 510b en la primera parte 520 liberando de este modo al menos un electrón (Fig. 2c),
- Excitar el compuesto gaseoso 510 o el compuesto gaseoso preexcitado 510b en la primera parte 520 (Fig. 2d).

35 Con referencia a la Fig. 1c se observa que el haz de luz 170 es atenuado en un haz de luz atenuado 175 incluso si un primer átomo, molécula, ion o radical 520 de la primera parte no está presente en el camino óptico 160. El haz de luz puede atenuarse, p. ej., dispersándose por impurezas o por absorción en otros átomos, moléculas, iones o radicales.

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

- 40 - Generar un haz de luz 170, en el que el haz de luz 170 comprende fotones que tienen una longitud de onda del haz  $\lambda_b$ ,
- Guiar el haz de luz 170, o una parte del haz de luz 170, a un primer camino óptico 160, donde el primer camino óptico 160 discurre a través de un espacio 110 que contiene la mezcla de gases, mediante lo cual el haz de luz 170 es atenuado en un haz de luz atenuado 175, y
- Determinar un primer valor indicativo de una primera intensidad  $I_{k0}$  del haz luminoso atenuado 175.

45 El primer valor indicativo de una primera intensidad  $I_{k0}$  del haz de luz atenuado 175 puede determinarse a partir de un primer perfil de perfil  $I_k(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en función del tiempo.

50 El haz de luz puede comprender fotones que tienen múltiples longitudes de onda. Preferiblemente, el haz de luz es monocromático. Como quedará claro, en una realización el haz de luz consiste en fotones que tienen una primera longitud de onda y fotones que tienen una segunda longitud de onda. Una fuente de haz de luz dispuesta para generar el haz de luz puede comprender al menos un láser.

#### **Principio de medida, disociación, ionización o excitación en una única etapa**

Para superar los problemas indicados en los antecedentes, la sensibilidad de las medidas se aumenta de dos maneras:

(1) Aumentando la absorción de la mezcla de gases correspondiente a la o las longitudes de onda del haz de luz 170, y

(2) Acortando el tiempo de medida con el fin de obtener condiciones de medida temporalmente estacionarias.

La absorción a una longitud de onda específica puede ser aumentar por una de estas tres formas:

5 (i) Disociando las moléculas 510 del compuesto gaseoso en el primer camino óptico 160 en dos partes: la primera parte 520 y la segunda parte 525. La primera parte 520 puede ser un átomo, una molécula, un ion, o un radical. El término radical se refiere a un átomo, una molécula o un ion con electrones desapareados o una configuración de caparazón abierto. Estos electrones desapareados pueden provocar que los radicales sean altamente reactivos químicamente. La segunda parte 525 puede ser un átomo, una molécula, un ion o un radical. Al menos una de la  
10 primera parte 520 y la segunda parte 525 pueden estar en un estado excitado o en un estado relajado.

(ii) Ionizando el átomo molécula, ion o radical del compuesto gaseoso 510, en una primera parte 520, y en una segunda parte, donde la segunda parte comprende al menos un electrón. La primera parte 520 puede ser un átomo, una molécula, un ion, o un radical.

15 (iii) Excitando el átomo molécula, ion o radical del compuesto gaseoso 510 en una primera parte 520. Después de esta excitación, la longitud de onda de absorción y/o la sección transversal de absorción de la primera parte es diferente del átomo, molécula, ion o radical del compuesto gaseoso 510.

El proceso de disociación se muestra esquemáticamente en la Fig. 2a para cloruro de potasio. En la realización, la molécula gaseosa 510 se disocia en dos partes usando un pulso de luz 710. En la Fig. 2a, la molécula de cloruro de potasio 510 se excita primero a una molécula 512 en un estado disociativo usando un pulso de luz 710. El pulso de  
20 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 es generalmente relativamente alta, es decir, la longitud de onda  $\lambda_{p1}$  es corta. Se necesita mucha energía para excitar la molécula gaseosa 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  $\lambda_{p1}$ .

25 Con referencia a la Fig. 2b, la molécula puede disociarse alternativamente en al menos dos partes usando una excitación de dos fotones o de múltiples fotones. En la Fig. 2b, la molécula gaseosa 510 se disocia en dos partes usando un pulso de luz 710 de modo que la molécula de gas 510 se excita al estado disociativo con al menos dos fotones del pulso o con al menos dos fotones de al menos dos pulsos. En la Fig. 2b, la molécula gaseosa 510 comprende la primera parte Q1 y la segunda parte Q2. La molécula gaseosa 510 es preexcitada en primer lugar a  
30 un estado preexcitado 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. A continuación, la molécula gaseosa preexcitada 510b se excita adicionalmente al estado disociativo 512 con otro fotón 515 del pulso óptico 710. El estado disociativo 512 se disocia en la primera parte 520 (Q1) y la segunda parte 525 (Q2). Esta preexcitación puede denominarse "excitación de dos fotones". En aras de la claridad, el pulso que comprende los fotones 515 que excitan a la molécula gaseosa preexcitada 510b al  
35 estado disociativo 512 puede denominarse como el último pulso de luz. Por otra parte, cuando la molécula 512 en el estado excitado, disociativo, se disocia, el pulso de luz puede denominarse pulso de luz disociativo.

Incluso si no se muestra en las figuras 2a y 2b, una molécula 510 de un compuesto gaseoso que comprende tres átomos se puede excitar con al menos un fotón (515, 515b) a un estado excitado 512 tal que se disocia en tres partes. Por ejemplo, el  $PbBr_2$  puede ser excitado, p. ej., con un fotón, al estado disociativo 512 tal que el estado  
40 disociativo se disocia en Pb, Br y Br. El contenido de  $PbBr_2$  puede determinarse posteriormente midiendo la atenuación del haz de luz 170 en los átomos de plomo. Por lo tanto, la disociación del compuesto gaseoso en una primera parte y una segunda parte no excluye la posibilidad de disociación en la primera parte, la segunda parte y una parte adicional.

Una ventaja del método es que la sección transversal de absorción de la primera parte 520 a una longitud de onda puede ser, p. ej., 105 a 106 veces mayor que la sección transversal de absorción de la molécula de compuesto gaseoso 510. De esta manera, la sensibilidad del método aumenta significativamente. En una realización preferida,  
45 se disocia una molécula de compuesto gaseoso.

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. Con referencia a la Fig. 2a, la primera parte 520 puede referirse a un átomo de potasio. Con referencia a la Fig. 2a, la segunda parte 525 puede referirse al átomo de cloro.  
50

Con referencia a la Fig. 2c, el átomo, molécula, ion o radical del compuesto gaseoso 510 puede estar ionizado. Un ion positivo puede ionizarse más. Un ion negativo puede ser ionizado a un átomo. En la ionización, se elimina al menos un electrón  $e^-$  del átomo molécula, ion o radical Q del compuesto gaseoso 510, mediante lo cual se modifican las propiedades de absorción de la molécula gaseosa 510 o átomo. En esta realización, el átomo, molécula, ion o radical del compuesto gaseoso 510 se divide en al menos dos partes:  
55

- Una primera parte 520, donde la primera parte 520 es el átomo ionizado o la molécula de gas ionizado  $Q^+$ , y

- Una segunda parte 525, donde la segunda parte 525 comprende un electrón.

En general, un compuesto gaseoso 510 puede dividirse en la primera parte 520 y la segunda parte 525. El compuesto gaseoso 510 puede consistir en átomos, moléculas, iones o radicales. Como se trató, el compuesto gaseoso se puede dividir por disociación o ionización.

- 5 Con referencia a la figura 2d, el átomo molécula, ion o radical del compuesto gaseoso 510, no se divide necesariamente. El átomo, molécula, ion o radical del compuesto gaseoso 510 se excita en la primera parte 520, donde la primera parte es el compuesto gaseoso excitado. Esto mejora la selectividad de la espectroscopía de absorción. Por ejemplo, en el caso de que la mezcla gaseosa comprenda un primer compuesto gaseoso y un segundo compuesto gaseoso, donde las longitudes de onda de absorción del primer compuesto gaseoso y el  
10 segundo compuesto gaseoso sean iguales, los contenidos de estos compuestos no pueden medirse individualmente utilizando espectroscopía de absorción a una longitud de onda específica. Sin embargo, en caso de que al menos uno de estos compuestos se excite primero, las propiedades de absorción de los compuestos gaseosos excitados son probablemente muy diferentes. Por lo tanto, se mejora la selectividad del método. Sin embargo, la sección transversal de absorción de un átomo excitado no es necesariamente significativamente mayor que la sección transversal de absorción del compuesto gaseoso. Por lo tanto, la sensibilidad del método no necesariamente mejora significativamente. La ionización (Fig. 2b) puede tener los mismos beneficios que la excitación.

- Por ejemplo, el cobre (Cu), el plomo (Pb) y el antimonio (Sb) tienen, todos, un pico de absorción a la longitud de onda de aproximadamente 217 nm. En caso de que la mezcla de gases comprenda vapores de al menos dos de estos metales, y uno de ellos debe ser detectado, el átomo de cobre (Cu), plomo (Pb) y antimonio (Sb) puede ser  
20 ionizado o excitado. Los átomos ionizados o excitados tienen diferentes longitudes de onda de absorción, por lo que el método puede aplicarse selectivamente a cualquiera de estos metales, siempre que la longitud de onda del haz se seleccione de manera que la longitud de onda del haz corresponda a un pico de absorción del átomo (o ion) de cobre (Cu), plomo (Pb) y antimonio (Sb) ionizados o excitados.

- El espectro de absorción, es decir, la longitud de onda de absorción en particular, de la primera parte 520 inducida por ionización, excitación o disociación puede ser diferente del espectro de absorción en el compuesto gaseoso 510. Por lo tanto, permite la selección de las fuentes de luz, es decir, la fuente del haz de luz y la fuente del pulso de luz, de acuerdo con el espectro de absorción del ion (es decir, la primera parte 520). Por lo tanto, la disponibilidad de las fuentes de luz puede ser significativamente mejor y/o el precio de las fuentes de luz puede ser significativamente menor, donde las fuentes de luz se usan en el dispositivo dispuesto para realizar el método que comprende la transformación (disociación, ionización o excitación) del compuesto gaseoso 510 en al menos la primera parte 520, en comparación con la espectroscopía de absorción aplicada directamente al compuesto gaseoso 510.  
30

- La longitud de onda de pulso (o longitudes de onda del pulso en caso de excitación con dos o múltiples fotones con al menos dos pulsos) se selecciona para disociar, ionizar o excitar la molécula 510 de compuesto gaseoso en al menos la primera parte 520. La Figura 3a muestra la sección transversal de absorción para cloruro de potasio. Con referencia a la Fig. 3a, por ejemplo, en el caso de que se disocie una molécula 510 de cloruro de potasio, se puede usar un pulso de luz que comprende fotones que tienen una longitud de onda más corta que aproximadamente 320 nm. Dentro de este espectro, la sección transversal de absorción es positiva, lo que indica que la molécula puede ser excitada con el fotón. En una realización, se usó un láser de pulsos que tenía la longitud de onda  $\lambda_{p1} = 266$  nm para disociar las moléculas de cloruro de potasio.  
35

- 40 Para otros haluros alcalinos, el pulso de luz puede comprender fotones cuya energía es suficiente para disociar al menos algunas moléculas de haluros alcalinos. Para yoduros alcalinos, un fotón que tiene una longitud de onda de 420 nm o menos puede disociar la molécula de haluro alcalino. Para los bromuros alcalinos, un fotón que tiene una longitud de onda de 370 nm o menos puede disociar la molécula de haluro alcalino. Para los cloruros alcalinos, un fotón que tiene una longitud de onda de 320 nm o menos puede disociar la molécula de haluro alcalino.

- 45 Para el caso de hidróxido de sodio (NaOH), la longitud de onda del pulso  $\lambda_{p1}$  es preferiblemente de 300 nm a 340 nm, p. ej., alrededor de 310 nm. En una realización para disociar las moléculas de hidróxido de sodio se usó un láser de pulsos que tenía una longitud de onda de 315 nm como la fuente de pulsos de luz. En otra realización como la fuente de pulsos de luz se usó un láser de pulsos que tenía una longitud de onda de 330 nm.

- En el método y/o el dispositivo, la o las longitudes de onda del haz de luz se seleccionan de manera que el haz de luz 170 comprenda fotones que tengan la longitud de onda  $\lambda_b$ . Por otra parte, la longitud de onda  $\lambda_b$  se selecciona de manera que corresponda 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 absorción de la primera parte 520 (Figs. 2a a 2d) y para la longitud de onda  $\lambda_b$  es mayor que 1/1000 (una milésima) 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 máxima de absorción. Por otra parte, 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.  
50  
55

Cuando la o las longitudes de onda del pulso de luz y del haz de luz se seleccionan de este modo, después de la disociación, ionización o excitación, el haz de luz 170 es atenuado al haz de luz atenuado 175, entre otras cosas,

debido a la absorción en primera la parte 520, como se representa en las Figs. 1a, 1b, 2a y 2b. Se observa, sin embargo, que las moléculas gaseosas 510 en el primer camino óptico 160 no absorben significativamente el haz de luz 170; significativamente significa en comparación con la absorción de moléculas, átomos, iones o radicales en la primera parte de 520.

- 5 Con referencia a la Fig. 2a, la primera parte puede ser un átomo de potasio. La Fig. 3b muestra el perfil de absorción del potasio atómico en el aire. Más específicamente, la Fig. 3b muestra la sección transversal de absorción para el potasio atómico, liberado de KCl, en aire en función de la longitud de onda a la temperatura de 600°C y la presión de 1 atm. La ubicación, forma y altura del pico dependen de la primera parte que se va a medir; la figura 3b sirve aquí como un ejemplo. Como se ve a partir de la Fig. 3b, para potasio se puede usar una longitud de onda  $\lambda_b$ , en donde  $\lambda_b$  se puede seleccionar del intervalo de 766,5 nm  $\pm$  0,15 nm. Preferiblemente, la longitud de onda  $\lambda_b$  se selecciona para que esté cerca de la longitud de onda correspondiente al pico mostrado en la Fig. 3b. Por ejemplo, un intervalo adecuado puede ser 766,515 nm  $\pm$  0,01 nm. Se sabe que el potasio también tiene otros picos de absorción, cuya longitud de onda también se puede usar como la longitud de onda del haz. Estas longitudes de onda incluyen 766,5 nm, aproximadamente 770 nm y aproximadamente 404 nm. Los valores informados en la literatura se pueden dar para el potasio en el vacío y, por lo tanto, pueden desviarse ligeramente de estos valores.

Como se ve en las Figs. 3a y 3b, la sección transversal de absorción de un átomo de potasio (por ejemplo, a la longitud de onda de 766,5 nm) puede ser aproximadamente 105 veces mayor que la sección transversal de absorción de la molécula de cloruro de potasio (por ej., a la longitud de onda de 250 nm). Por esta razón, la sensibilidad del método para las moléculas gaseosas puede aumentarse significativamente por disociación.

- 20 En caso de que se mida un haluro de sodio (por ej., NaCl) o hidróxido de sodio (NaOH), la longitud de onda del haz debe corresponder al pico de absorción de sodio. Incluso si no se muestra en las figuras, en estos casos la longitud de onda del haz se puede seleccionar del grupo de: de 588,99 nm a 589,05 nm; 589,6 nm; 330 nm; 285 nm; y 818 nm. El último de estos valores (818 nm) corresponde a un pico de absorción de sodio excitado.

- 25 La selectividad de la absorción del haz de luz a la primera parte 520 se utiliza en las realizaciones de la invención. Dado que la sección transversal de absorción tiene al menos un pico bien definido, la espectroscopía de absorción a esta precisa longitud de onda produce resultados precisos. Sin disociación, el compuesto gaseoso (por ej., KCl o NaOH) no tiene dicho alto perfil de absorción de longitud de ondas específicas.

- 30 La ubicación (es decir, la longitud de onda) del pico de absorción depende de la presión. Por otra parte, la primera parte 520, obtenida mediante la disociación de una molécula, tiene una gran velocidad, ya que parte de la energía liberada en la disociación se transforma en la energía cinética de la primera parte. Por lo tanto, la longitud de onda para el átomo de la primera parte correspondiente al pico de absorción puede ser ligeramente diferente de los valores típicamente presentados en la bibliografía para el mismo átomo, ion, molécula o radical, ya que la disociación, ionización o excitación indujeron que el átomo, molécula, ion o radical de la primera parte 520 pudiera tener una velocidad mayor que el producto de disociación similar en condiciones ambientales. Aún más, dependiendo de la energía del pulso (o pulsos) de luz disociativo 710, la primera parte 520 puede estar en un estado excitado. Por lo tanto, la longitud de onda  $\lambda_b$  del haz puede corresponderse con el perfil de absorción de la primera parte en el estado excitado. La longitud de onda del haz  $\lambda_b$  puede corresponderse con el perfil de absorción de la primera parte 520 en el estado fundamental. La fuente de luz utilizada para generar el haz de luz se puede sintonizar preferiblemente de manera que la longitud de onda se pueda sintonizar con precisión para corresponder al perfil de absorción, p. ej., un pico en el perfil de absorción.

Muchos metales tienen un pico de absorción a una longitud de onda de menos que 1800 nm. Por lo tanto, en una realización, la longitud de onda del haz es como máximo de 1800 nm. Sin embargo, algunas moléculas tienen picos de absorción en las longitudes de onda de hasta 20 mm. Por lo tanto, en algunas realizaciones, la longitud de onda del haz es como máximo de 20 mm.

- 45 Las moléculas 510 del compuesto gaseoso se transforman (es decir, se disocian, ionizan o excitan) en al menos las primeras partes 520 utilizando al menos un pulso de luz 710. El pulso de luz 710 comprende fotones cuya energía es suficiente para transformar al menos algunos átomos, moléculas, iones o radicales del compuesto gaseoso. El pulso de luz 710 puede comprender fotones que tienen una longitud de onda de menos que 430 nm. Se observa 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 510 del compuesto a un estado disociativo 512 que tiene una energía de al menos 2,88 eV por encima del estado fundamental. Sin embargo, con referencia a la Fig. 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 en al menos 2,88 eV por encima del estado fundamental, siempre que la molécula 510 del compuesto gaseoso sea excitada al estado disociativo 512 a través de un estado excitado intermedio 510b (estado de energía o estado virtual) usando al menos dos fotones (515, 515b). Las longitudes de onda de al menos un fotón (515, 515b) pueden seleccionarse de manera que el al menos un fotón sea capaz de excitar la molécula del compuesto gaseoso a un estado disociativo que tenga una energía de al menos 2,88 eV por encima del estado fundamental. La o las longitudes de onda de los fotones 515 o 515 y 515b se seleccionan de acuerdo con la secuencia de excitación. La secuencia de excitación puede referirse a los cuantos de energía subsiguientes requeridos, mediante los cuales las moléculas del compuesto 510 son excitadas al estado disociativo 512. La

secuencia de excitación puede referirse alternativamente a los cuantos de energía subsiguientes requeridos, mediante los cuales los átomos del compuesto gaseoso 510 son ionizados o excitados en las primeras partes 520. La secuencia de excitación puede referirse a los cuantos de energía subsiguientes requeridos, mediante los cuales el átomo, molécula, ion o radical del compuesto gaseoso 510 se disocia, ioniza o excita al menos en las primeras partes 520.

El término "estado fundamental" anterior puede referirse a un estado de energía mínimo. El término "estado fundamental" puede referirse al estado en el que las moléculas del compuesto gaseoso están antes de la excitación o disociación. El "estado fundamental" en el entorno de medición puede ser diferente del "estado fundamental" a otra temperatura. Por otra parte, 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 de un compuesto gaseoso es indicativo de una probabilidad de que la molécula gaseosa absorba un fotón que tiene una longitud de onda. Por lo tanto, 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 el mismo número de fotones disociativos que tienen una longitud de onda diferente. Por lo tanto, el pulso de luz 710 no es necesariamente monocromático. Sin embargo, el pulso de luz 710 puede ser esencialmente monocromático, por lo que el pulso de luz puede consistir en fotones que tienen la misma longitud de onda. La fuente de pulsos de luz correspondiente puede comprender un láser.

La mezcla de gases que comprende el compuesto gaseoso puede ser un resultado de un proceso térmico. En particular, el proceso térmico puede ser continuo, por lo que la mezcla de gases puede fluir en una tubería, conducto o canal. La mezcla de gases puede comprender diversas cantidades de diferentes compuestos gaseosos y partículas líquidas o sólidas. Por lo tanto, la intensidad del haz de luz atenuado 175 fluctúa. Las fluctuaciones tienden a afectar a la precisión de las mediciones. P. ej. con espectroscopía de absorción para gases de combustión, los gases de combustión pueden contener diversas cantidades de partículas sólidas que viajan a través del camino óptico 160, afectando de este modo a la intensidad del haz de luz atenuado 175. Las fluctuaciones se ven claramente en una escala de tiempo del orden de un segundo (s). La figura 4 ilustra estas fluctuaciones. En la Fig. 4, la intensidad normalizada del haz de luz atenuado 175 se muestra para tres escalas de tiempo. Primero (parte más alta), durante una escala larga de 1 segundo; segundo (parte media), para una escala de tiempo intermedia de 10 milisegundos; y tercero (parte inferior), 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). Por lo tanto, se ve que el acortamiento de la escala de tiempo para la medición disminuye las fluctuaciones, y de esta manera aumenta la precisión de las mediciones. Se observa que, si la velocidad de flujo del gas de combustión es, p. ej., 10 m/s, las partículas del gas de combustión viajan solo 10  $\mu\text{m}$  en un microsegundo. Por lo tanto, 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 4 muestra la señal en el fotodetector 320 (véase, por ej., la Fig. 5a o 7a 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 caso de 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.

Con referencia a las Figs. 5b y 6, el pulso de luz puede disociar parte de las moléculas del compuesto gaseoso en la primera parte y la segunda parte al tiempo  $t_0$ , que muestra una caída pronunciada en la curva 410. Se observa una caída similar en los casos de ionización. o excitación. La señal vuelve a su nivel inicial de manera relativamente rápida. El tiempo en que la señal vuelve a su nivel original se conoce como tiempo de recuperación. Con referencia a la Fig. 6, el tiempo de recuperación puede ser del orden de 2  $\mu\text{s}$ . El período, en el que los átomos, moléculas, iones, o radicales están localizados en el primer camino óptico 160, la primera parte se ha producido transformando los átomos, moléculas, iones o radicales del compuesto gaseoso, se denomina correspondientemente período de recuperación. Durante el período de recuperación, la intensidad del haz de luz atenuado 175 ha disminuido adicionalmente, en comparación con la situación anterior al período de recuperación, debido a las primeras partes 520 del compuesto gaseoso 510 que están situadas en el primer camino óptico 160.

El método comprende detectar un primer perfil 410 (figuras 5b y 6) indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en función del tiempo. El primer perfil se denota por  $I_k(t)$ . El primer perfil indicativo de la intensidad es indicativo de la intensidad durante el período de recuperación, es decir, inmediata o esencialmente inmediatamente después de disociar las moléculas gaseosas, es decir, después de disociar al menos parte de las moléculas 510 del compuesto gaseoso en el primer camino óptico 160. El primer perfil indicativo de la intensidad puede ser indicativo de la intensidad antes del período de recuperación, es decir, antes de disociar una molécula gaseosa 510.

El primer perfil puede ser filtrado. Por ejemplo, en vez de la señal medida, se puede usar un promedio móvil de la señal como el primer perfil. Alternativamente o, además, se pueden excluir valores atípicos de las mediciones.

También se observa que el fotodetector 320 puede estar invirtiendo. En ese caso, el primer perfil aumenta incluso si la intensidad del haz de luz atenuado 175 disminuye.

En las mediciones se pueden utilizar tres partes del primer perfil  $I_k(t)$ :

- 5 - La parte izquierda (431 en la Fig. 5b) del primer perfil correspondiente a la disminución de intensidad debido al proceso de disociación, donde el perfil 410 cambia rápidamente, puede usarse para determinar el perfil (espacial) del contenido del compuesto gaseoso en el primer camino óptico 160, con la condición de que un pulso óptico (el pulso 710 u otro pulso como será tratado) y el haz 170 se desplacen en las direcciones opuestas en el primer camino óptico 160,
- 10 - El mínimo local, mínimo local extrapolado, o un mínimo local calculado (por ej., 432 en la Fig. 6) del primer perfil 410 se puede usar para determinar el contenido del compuesto gaseoso en el primer camino óptico 160, independientemente de cómo el haz 170 y el pulso se orientan mutuamente, y
- 15 - La parte derecha (430 en la Fig. 6) del primer perfil correspondiente al aumento de intensidad debido a los procesos de reacción después de la disociación, donde el perfil 410 cambia, puede usarse (en algunos casos, como será tratado) para determinar el contenido de oxígeno de la mezcla gaseosa en el primer camino óptico 160, independientemente de cómo el haz 170 y el pulso estén mutuamente orientados.

El contenido de oxígeno se puede medir al menos en los casos en que las moléculas de cloruro de potasio se disocian en átomos de potasio y cloro.

20 La Figura 5a muestra algunos componentes de un dispositivo para medir el perfil del contenido del compuesto gaseoso. La figura 5a muestra una fuente de haz de luz 310, un fotodetector 320 dispuesto para detectar la intensidad del haz de luz atenuado, una fuente de pulsos de luz 700, un fotodetector 722 dispuesto para detectar la energía del pulso de luz, un fotodetector 720 dispuesto para detectar la energía del pulso de luz atenuado, y el primer camino óptico 160 en el espacio 110. En el primer camino óptico 160, el contenido del compuesto gaseoso varía. La variación, es decir, el perfil del contenido del compuesto gaseoso 400 se muestra como la función  $\xi_{KCl}(x)$ , en donde  $\xi_{KCl}$  es el contenido de cloruro de potasio, y  $x$  es la ubicación en el primer camino óptico 160. En la figura 0  
25  $m \leq x \leq 5$  m, ya que, en la figura, la longitud del camino óptico es de 5 m. Los símbolos "I", "II" y "III" se usan para indicar los altos contenidos de gas en el camino óptico (véase también la Fig. 5c).

La fuente de haz de luz 310 genera el haz de luz 170, que se atenúa al haz de luz atenuado 175. El haz de luz se muestra con una línea continua negra en la Fig. 5a. Las flechas indican la dirección de propagación del haz de luz (170, 175).

30 La fuente de pulsos de luz 700 genera el pulso de luz 710, que se atenúa al pulso de luz atenuado 715. El pulso de luz se muestra con una línea de puntos gris en la Fig. 5a. Las flechas indican la dirección de propagación del pulso de luz (710, 715).

35 Como se trató anteriormente, la longitud de onda  $\lambda_b$  del haz 170 se selecciona para que corresponda al perfil de absorción de la primera parte 520 (por ej., átomo de potasio) en el estado fundamental o en un estado excitado. Por lo tanto, la disociación muestra en intensidad del haz de luz atenuado 175. A saber, la intensidad disminuye, correspondiendo a la cantidad de moléculas gaseosas disociadas (primeras partes 520) en el primer camino óptico 160. Esto se muestra en la Fig. 5b. El perfil 410 muestra un ejemplo de un primer perfil indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en función del tiempo. El primer perfil 410 se denota por  $I_k(t)$ .

40 La figura 5a muestra un haz de luz 170 que viaja a lo largo de un primer recorrido óptico 160 en un espacio 110 que contiene la mezcla de gases, donde la mezcla de gases comprende el compuesto gaseoso 510 y el contenido del compuesto gaseoso es no uniforme a lo largo del camino óptico 160. Un pulso de luz disociativo 710 se propaga a lo largo del primer camino óptico 160, disociando de este modo las moléculas de gas 510 en las primeras partes 520. Como se representa en la figura, la dirección en el pulso de luz 710 es inversa a la dirección del haz de luz 170. En la Fig. 5a, el haz de luz (170, 175) y el pulso de luz (710, 715) se representan con flechas que no son co-céntricas.  
45 Sin embargo, como se tratará, preferiblemente como fuentes de luz 310, 700 se usan láseres y los caminos ópticos son co-céntricas. Por ejemplo, el haz 170 y el pulso 710 viajan a lo largo del mismo camino óptico, pero en direcciones opuestas.

50 Cuando el pulso de luz 710 no ha entrado en el espacio 110, el haz de luz 170 no es atenuado por el átomo, moléculas, iones o radicales de la primera parte 520 inducidos por el pulso de luz 710. El haz de luz puede atenuarse por otros procedimientos, como será tratado. En algún momento  $t$ , los fotones del pulso de luz 710 han entrado en el espacio 110 y recorren una distancia  $x$  dentro del espacio 110, pero no se propagan a través del espacio 110 (es decir, la distancia  $x$  es más corta que la longitud del camino óptico  $L$  (véase la Fig. 5a). En este momento, la una parte de los fotones del haz de luz 170 ha recorrido una distancia  $L-x$  en el primer camino óptico 160. En este momento, los fotones del pulso 710 no han recorrido la misma parte del camino óptico que la parte de los fotones del pulso de luz 170, es decir, el resto  $L-x$  del camino óptico 160. Por lo tanto, la parte de los fotones del haz de luz 170 solo se ve afectada por la absorción en las primeras partes 520 en el camino óptico 160 por la longitud  $x$ . A medida que el tiempo avanza, la longitud  $x$  aumenta por la velocidad de la luz, alcanzando finalmente la  
55

longitud  $L$  de todo el camino óptico 160. De esta manera, a medida que el pulso de luz 710 se propaga, la longitud de absorción para el haz de luz 170 aumenta.

El resultado se representa en la Fig. 5b. En particular, si el pulso de luz 710 entra en el espacio 110 en un momento tal que los fotones del haz de luz que viaja desde este punto al fotodetector 320 llegan al fotodetector 320 en el tiempo  $t = 0$ , la intensidad del haz de luz atenuado 175 comienza a disminuir en el momento  $t = 0$ . Obsérvese que lleva cierto tiempo que el haz de luz se propague desde el espacio 110 al fotodetector 320. Se observa además que el pulso 710 se desplaza en una segunda dirección (por ej., hacia arriba) y el haz 170 se desplaza en una primera dirección (por ej., hacia abajo), la disminución de intensidad en el momento  $t$  está relacionada con el contenido de gas en la posición  $ct/2$ , en donde  $c$  es la velocidad de la luz. Esto se debe a que durante el tiempo  $t$ , el pulso 710 puede viajar primero una distancia  $ct/2$ , disociando de este modo algunas moléculas de gas, y el haz puede recorrer la distancia  $ct/2$  hacia atrás.

Puesto que las primeras partes 520 disminuyen la intensidad del haz de luz atenuado 175, el perfil del contenido del compuesto gaseoso se relaciona con la derivada respecto al tiempo del perfil de intensidad  $I_k(t)$ . Esto se muestra esquemáticamente en la Fig. 5c. La Fig. 5c muestra la derivada respecto al tiempo del perfil de intensidad  $I_k(t)$ . Como se representa en la figura, la derivada respecto al tiempo  $dI_k(t)/dt$  tiene una forma que es similar al perfil del contenido de gas 400 (Fig. 5a). Los detalles de esta relación se proporcionarán más adelante (Ecuaciones 5 - 8). Los símbolos "I", "II" y "III" se muestran para ilustrar adicionalmente la dependencia del perfil 400 del contenido de gas (Fig. 5a).

En el tratamiento anterior, se supone que la vida útil de la primera parte 520 inducida por disociación es larga. En la presente memoria larga significa en comparación con la duración temporal,  $t_p$ , del pulso 710. La duración  $t_p$  del pulso 710 también determinará una resolución espacial, como será tratado. Dado que el haz 170 y el pulso 710 viajan en direcciones opuestas, la duración del pulso, como se observa en el fotodetector 320, a partir de la disminución de la intensidad, es el doble de la duración, es decir,  $2t_p$ . Dado que las primeras partes 520 pueden recuperar a los compuestos gaseosos 510 en función del tiempo, en donde la frecuencia (número en tiempo) de las primeras partes de recuperación disminuye exponencialmente, la vida útil de la primera parte 520 inducida por disociación debería ser varias veces este valor. Para la aplicación del método, durante la vida útil de la primera parte 520 inducida por transformación puede ser al menos  $20t_p$ , preferiblemente al menos  $200t_p$ . Por el contrario, y dado que uno no puede afectar fácilmente la vida útil de la primera parte 520 inducida por disociación, la duración del pulso de luz puede seleccionarse como corta en comparación con la duración de la primera parte 520 inducida por transformación. En la presente memoria, la palabra "corto" se entiende que significa que aplica la relación anterior. Por ejemplo, para un pulso 710 que tiene una duración de 1 ns, la vida útil de la primera parte 520 debe ser preferiblemente de al menos 200 ns.

En caso de que la vida útil sea más corta, parte de las primeras partes 520 reaccionan, se recombinan o se alejan del camino óptico 160 durante la propagación del pulso 710 y/o el haz 170, lo que afecta las mediciones. Para tiempos de vida útil cortos, se puede usar un haz de luz que comprenda pulsos de luz, como será tratado.

Preferiblemente, el intervalo entre los pulsos de luz se selecciona de manera que solo existe un pulso de luz disociativo en el camino óptico 160 a la vez. Por lo tanto, solo un pulso a la vez disocia las moléculas gaseosas 510, por lo que la ubicación en la que tiene lugar la disociación se conoce con la precisión de la longitud (espacial) del pulso. Cuando solo existe un pulso disociativo de luz óptica en el primer camino óptico 160 a la vez, el tiempo entre dos pulsos disociativos subsiguientes debe ser al menos  $2L/c$ . Por ejemplo, si la longitud  $L$  (véase la Fig. 7a) del primer camino óptico es de 6 m, el tiempo entre dos pulsos subsiguientes debería ser de al menos 40 ns. Este tiempo se refiere al tiempo entre el final de un primer pulso disociativo y el comienzo de un pulso disociativo posterior. El tiempo entre dos pulsos subsiguientes podría ser significativamente mayor. En caso de que se utilice una excitación de dos fotones o de múltiples fotones, el tiempo entre los pulsos disociativos al menos se debe seleccionar como se describió anteriormente. El tiempo entre un pulso de luz antes de la excitación, pero no disociativo, y un pulso de luz disociativo podría ser significativamente menor. La duración del pulso se tratará a continuación.

Un dispositivo puede medir la intensidad en el fotodetector 320 en algunos intervalos de tiempo. El intervalo define una frecuencia de muestreo. El intervalo puede ser, p. ej., de 10 ps a 10 ns. Como ejemplo, la frecuencia de muestreo puede ser de 1 GHz, por lo que el intervalo de tiempo es de 1 ns. En este momento, un pulso de luz puede propagarse una distancia de aproximadamente 30 cm. Sin embargo, en el método, el pulso de luz 710 avanza en la dirección opuesta (inversa) al haz de luz 170 (véase la Fig. 7a). Por lo tanto, durante este intervalo, un pulso de luz puede viajar 15 cm, transformar un compuesto gaseoso, mediante lo cual el haz de luz se atenúa, y el haz de luz 175 más atenuado puede viajar otros 15 cm. Por lo tanto, una primera resolución espacial es este caso es aproximadamente  $(15 \text{ cm})^{-1}$ . La expresión "primera resolución espacial" se usa en la presente memoria, ya que la resolución real puede reducirse por otros factores, como se tratará. El término "resolución" en este caso se da en términos del inverso de la longitud, ya que, en general, cuanto más denso es el intervalo de medición, mejor es la resolución. La primera resolución espacial se da por lo tanto como  $\text{res}_1 = (2/c) \times (1/\Delta t)$ , donde  $1/\Delta t$  es la frecuencia de muestreo, e  $\Delta t$  es el tiempo entre dos mediciones. El uso de un intervalo de tiempo de 10 ps (frecuencia de muestreo de 100 GHz) aumenta la primera resolución espacial a  $(1,5 \text{ mm})^{-1}$ . El uso de un intervalo de tiempo de 10 ns (frecuencia de muestreo de 100 MHz) disminuye la primera resolución espacial a  $(1,5 \text{ m})^{-1}$ . En muchos casos

prácticos, el recipiente desde el que se realizan las mediciones tiene el tamaño de algunos metros. Por lo tanto, disminuir aún más la frecuencia de muestreo conduciría a una resolución espacial demasiado baja en comparación con el tamaño del recipiente. Sin embargo, teóricamente no hay un límite inferior para la frecuencia de muestreo. Preferiblemente, la frecuencia de muestreo se selecciona de modo que al menos cinco (5) puntos estén disponibles para la determinación del perfil. En este caso, la frecuencia de muestreo es al menos  $(5c)/(2L)$ .

La resolución espacial depende, por otro lado, de la duración (temporal) del pulso de luz 170. La duración (temporal) del pulso define la longitud (espacial) del pulso de luz, ya que el pulso viaja a la velocidad de la luz. Por ejemplo, un pulso de 1 ns tiene una longitud espacial de aproximadamente 30 cm. Dado que el haz 170 y el impulso 710 viajan en la dirección opuesta, la resolución se vuelve el doble de buena que la propuesta solo por la longitud espacial del pulso. Por lo tanto, una segunda resolución espacial está relacionada con la duración del pulso como  $res_2 = (1/2ct_p)^{-1}$ , donde  $t_p$  es la duración (temporal) del pulso. La segunda resolución espacial, como se definió anteriormente, es aproximadamente igual a la inversa de la mitad de la longitud espacial del pulso. Por lo tanto, al aumentar la duración del pulso, la duración del pulso aumenta y la segunda resolución espacial disminuye. Por ejemplo, durante 1 ns de pulso, la segunda resolución espacial es aproximadamente  $(15 \text{ cm})^{-1}$ . Por ejemplo, para un pulso de 10 ns, la segunda resolución espacial es aproximadamente  $(1,5 \text{ m})^{-1}$ . Por ejemplo, para un pulso de 10 ps, la segunda resolución espacial es aproximadamente  $(1,5 \text{ mm})^{-1}$ . Preferiblemente, la segunda resolución espacial se selecciona de manera que  $LXres_2 \geq 5$ . Más preferiblemente, la segunda resolución espacial se selecciona de manera que  $LXres_2 \geq 10$ . De ese modo, la duración del pulso  $t_p$  es preferiblemente como máximo  $(2L)/(5c)$ .

La resolución espacial general que se puede obtener de las mediciones es la menor de la primera y la segunda resolución espacial. Por ejemplo, una frecuencia de muestreo de 1 GHz da la primera resolución espacial de  $(15 \text{ cm})^{-1}$ , y un pulso de luz de 1 ns da la segunda resolución espacial de  $(15 \text{ cm})^{-1}$ . Por lo tanto, la resolución espacial general es aproximadamente  $(15 \text{ cm})^{-1}$ . Preferiblemente, la longitud (espacial) del pulso es como máximo una quinta parte (1/5) de la longitud L del primer camino óptico. Por otra parte, preferiblemente, la frecuencia de muestreo se selecciona de manera que solo la longitud del pulso limita la resolución de la medición. En general, en el procesamiento de la señal, la frecuencia de muestreo debe ser el doble de la frecuencia física. Por lo tanto, preferiblemente  $\Delta t \leq 1/2t_p$ . Incluso más preferiblemente, la frecuencia de muestreo es lo suficientemente alta como para permitir algún procesamiento de datos (por ejemplo, filtrado y promediado), con lo que aún más preferiblemente  $\Delta t < t_p/10$ .

Habiendo descrito el principio, es evidente que el método para medir el perfil del contenido de un compuesto gaseoso a partir de una mezcla de gases además comprende:

- Guiar al menos parte del haz de luz 170 a un primer camino óptico 160 de manera que al menos parte de los fotones del haz de luz 170 recorran el primer camino óptico 160 en una primera dirección,
- Generar un último pulso de luz 710, en el que el último pulso de luz 710 comprende fotones que tienen una primera longitud de onda de pulso  $\lambda_{p1}$ ,
- Transformar (es decir, disociar, ionizar) al menos parte de los átomos, moléculas, iones, o radicales del compuesto gaseoso 510 o átomos, moléculas, iones, o radicales preexcitados del compuesto gaseoso 510b (o átomos, iones o radicales de moléculas preexcitados o relajados, producidos por transformación del compuesto gaseoso 510 o el compuesto gaseoso preexcitado 510b, como se tratará) en el primer camino óptico 160 en al menos una primera parte 520, usando el último pulso de luz 710, mediante lo que el haz de luz 170 es atenuado adicionalmente al haz de luz atenuado 175 por absorción en la primera parte 520 de la molécula de gas 510 en el primer camino óptico 160,
- Guiar al menos parte del último pulso de luz 710 (o al menos parte de otro pulso de luz 710b, 710c) al primer camino óptico 160, de manera que los fotones guiados 515, 515b del último pulso de luz 710, 710a (o los fotones guiados del otro pulso de luz 710b, 710c) viajan en una segunda dirección, en donde
- La segunda dirección es inversa a la primera dirección,
- Detectar un primer perfil  $I_k(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en función del tiempo, y
- Determinar, utilizando el primer perfil  $I_k(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en función del tiempo, el perfil de contenido del compuesto gaseoso en el primer camino óptico 160.

El "otro pulso de luz 710b, 710c" se definirá más adelante. La disociación de "átomos, iones o radicales de moléculas excitados o relajados, producidos por la transformación del compuesto gaseoso o el compuesto gaseoso preexcitado" se tratará más adelante.

Más específicamente, el método comprende detectar un primer perfil indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en función del tiempo, donde

- El perfil  $I_k(t)$  comprende al menos un valor indicativo del indicativo de la intensidad  $I_{k0}$  del haz de luz atenuado 175 antes o después del periodo de recuperación, y

- El perfil  $I_k(t)$  comprende valores indicativos del haz de luz atenuado 175 durante el período de recuperación, es decir, cuando el haz de luz atenuado 175 se atenúa adicionalmente mediante los átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte 520, en el primer camino óptico 160.

En la presente memoria, el primer perfil  $I_k(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en función del tiempo se refiere a una serie temporal de mediciones de la intensidad. En la práctica, el perfil comprende los valores  $I_k(t_1)$ ,  $I_k(t_2)$ ,  $I_k(t_3)$ , ...  $I_k(t_N)$  indicativos de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en diferentes instancias de tiempo ( $t_i$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ ). Típicamente, la diferencia temporal entre las instancias es constante, es decir,  $t_{i+1} - t_i = \Delta t$  para todo  $i = 1, \dots, N-1$ . En la presente memoria,  $N$  es el número de valores indicativos de la intensidad del haz de luz atenuado 175 del primer perfil  $I_k(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175. El número  $N$  es preferiblemente grande, p. ej., al menos diez.  $N$  puede ser, p. ej., al menos cinco, al menos diez, al menos veinte, al menos cincuenta o al menos cien.

También se ha observado que, además de la parte decreciente 431 del perfil de intensidad 410 (Fig. 5b), se puede usar un valor  $I_{k,\min}$  indicativo del mínimo local del perfil de intensidad  $I_k(t)$  para determinar el contenido total del compuesto gaseoso. Esta observación aplica, si el tiempo de recuperación de la señal es suficientemente largo. A medida que la señal se recupera exponencialmente, el tiempo de recuperación debe ser al menos varias veces el tiempo de vuelo del pulso de luz y el haz de luz a lo largo del primer camino óptico. Por ejemplo, el tiempo de recuperación podría ser de al menos 203L/c. Más preferiblemente, el tiempo de recuperación es al menos 2003L/c. El valor indicativo del mínimo local puede usarse para este fin, incluso si el pulso 710 y el haz 170 viajan en la misma dirección. La figura 6 muestra un ejemplo de una medición, en la que el pulso y el haz están orientados de este modo (véase la Fig. 7b). A medida que el pulso se propaga en la misma dirección que el haz, el perfil  $I_k(t)$  cae bruscamente en el momento  $t_0$ .

El valor  $I_{k,\min}$  puede ser un valor mínimo local del primer perfil 410. El valor  $I_{k,\min}$  puede ser un promedio de varias señales medidas cerca del mínimo local, como se muestra en la figura 6 con el número de referencia 432. El valor  $I_{k,\min}$  se puede calcular ajustando una función a los datos medidos, particularmente a la parte creciente de los datos medidos. A partir de este ajuste, el valor de  $I_{k,\min}$  se puede interpolar o extrapolar, p. ej., como valor mínimo de la función ajustada. La función ajustada puede ser una línea, una función exponencial o un polinomio. P. ej., en la Fig. 6, una línea recta 435 está ajustada al perfil  $I_k(t)$  410, particularmente a la parte creciente 430 de los datos. Usando esta línea 435 se calcula un valor extrapolado  $I'_{k,\min}$  para el tiempo  $t_0$ . Si la señal fluctúa mucho puede ser necesaria una extrapolación. Además del valor mínimo local, un valor  $I_{k0}$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 cuando no están presentes en el primer camino óptico ninguna de las primeras partes 520 que inducen la transformación.

También se determina un valor  $I_{k0}$  indicativo de una intensidad de referencia en el fotodetector 320. El valor  $I_{k0}$  puede referirse a un valor  $I_{k0,1}$  indicativo de la intensidad antes, preferiblemente justo antes, de que el pulso de luz entre en el espacio 110, como se representa con el número de referencia 420 en la Fig. 6. El promedio de la señal puede usarse para determinar  $I_{k0}$ . El valor  $I_{k0}$  puede referirse alternativamente a un valor  $I_{k0,2}$  indicativo de la intensidad después del período de recuperación, como se representa con el número de referencia 425 en la Fig. 6. El promedio de la señal se puede usar para determinar  $I_{k0}$ . El contenido del compuesto gaseoso en el primer camino óptico puede calcularse a partir de  $I_{k,\min}$  e  $I_{k0}$ , como se tratará más adelante. El valor extrapolado  $I'_{k,\min}$  se puede usar en los cálculos como el valor mínimo  $I_{k,\min}$  con buena precisión. Como una ventaja técnica del método es el corto tiempo de medición, la intensidad  $I_{k0}$  se mide preferiblemente justo antes del pulso de luz disociativo (en la Fig. 6 de la parte 420 del perfil de intensidad como se indica por  $I_{k0,1}$ ).

El método para medir el contenido de un compuesto gaseoso de una mezcla de gases puede comprender determinar un primer valor  $I_{k0}$  indicativo de una primera intensidad del haz de luz atenuado 175. El primer valor indicativo de una primera intensidad  $I_{k0}$  del haz de luz atenuado 175 es detectado mediante el fotodetector 320. El primer valor indicativo de una primera intensidad  $I_{k0}$  del haz de luz atenuado 175 puede determinarse a partir del primer perfil  $I_k(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en función del tiempo.

Se ha observado además que la parte creciente 430 (Fig. 6) del primer perfil  $I_k(t)$  410 indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en función del tiempo puede usarse para determinar el contenido de oxígeno de la mezcla de gases. Esto se notó en el caso donde el compuesto gaseoso 510 es cloruro de potasio KCl que se disocia de manera que la primera parte 520 es el átomo de potasio, K. Se pueden esperar observaciones similares para la situación en la que el compuesto gaseoso 510 comprende potasio en un compuesto que se disocia de modo que la primera parte 520 consiste en potasio K, ya sea potasio excitado o relajado. En una realización, la primera parte 520 consiste en átomos de potasio individuales, que no están unidos entre sí. Como se hará evidente, el potasio puede disociarse de algunos compuestos utilizando al menos dos pulsos de luz subsiguientes.

El método puede aplicarse también a algunos otros compuestos gaseosos disociables. En particular, el método puede ser aplicable al compuesto gaseoso que comprende un metal alcalino, por lo que la molécula del compuesto gaseoso comprende al menos un átomo de metal alcalino. La expresión átomo de metal alcalino se definirá en otra parte.

Se ha observado que el primer perfil  $I_k(t)$  410 puede aumentar exponencialmente en función del tiempo. Es decir, la

diferencia  $I_k0 - I_k(t)$  puede disminuir en el tiempo como  $I_k(t) = I_{k0} \{ \exp[-\alpha L \times \exp(-t/\tau)] \}$ , en donde  $\alpha$  es un factor de atenuación para la ley Beer-Lambert (véase la ecuación 1) y  $\tau$  es una constante de tiempo para el proceso de recuperación (comparada con el "tiempo de recuperación" como se definió anteriormente). Téngase en cuenta que aquí el tiempo  $t$  es cero en el momento correspondiente a la intensidad mínima. Más específicamente, la ecuación para  $I_k(t)$  se aplica solo para la parte creciente de la intensidad. Por lo tanto, en este caso, el tiempo es ligeramente diferente del tiempo definido en otro lugar (por ej., ecuación 5). Se espera la dependencia exponencial, porque las primeras partes 520 (átomo de potasio, en particular) en el primer camino óptico 160 pueden reaccionar con oxígeno. Por lo tanto, cuanto mayor es la cantidad de oxígeno en la mezcla de gases, más rápidamente cambia el primer perfil a su valor final, cuyo valor final puede ser aproximadamente igual o igual al primer valor indicativo de la primera intensidad  $I_k0$  del haz de luz atenuado 175.

Más específicamente, se observó que la constante de tiempo  $\tau$  para el proceso de recuperación es proporcional a  $1/(N_{O_2}/V)$ , donde  $V$  es un volumen y  $N_{O_2}$  es el número de átomos en el volumen. Por lo tanto, la constante de tiempo  $\tau$  es inversamente proporcional al contenido absoluto de oxígeno, en donde el contenido absoluto de oxígeno es  $N_{O_2}/V$  (que tiene la unidad de, por ej., moléculas/m<sup>3</sup>). En una presión dada, el número de moléculas gaseosas en un volumen disminuye a medida que aumenta la temperatura, como propone la ley de los gases ideales. De la ley de los gases ideales,  $pV = NkT$ , se puede escribir  $(N/V) = (1/k) \times p/T$ , donde  $k$  es la constante de Boltzmann,  $p$  es la presión y  $T$  es la temperatura. Por lo tanto, se ve que el contenido absoluto  $N_{O_2}/V$  es directamente proporcional a la presión e inversamente proporcional a la temperatura. La constante de tiempo  $\tau$  puede deducirse del primer perfil  $I_k(t)$ , p. ej., ajustando una función exponencial a la parte creciente 430 del perfil. La forma de la función exponencial se da anteriormente.

La Tabla 1 muestra algunas constantes de tiempo observadas para algunas concentraciones de oxígeno y potasio, que se disocia del cloruro de potasio. Como se puede ver en la tabla, la presencia (y el contenido) de oxígeno disminuye claramente la constante de tiempo del proceso de recuperación. Mediante mediciones de calibración, la constante de tiempo para el proceso de recuperación puede correlacionarse con diversos contenidos de oxígeno. Se entiende que la constante de tiempo  $\tau$  también puede depender del compuesto gaseoso 510 y/o de la primera parte 520. La constante de tiempo depende de la temperatura, como se muestra en la Tabla 1. Además, la constante de tiempo  $\tau$  puede depender adicionalmente de la presión, como se trató anteriormente. Los valores en la Tabla 1 corresponden a la presión normal, es decir, 1 bar(a).

Tabla 1. Constante de tiempo para el proceso de recuperación de potasio disociado del cloruro de potasio en función del contenido de oxígeno de la mezcla de gases.

$T \downarrow; O_2 \rightarrow$	21 v-%	10 v-%	5 v-%	Aprox., 0v-%
700°C	62 ns	130 ns	261 ns	1-100 ms
750°C	75 ns	157 ns	313 ns	1-100 ms
800°C	87 ns	183 ns	366 ns	1-100 ms

Se observa que, para mediciones del contenido de oxígeno, el haz de luz y el pulso de luz pueden estar dispuestos para viajar en la misma dirección. Este es el caso en la Fig. 6, en el que la parte izquierda, es decir, la parte decreciente, del perfil  $I_k(t)$  disminuye rápidamente. Esto es porque en este caso los fotones del haz de luz que se ven afectados por las primeras partes 520 disociadas están *todos* afectados por las primeras partes 520 dentro de *la longitud total* del primer camino óptico, ya que los fotones del pulso de luz viajan junto con los fotones del haz de luz. Por el contrario, cuando el haz y el pulso se dirigen en direcciones opuestas, una parte de los fotones del haz de luz 170 se ve afectada por las primeras partes disociadas 520 solo a corta distancia, cuando el pulso 710 *no ha recorrido toda la longitud* del primer camino óptico 160. El dispositivo correspondiente se muestra en la Fig. 7b.

Habiendo descrito el principio, es evidente que el método para medir el contenido de oxígeno de una mezcla de gases además comprende:

- Generar un último pulso de luz 710, donde el último pulso de luz 710 comprende fotones que tienen una primera longitud de onda de pulso  $\lambda_{p1}$ ,
- Transformar (disociar, ionizar) al menos parte de los átomos, moléculas, iones, o radicales del compuesto gaseoso 510 o átomos, moléculas, iones o radicales preexcitados (o átomos, moléculas, iones o radicales preexcitados o relajados producidos por transformación del compuesto gaseoso o el compuesto gaseoso preexcitado) del compuesto gaseoso 510b en el primer camino óptico 160 a al menos una primera parte 520, utilizando el último pulso luminoso 710, por lo que el haz luminoso 170 es atenuado adicionalmente al haz luminoso atenuado 175 por absorción en la primera parte 520 de la molécula de gas 510 en el primer camino óptico 160,
- Detectar un primer perfil  $I_k(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en función del tiempo, y

- Determinar, utilizando el primer perfil  $I_k(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en función del tiempo, el perfil de contenido del compuesto gaseoso en el primer camino óptico 160.

En el método:

- 5 - El perfil  $I_k(t)$  puede comprender al menos un valor indicativo del indicativo de la intensidad  $I_{k0}$  del haz de luz atenuado 175 antes o después del período de recuperación, y
- El perfil  $I_k(t)$  comprende valores indicativos del haz de luz atenuado 175 durante el período de recuperación, es decir, cuando el haz de luz atenuado 175 es adicionalmente atenuado por los átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte con 520 en el primer camino óptico 160. El número de valores indicativos del haz de luz atenuado 175 durante el período de recuperación es preferiblemente grande.

10 El haz de luz 170 también puede comprender pulsos de luz. Por lo tanto, la fuente de haz de luz 310 puede ser una fuente de luz de pulsos. Cuando se usa una fuente de luz de pulsos como fuente 310 de haz de luz, los valores en el fotodetector 320 se detectan cuando el haz de luz atenuado 175 ilumina el fotodetector. Por el contrario, si se usan pulsos de luz como el haz de luz 170, el fotodetector 320 detecta periódicamente valores muy pequeños que corresponden a los tiempos, cuando el haz de luz atenuado 175 está apagado. Se pueden obtener valores  
15 relevantes para el método cuando el haz de luz atenuado 175 ilumina el fotodetector 320.

Si la duración temporal del pulso luminoso del haz 170 es al menos del mismo orden que el tiempo de recuperación, la medición se puede realizar como se discutió anteriormente, temporizando el pulso disociativo de manera que al menos se mida la parte decreciente 431 del perfil de intensidad 410 (Fig. 5b).

20 Cuando la duración temporal del pulso de luz del haz 170 es corta y la vida útil de la primera parte disociada 510 es larga, mediante la temporización adecuada de los pulsos del haz 170 y del pulso disociativo 710, el punto en el que estos pulsos colisionan puede ser revisado. El haz de luz se atenuará aún más por la atenuación en las primeras partes 520 solo a partir de este punto, porque la larga vida útil significa que las primeras partes 520 en el primer camino óptico desde este punto hacia adelante en la dirección del haz de luz permanecerán como la primera parte disociada mientras viaja el rayo de luz. Seleccionando un múltiplo de diferentes puntos de colisión para el pulso del  
25 haz y el pulso disociativo, se puede calcular el perfil.

La intensidad atenuada antes del pulso disociativo 710 se puede medir con otro pulso de luz del haz 170 antes de disociar moléculas en el primer camino óptico. El punto en el que el pulso 710 y el último pulso del haz 170 colisionan se puede controlar temporizando el último pulso del haz.

30 Cuando la duración temporal del pulso de luz del haz es corta y la vida útil de la primera parte disociada 520 es corta, temporizando adecuadamente los pulsos del haz 170 y el pulso disociativo 710, el punto en donde estos pulsos colisionan puede ser controlado. El haz de luz se atenuará adicionalmente por la atenuación en las primeras partes 520 solo en este punto, porque la vida útil corta significa que las primeras partes 520 en el primer camino óptico desde este punto hacia adelante en la dirección del haz de luz han reaccionado en diferentes compuestos o se han relajado a otro estado de energía. El perfil se puede calcular seleccionando un múltiplo de diferentes puntos  
35 de colisión para el pulso del haz 170 y el pulso 710.

La intensidad atenuada antes del pulso 710 puede medirse con otro pulso de luz del haz 170 antes de disociar moléculas en el primer camino óptico. El punto en el que el pulso 710 y el último pulso del haz 170 colisionan se puede controlar temporizando el último pulso del haz. La diferencia de tiempo entre los pulsos del haz de luz no debe ser grande en comparación con la vida útil de la primera parte 520 disociada. En una realización, la diferencia  
40 de tiempo entre los pulsos del haz de luz es menor que 1 s. En una realización preferida, la diferencia de tiempo entre los pulsos del haz de luz es menor que 10  $\mu$ s.

Parte del primer perfil  $I_k(t)$  se detecta durante el período de recuperación. Por otra parte, durante el período de recuperación, la intensidad del haz de luz atenuado 175 se ha atenuado adicionalmente mediante la absorción del  
45 haz de luz 170 en la transformación inducida por las primeras partes 520 en el primer camino óptico 160. Como sólo se usa un tipo de pulsos de luz 710, el pulso de luz 710 puede considerarse el último pulso de luz, si es necesario.

También es posible detectar el perfil del contenido y/o el contenido de dos compuestos gaseosos diferentes utilizando un pulso de luz que transforma (es decir, disocia, ioniza) átomos, moléculas, iones o radicales de un primer compuesto gaseoso y átomos, moléculas, iones o radicales de un segundo compuesto gaseoso. Por lo tanto,  
50 el pulso de luz transforma los átomos, moléculas, iones o radicales del primer compuesto gaseoso al menos en las primeras partes. Además, el pulso de luz transforma los átomos, las moléculas, los iones o los radicales del segundo compuesto gaseoso al menos en las primeras partes. Como ejemplo, un pulso de luz puede disociar tanto moléculas de hidróxido de sodio como de 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. Tanto una primera segunda parte como una 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 manera que el haz de luz comprenda fotones correspondientes a un primer pico de absorción de la primera primera parte y comprenda además fotones

correspondientes a un segundo pico de absorción de la segunda primera parte. P. ej., el haz de luz puede comprender fotones correspondientes a un pico de absorción de sodio y además comprende fotones correspondientes a un pico de absorción de potasio.

5 Por lo tanto, el contenido y/o el perfil del contenido de dos compuestos gaseosos diferentes se puede medir con el método. Si el haz y el pulso viajan en la dirección inversa, también se puede medir el perfil del contenido. Esta realización comprende:

- Generar un haz de luz 170, en el que 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  $\lambda_{b2}$ ,
- 10 - Guiar el haz de luz 170 a un primer camino óptico 160 de manera que al menos parte de los fotones del haz de luz 170 se desplacen en una primera dirección, en donde
- El primer camino óptico 160 pasa a través de un espacio 110 que contiene la mezcla gaseosa que comprende los compuestos gaseosos, por lo que el haz de luz 170 es atenuado a un haz de luz atenuado 175 y
- 15 - Generar un pulso de luz 710, en el que el pulso de luz 710 comprende fotones 515 que tienen una primera longitud de onda de pulso  $\lambda_{p1}$ ,
- Transformar al menos parte de (i) átomos, moléculas, iones, o radicales del primer compuesto gaseoso, o (ii) átomos, moléculas, iones o radicales preexcitados del primer compuesto gaseoso en el primer camino óptico 160 en átomos, moléculas, iones o radicales de la primera primera parte usando el pulso de luz 710, por lo que el haz de luz 170 es adicionalmente atenuado, en la primera longitud de onda del haz  $\lambda_{b1}$ , en un haz de luz atenuado 175 por absorción en los átomos, moléculas, iones o radicales de la primera primera parte en el primer camino óptico 160,
- 20 - Seleccionar la primera longitud de onda del haz ( $\lambda_{b1}$ ) de forma que la primera longitud de onda del haz ( $\lambda_{b1}$ ) corresponda al pico de absorción de la primera primera parte,
- Transformar al menos parte de (i) moléculas, iones, o radicales del segundo compuesto gaseoso o (ii) átomos, moléculas, iones, o radicales preexcitados del segundo compuesto gaseoso en el primer camino óptico 160 en átomos, moléculas, iones o radicales de la segunda primera parte usando el pulso de luz 710, por lo que el haz de luz 170 es adicionalmente atenuado, en la segunda longitud de onda del haz  $\lambda_{b2}$ , a un haz de luz atenuado 175 por absorción en los átomos, moléculas, iones o radicales de la segunda primera parte en el primer camino óptico 160,
- 25 - Seleccionar la segunda longitud de onda del haz ( $\lambda_{b2}$ ) de modo que la segunda longitud de onda del haz ( $\lambda_{b2}$ ) corresponda al pico de absorción de la segunda primera parte,
- Detectar un primer perfil  $I_k(t)$  de perfil indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado (175) en la primera longitud de onda del haz  $\lambda_{b1}$  en función del tiempo,
- 30 - Detectar un segundo perfil  $I_k^2(t)$  de perfil indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado (175) en la segunda longitud de onda del haz  $\lambda_{b2}$  en función del tiempo,
- 35 - Determinar, utilizando el primer perfil, el contenido de un primer contenido de compuesto gaseoso de la mezcla de gases, y
- Determinar, utilizando el segundo perfil, el contenido de un segundo contenido de compuesto gaseoso de la mezcla de gases.
- 40 Las mediciones del contenido del segundo compuesto gaseoso se pueden realizar usando el segundo perfil como se ha discutido para el primer compuesto gaseoso usando el primer perfil. En caso de que el pulso y el haz viajen en dirección inversa, también se puede medir el perfil del contenido. Las mediciones del perfil del contenido del segundo compuesto gaseoso se pueden hacer usando el segundo perfil como se ha tratado para el primer compuesto gaseoso usando el primer perfil.
- 45 En caso de que se mida el perfil del primer y/o segundo compuesto gaseoso, los fotones del pulso de luz pueden viajar en la dirección opuesta a los fotones del haz de luz, como se ha tratado.

50 Alternativamente a un haz de luz, se pueden usar dos haces de luz: un primer haz de luz que comprende fotones correspondientes a un primer pico de absorción de la primera primera parte; y un segundo haz de luz que comprende fotones correspondientes a un segundo pico de absorción de la segunda primera parte. El primer y el segundo haz de luz pueden propagarse a lo largo del primer camino óptico en la misma dirección o en la dirección inversa.

Por lo tanto, con el método se puede medir el contenido de dos compuestos gaseosos diferentes. Dependiendo de la

orientación mutua del pulso de luz y del haz de luz, también se puede medir el perfil del contenido. Esta realización comprende:

- 5 - Generar un primer haz de luz 170 de manera que al menos parte de los fotones del haz de luz (170) viajen en una primera dirección, donde el primer haz de luz 170 comprende fotones que tienen una primera longitud de onda de haz  $\lambda_{b1}$ ,
- Generar un segundo haz de luz, en el que el segundo haz de luz comprende fotones que tienen una segunda longitud de onda de haz  $\lambda_{b2}$ ,
- Guiar los haces de luz a un primer camino óptico 160, donde
- 10 - El primer camino óptico 160 discurre a través de un espacio 110 que contiene la mezcla de gases que comprende los compuestos gaseosos, por lo que los haces de luz son atenuados a haces de luz atenuados;
- Generar un pulso de luz 710, en el que el pulso de luz 710 comprende fotones 515 que tienen una primera longitud de onda de pulso  $\lambda_{p1}$ ,
- 15 - Transformar al menos parte de (i) átomos, moléculas, iones, o radicales del primer compuesto gaseoso, o (ii) átomos, moléculas, iones o radicales preexcitados del primer compuesto gaseoso en el primer camino óptico 160 en átomos, moléculas, iones o radicales de la primera primera parte utilizando el pulso de luz 710, por lo que el primer haz de luz es adicionalmente atenuado a un primer haz de luz atenuado por absorción en los átomos, moléculas, iones o radicales de la primera primera parte en el primer camino óptico 160,
- Seleccionar la primera longitud de onda del haz ( $\lambda_{b1}$ ) de forma que la primera longitud de onda del haz ( $\lambda_{b1}$ ) corresponda al pico de absorción de la primera primera parte,
- 20 - Transformar al menos parte de (i) moléculas, iones, o radicales del segundo compuesto gaseoso o (ii) átomos, moléculas, iones, o radicales preexcitados del segundo compuesto gaseoso en el primer camino óptico 160 en átomos, moléculas, iones o radicales de la segunda primera parte usando el pulso de luz 710, por lo que el segundo haz de luz es adicionalmente atenuado a un segundo haz de luz atenuado por absorción en los átomos, moléculas, iones o radicales de la segunda primera parte en el primer camino óptico
- 25 160,
- Seleccionar la segunda longitud de onda del haz ( $\lambda_{b2}$ ) de modo que la segunda longitud de onda del haz ( $\lambda_{b2}$ ) corresponda al pico de absorción de la segunda primera parte,
- Detectar un primer perfil  $I_k(t)$  indicativo de la intensidad del primer haz de luz atenuado 175 en función del tiempo,
- 30 - Detectar un segundo perfil  $I_k^2(t)$  indicativo de la intensidad del segundo haz de luz atenuado en función del tiempo,
- Determinar, utilizando el perfil  $I_k(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en función del tiempo, el contenido de un primer contenido de compuesto gaseoso de la mezcla de gases, y
- 35 - Determinar, usando el perfil  $I_k(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en función del tiempo, el contenido de un primer contenido de compuesto gaseoso de la mezcla de gases.

En caso de que se mida el perfil del primer compuesto gaseoso, los fotones del impulso de luz pueden viajar en una segunda dirección, en donde la segunda dirección es inversa a los fotones del primer haz de luz, como se ha tratado. En caso de que se mida el perfil del segundo compuesto gaseoso, los fotones del pulso de luz pueden viajar en una dirección inversa a los fotones del segundo haz de luz.

- 40 Más aún, es posible detectar el contenido de dos compuestos gaseosos diferentes usando dos pulsos de luz de manera que el primer pulso de luz disocia moléculas de un primer compuesto gaseoso y el segundo pulso de luz disocia moléculas de un segundo compuesto gaseoso. Por lo tanto, el primer pulso de luz disocia las moléculas del primer compuesto gaseoso en primeras primeras partes y en primeras segundas partes. Además, el segundo pulso de luz disocia las moléculas del segundo compuesto gaseoso en segundas primeras partes y en segundas
- 45 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 las 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 al átomo de oxígeno y la segunda segunda parte puede referirse a una molécula de sulfato.
- 50 En este caso, el haz de luz puede comprender fotones correspondientes al pico de absorción del magnesio. Sin embargo, al sincronizar los dos pulsos de luz de manera ligeramente diferente, se pueden medir con el método tanto el óxido de magnesio como el sulfato de magnesio. Esta realización comprende:

## ES 2 656 155 T3

- Generar un haz de luz 170, en el que el haz de luz 170 comprende fotones que tienen una primera longitud de onda de haz  $\lambda_b$ ,
- Guiar el haz de luz 170 a un primer camino óptico 160 de manera que al menos parte de los fotones del haz de luz 170 se desplacen en una primera dirección, en donde
- 5 - El primer camino óptico 160 pasa a través de un espacio 110 que contiene la mezcla gaseosa que comprende los compuestos gaseosos, por lo que el haz de luz 170 es atenuado a un haz de luz atenuado 175,
- Generar un pulso de luz 710, en el que el pulso de luz 710 comprende fotones 515 que tienen una primera longitud de onda de pulso  $\lambda_{p1}$ ,
- 10 - Transformar al menos parte de (i) átomos, moléculas, iones, o radicales del primer compuesto gaseoso, o (ii) átomos, moléculas, iones o radicales preexcitados del primer compuesto gaseoso en el primer camino óptico 160 en átomos, moléculas, iones o radicales de la primera primera parte usando el pulso de luz 710, por lo que el haz de luz 170 es adicionalmente atenuado en un haz de luz atenuado 175 por absorción en los átomos, moléculas, iones o radicales de la primera primera parte en el primer camino óptico 160,
- 15 - Detectar un primer perfil  $I_k(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en función del tiempo, y
- Determinar, utilizando el perfil  $I_k(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en función del tiempo, el perfil del contenido de un primer contenido de compuesto gaseoso de la mezcla de gases,
- Generar otro pulso de luz, donde el otro pulso de luz comprende fotones 515 que tienen otra longitud de onda de pulso  $\lambda_{p1,1}$ ,
- 20 - Transformar al menos parte de (i) moléculas, iones, o radicales del segundo compuesto gaseoso o (ii) átomos, moléculas, iones, o radicales preexcitados del segundo compuesto gaseoso en el primer camino óptico 160 en átomos, moléculas, iones o radicales de la segunda primera parte usando el otro pulso de luz, por lo que el haz de luz 170 es adicionalmente atenuado en un haz de luz atenuado 175 por absorción en los átomos, moléculas, iones o radicales de la segunda primera parte en el primer camino óptico 160,
- 25 - Detectar un segundo perfil  $I_k^2(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en función del tiempo,
- Determinar, usando el segundo perfil  $I_k^2(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en función del tiempo, el contenido del contenido del segundo compuesto gaseoso de la mezcla de gases.

En caso de que el perfil del contenido del segundo compuesto gaseoso sea interesante, el método puede además comprender:

- 30 - Guiar al menos parte del otro pulso de luz al primer camino óptico 160, de manera que los fotones del otro pulso de luz viajen en una segunda dirección, en donde
- La segunda dirección es inversa a la primera dirección.

Las moléculas gaseosas que se pueden medir usando solo un pulso de luz disociativo incluyen:

- 35 - Haluros alcalinos de la forma tipo  $MH^a$ , donde M es un átomo alcalino (metal), excluyendo hidrógeno, del grupo IA de la tabla periódica de los elementos y Ha es un átomo de halógeno del grupo VIIA de la tabla periódica de los elementos, por lo que el metal M puede seleccionarse del grupo de Li, Na, K, Ru, Cs y Fr, y el átomo de halógeno Ha puede seleccionarse del grupo de F, Cl, Br, I y At;
- 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 y OH es la molécula de hidróxido;
- 40 - (Mono)óxidos metálicos, como PbO, NiO, MnO y CrO;
- Sales de metales de polihaluro disociadas térmicamente, tales como PbCl, HgCl;
- Sales de polihaluro de metales, tales como PbCl<sub>2</sub>;
- Óxido de nitrógeno NO<sub>2</sub>;
- 45 - Sulfuros metálicos, en donde el sulfuro metálico 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;
- Carbonatos, p. ej., carbonatos metálicos tales como carbonato de potasio (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>);
- Sulfatos, p. ej., sulfatos metálicos tales como sulfato de potasio (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), en donde un único átomo de potasio

puede disociarse de estos compuestos con un pulso; y

- Algunos polihaluros, p. ej.,  $\text{SCl}_2$ ,  $\text{TeBr}_2$ ,  $\text{PbBr}_2$  y  $\text{PbI}_2$  que pueden estar disociados en un átomo y en dos átomos de halógeno con un solo pulso.

5 Se entiende que estos gases son solo ejemplos, y el mismo principio se puede aplicar a muchos otros gases o vapores.

En cuanto a los polihaluros metálicos, especialmente  $\text{PbCl}_2$ , el radical  $\text{PbCl}$  tiene una banda de absorción en el ultravioleta profundo, lo que presenta algunas limitaciones para la fuente del haz de luz. Otra posibilidad para la medición de  $\text{PbCl}_2$  se tratará a continuación. El óxido de nitrógeno  $\text{NO}_2$  puede disociarse en (mono)óxido de nitrógeno  $\text{NO}$  y un átomo de oxígeno  $\text{O}$  usando una longitud de onda de pulso de 250 nm a 410 nm. El (mono)óxido de nitrógeno  $\text{NO}$  tiene picos de absorción relativamente fuertes en el intervalo de longitud de onda de 203 nm a 227 nm.

Una ventaja del método es que el primer camino óptico 160 (y posiblemente también el segundo camino óptico 800) puede extenderse a través de una línea (tubería, conducto, canal) de gas desde una pared 102a1 a una pared opuesta 102a2, como se representa en las Figs. 12 y 13. Por lo tanto, el contenido de gas puede medirse *in situ* desde el primer camino óptico 160. Por lo tanto, el problema de recoger una muestra representativa de la mezcla de gases para las mediciones puede eludirse simplemente omitiendo el muestreo.

#### Dispositivo de medición, disociación, ionización o excitación en un solo paso

La Figura 7a muestra una realización de un dispositivo 990 para medir el perfil del contenido de un compuesto gaseoso en una mezcla de gases usando un pulso de luz disociativo 710. El dispositivo comprende una fuente de haces de luz 310. La fuente de haces de luz 310 está dispuesta para generar luz que comprende fotones que tienen la longitud de onda del haz  $\lambda_b$ . La fuente 310 de haces de luz puede producir un haz 170 de luz monocromático o esencialmente monocromático. La fuente 310 de haces de luz puede producir un haz 170 de luz coherente o esencialmente coherente. Se observa que incluso si se usa un láser como la fuente 310 de haces de luz, con lo cual el haz de luz 170 es esencialmente coherente, la dispersión desde las partículas en el gas de combustión en el espacio 110 amplía el haz de luz en el espacio 110. Como se trató anteriormente, la fuente 310 de haces de luz puede estar dispuesta para generar pulsos de luz.

Cuando el perfil del contenido del compuesto gaseoso 510 se mide a partir del contenido de la primera parte 520 (Fig. 2a) del compuesto gaseoso 510, la longitud de onda de haz  $\lambda_b$  del haz de luz 170 se selecciona de manera que pueda medirse el contenido de la primera parte. La(s) primera(s) parte(s) 520 se generan por transformación (disociación, ionización o excitación) de o de los átomos, moléculas, iones o radicales del compuesto gaseoso 510. A medida que se mide el perfil del contenido a partir de la absorción en el primer camino óptico 160, se mide el perfil del contenido de compuesto gaseoso en el primer camino óptico 160. El primer camino óptico recorre el espacio 110 que contiene la mezcla de gases.

En la Figura 7a, el haz de luz 170 y el haz de luz atenuado 175 se representan con una línea continua negra relativamente delgada. Las flechas de estas líneas indican la dirección de los fotones del haz de luz 170. En particular, en el primer camino óptico 160 los fotones del haz de luz 170 viajan hacia abajo en la Figura 7a.

El dispositivo 990 de la Fig. 7a comprende una fuente de pulsos de luz 700. La fuente de pulsos de luz está dispuesta para emitir pulsos de luz 710 que comprenden fotones de alta energía 515 (Fig. 2a) de manera que al menos algunos de los fotones transforman las moléculas de gas 510 o moléculas de gas preexcitadas en el primer camino óptico 160. La fuente de pulsos 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 suficientemente corta para disociar las moléculas gaseosas 510 (Fig. 2a). Los pulsos de luz transforman al menos parte del compuesto gaseoso 510 en la primera parte 520 y opcionalmente en una segunda parte 525, como se trató anteriormente. Al menos parte de los pulsos de luz son guiados al primer camino óptico 160. A medida que el pulso de luz 710 o una parte del pulso de luz 710 viaja a través del primer camino óptico 160, al menos parte de las moléculas gaseosas 510 (Fig. 2a) en el primer camino óptico 160 se están disociando en la primera parte 520 y la segunda parte 525.

En la Figura 7a, el pulso de luz 710 y el pulso de luz atenuado 715 se representan con una línea de puntos grises relativamente gruesa. Las flechas de estas líneas indican la dirección de los fotones del pulso de luz. La línea (gris, punteada) para el pulso óptico 710 se hace más ancha que la línea (negra, sólida) para el haz de luz 170 ya que, en una realización preferida, el área de la sección transversal del pulso de luz es mayor que el área de la sección transversal del haz de luz. En particular, en el primer camino óptico 160, los fotones del pulso de luz 710 viajan hacia arriba en la Figura 7a. En la Fig. 7a, el pulso de luz es coherente, por lo que parte de los fotones del pulso 710 se desplazan a lo largo de un segundo camino óptico 800, mientras que otra parte de los fotones del pulso de luz se guía a un fotodetector 722. El segundo camino óptico 800 es paralelo y co-céntrico con el primer camino óptico. El pulso de luz no es necesariamente coherente (Fig. 7c).

En la Fig. 7a, el dispositivo comprende medios para guiar el haz de luz 170 al primer camino óptico 160 de manera que los fotones del haz de luz 170 viajan en una primera dirección (en la Fig. 7a hacia abajo). En la Fig. 7a, el medio

es solo la propia fuente 310 de haces de luz, que emite luz al primer camino óptico. Sin embargo, el dispositivo puede comprender también otros medios tales como al menos uno de guías de ondas, reflectores (por ej., un espejo unidireccional, o un espejo dicroico), filtros (por ej., un filtro dicroico) y deflectores. En la realización, un elemento óptico 742 está dispuesto para guiar al menos parte del pulso de luz 710 al primer camino óptico 160, de manera que los fotones 515 del pulso de luz 710 viajen en una segunda dirección, donde la segunda dirección es inversa (es decir, opuesta) a la primera dirección. En la Fig. 7a, la segunda dirección es hacia arriba. El elemento óptico 742 puede ser, p. ej., un reflector, especialmente un espejo/filtro dicroico. Un espejo/filtro dicroico pasa luz de un pequeño intervalo de longitudes de onda mientras refleja otros colores.

El haz de luz puede ser coherente. Tal 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 de las dimensiones se seleccionan de manera que la primera dimensión sea la más pequeña de la primera y la segunda dimensión, es decir,  $l_1 = \min(l_1, l_2)$ . Las dimensiones pueden ser iguales, p. ej., el haz puede ser circular. Teóricamente, no hay ningún límite para las dimensiones del haz de luz 170. Sin embargo, un haz de luz estrecho se expande más en el espacio 110 que un haz de luz ancho. Por ejemplo, la turbulencia en el espacio 110 afecta a la distribución de la temperatura en el camino óptico, afectando de ese modo al coeficiente de refracción de la luz y afectando además al recorrido del haz de luz. Por otra parte, un haz de luz muy amplio puede disminuir la sensibilidad del método. La primera dimensión del haz de luz puede estar, p. ej., en el intervalo 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,  $r_1$ , está preferiblemente en el intervalo de 10 mm a 25 mm. El radio del haz de luz puede denominarse radio del haz.

El pulso de luz puede ser coherente con una sección transversal. Las dimensiones del pulso de luz afectan a la sensibilidad del método. El método es más sensible si se usa un pulso de luz 710 estrecho. Por otra parte, un pulso de luz muy amplio puede ser difícil de generar. La primera dimensión del pulso de luz puede estar, p. ej., en el intervalo 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 manera que el pulso de luz 710, cuando está presente, rodee al haz de luz 170. El pulso de luz 710 puede tener una sección transversal circular, por lo que el pulso de luz puede tener un radio de pulso  $r_2$  de 0,5 mm a 50 mm. El radio del haz también puede ser igual o aproximadamente igual al radio del pulso. Preferiblemente, el radio de pulso,  $r_2$ , es 1 mm - 2 mm mayor que el radio del haz,  $r_1$ . Preferiblemente, el perfil de intensidad del pulso de luz 710 es espacialmente uniforme. El término espacialmente uniforme se refiere a un perfil de intensidad que es uniforme en el área de sección transversal del pulso. El área de la sección transversal se refiere al área de la sección transversal del pulso, como se definirá a continuación en el contexto del término al menos en caminos ópticos parcialmente superpuestos. El término uniforme como tal se refiere a una distribución que tiene esencialmente solo un valor único. (Naturalmente, la intensidad fuera del haz es cero).

El dispositivo 990 comprende además un fotodetector 320. El fotodetector está dispuesto para detectar la intensidad del haz de luz 175 atenuado. El haz de luz atenuado comprende fotones que tienen la longitud de onda  $\lambda_b$ . En particular, el fotodetector está dispuesto para detectar la intensidad del haz de luz atenuado 175 en varios instantes de tiempo, por lo que el fotodetector 320 está dispuesto para detectar el primer perfil  $I_k(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en función del tiempo.

En la realización de la Fig. 7a, la fuente de haz de luz 310, la fuente de pulso de luz 710 y el fotodetector 320 están situados 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 ej., para detectar compuestos gaseosos del ambiente. El espacio 110 está más separado del exterior con las ventanas 140d1 y 140d2.

Los elementos ópticos 740, 742 y 744 de la Fig. 7a se tratarán a continuación.

El dispositivo de la Fig. 7a también se puede disponer para medir el contenido de oxígeno de la mezcla de gases. La Figura 7b muestra otra realización de un dispositivo dispuesto para medir el contenido de oxígeno de la mezcla de gases. En caso de que se mida el contenido de oxígeno, los fotones del haz de luz y el fotón del pulso de luz pueden viajar en la misma dirección, como se representa en la Fig. 7b. Con esta realización, además del contenido de oxígeno, solo se puede medir el contenido total del compuesto gaseoso en el primer camino óptico 160, pero no la variación espacial del mismo, es decir, el perfil del contenido de gas.

Las Figuras 7a y 7b muestran:

- Una fuente 310 de haces de luz, dispuesta para emitir un haz de luz 170 monocromático y coherente que tiene la longitud de onda del haz  $\lambda_b$ ,
- Una fuente 700 de pulsos de luz, 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 el haz de luz 170, o una parte del haz de luz 170, a un primer camino óptico 160,

- Un segundo elemento óptico 742, dispuesto para pasar el haz de luz atenuado 175, es decir, luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_b$ , y para desviar, reflejar o absorber el pulso de luz atenuado 715 o el pulso de luz 710, es decir, luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p1}$ ,
- 5 - Un tercer elemento óptico 744, dispuesto para reflejar una primera parte de luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p1}$  (es decir, una parte del pulso de luz) y para pasar una segunda parte de luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p1}$ ,
- Un primer fotodetector 320, dispuesto para detectar un primer perfil  $I_k(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 que tiene la longitud de onda  $\lambda_b$  en el fotodetector 320,
- Una lente 746, dispuesta para converger el haz de luz atenuado 175 al primer fotodetector 320,
- 10 - Un segundo fotodetector 720, dispuesto para detectar la intensidad del pulso de luz 710 o el pulso de luz atenuado 715, pulso de luz y pulso de luz atenuado que tienen la longitud de onda  $\lambda_{p1}$ ,
- un tercer fotodetector 722, dispuesto para detectar la intensidad de la luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p1}$ , y
- Una unidad de procesamiento de datos 910, en la que el procesamiento de datos está dispuesto para determinar, usando el primer perfil  $I_k(t)$  (que es indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en el fotodetector 320 en función del tiempo), el perfil del contenido de compuesto gaseoso en la mezcla de gases
- 15 en el primer camino óptico 160.

El primer elemento óptico 740 puede estar dispuesto para:

- Desviar, reflejar o absorber el pulso de luz atenuado 715, es decir, luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p1}$  (Fig. 7a), o
- 20 - Guiar al menos parte del pulso de luz 710 al primer camino óptico 160 (Fig. 7b).

El segundo elemento óptico 742 puede estar dispuesto para:

- Guiar al menos parte del pulso de luz 710 al primer camino óptico de manera que los fotones 515 de la parte guiada del pulso de luz 710 viajen en una segunda dirección, en donde la segunda dirección es inversa a la primera dirección (Fig. 7a) o
- 25 - Desviar, reflejar o absorber el pulso de luz atenuado 715, es decir, la luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p1}$  (Fig. 7b).

Las Figs. 7a y 7b también muestran, aunque no componentes del dispositivo 990,

- Paredes 102 que definen un espacio 110 en su interior, estando el espacio 110 dispuesto para contener la mezcla de gases,
- 30 - Una primera ventana 140d1, dispuesta para pasar el pulso de luz 710 y el haz de luz 170 al espacio 110 y para retener la mezcla de gases 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 para retener la mezcla de gases dentro del espacio 110.

35 Se observa que la intensidad o la energía del pulso de luz atenuado 715 no se mide necesariamente y, por lo tanto, el segundo fotodetector 720 se puede omitir. 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 óptico el elemento 744 pueden omitirse.

40 Además, el dispositivo 990 puede comprender otros elementos ópticos tales como lentes para hacer converger la primera parte del pulso de luz 710 al tercer fotodetector 722, o el pulso de luz atenuado 715 al segundo fotodetector 720. Otros ejemplos de tales elementos ópticos de guías de ondas ópticas son, por ej., fibras ópticas, dispuestas para guiar la luz y/o para afectar un ángulo o una posición de un haz de luz o pulso de luz.

45 Incluso en el caso 7b, una parte del pulso de luz 710 puede guiarse a un segundo camino óptico 800. Es evidente a partir de la Fig. 7a que el segundo camino óptico 800 puede solaparse con el primer camino óptico. Sin embargo, incluso cuando el haz 170 y el impulso 710 no están dispuestos para propagarse en direcciones opuestas, el segundo camino óptico 800 puede solaparse con el primer camino óptico 160. Con referencia a las Figs. 7a y 7b, el segundo camino óptico 800 se solapa con el primer camino óptico 160, por ejemplo, cuando los caminos ópticos son esencialmente paralelos y co-céntricos. Los caminos ópticos también pueden ser esencialmente paralelos, pero los ejes centrales pueden desplazarse uno con respecto al otro. La expresión esencialmente paralelo puede

50 interpretarse de manera que el primer camino óptico 160 sea esencialmente paralelo al segundo camino óptico 800 si

- Los caminos ópticos son paralelos, o
- Los caminos ópticos están tan alineados, que el haz de luz 170 y el pulso de luz 710 se superponen, al menos parcialmente, en todos los puntos entre
  - 5      o Un punto inicial, en el que el punto inicial es uno del primer elemento óptico 740 y la fuente de haces de luz 310, cualquiera que esté comprendido por el dispositivo y
  - o Un punto final, en el que el punto final es uno de la segunda salida óptica 140d2, el elemento óptico 742, las lentes 746 y el primer fotodetector 320, cualquiera que esté comprendido por el dispositivo, en donde
  - o Los componentes que definen los puntos inicial y final se seleccionan de tal manera que la longitud entre el punto inicial y el punto final sea la más corta de las diferentes posibilidades, o
- 10   - El ángulo entre el eje central del primer camino óptico 160 y el eje central del segundo camino óptico es menor que 5 grados.

15   La expresión "superposición al menos parcial en todos los puntos" debe entenderse de la siguiente manera: el punto (al que se hace referencia) es un punto del eje central de primer camino óptico. Por el contrario, el eje central del primer camino óptico define un conjunto de puntos. A medida que la luz viaja de manera recta, el eje central define un plano que es perpendicular al eje central. En este plano, el primer camino óptico 160 define una primera área de sección transversal, es decir, un primer conjunto de puntos. En este plano, el segundo camino óptico 800 define una segunda área de sección transversal, es decir, un segundo conjunto de puntos. Los caminos ópticos 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. El más corto de los posibles caminos se selecciona como se trató anteriormente, ya que (con referencia a la Fig. 7b), evidentemente, el haz y el pulso no se superponen necesariamente antes, p. ej., del elemento óptico 740 (Fig. 7b).

20   La sección transversal del haz de luz 170 se entiende 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 aumenta la distancia desde el eje central. Típicamente, la disminución es exponencial. Se supone que el haz de luz está ubicado en los puntos, 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.

25   La sección transversal del pulso de luz 710 se entiende de la siguiente manera. La intensidad del pulso de luz tiene típicamente un máximo en el eje central del pulso de luz, y la intensidad disminuye a medida que aumenta la distancia desde el eje central. 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, p. ej., el perfil de intensidad puede comprender múltiples picos. Por otra parte, un pico de intensidad no está necesariamente ubicado en el eje central.

30   La intensidad del pulso de luz 710 es preferiblemente esencialmente uniforme en el espacio. La intensidad espacialmente uniforme simplifica los cálculos del contenido del compuesto gaseoso. Típicamente, el perfil de intensidad del pulso de luz 710 disminuye espacialmente exponencialmente con la distancia desde el eje central del pulso de luz 710. En estos casos, el área de la sección transversal se refiere al área de la sección transversal del pulso, donde el pulso se considera que está ubicado en los puntos, 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 del compuesto gaseoso, la intensidad exponencialmente decreciente es razonablemente uniforme. El perfil de intensidad también puede tener una forma diferente, p. ej., el perfil de intensidad puede comprender múltiples picos. Por otra parte, un pico de intensidad no está necesariamente ubicado en el eje central. En caso de que el perfil de intensidad difiera significativamente del uniforme, se puede usar un área efectiva, p. ej., en la ecuación 4 (que se presentará más adelante). Por lo tanto, para tener en cuenta las variaciones de intensidad, en la relación  $A_p/E_{0p1}$  se puede usar el área efectiva en lugar de  $A_p$ .

35   El eje central del primer camino óptico 160 puede desplazarse con respecto al eje central del segundo camino óptico 800 en 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,  $d < \min(r_1, r_2)$ . Los caminos ópticos 160, 800 se consideran esencialmente co-céntricos si la distancia entre los ejes centrales de los caminos ópticos 160, 800 es menos que el 25% de la menor de las siguientes: dimensión más pequeña del haz de luz 170 y dimensión más pequeña de la luz pulso 710. Por ej., los caminos ópticos 160, 800 se consideran esencialmente co-céntricos si la distancia entre los ejes centrales de los caminos ópticos 160, 800 es menor que  $0,25 \times \min(2r_1, 2r_2)$ . La distancia entre los caminos ópticos 160, 800 se puede considerar que es la distancia mínima entre los ejes centrales de los caminos ópticos 160, 800. Los caminos ópticos co-céntricos son esencialmente co-céntricos. Los caminos ópticos 160, 800 pueden ser esencialmente co-céntricos si son esencialmente paralelos.

45   En caso de que los ejes centrales de los caminos ópticos se desplacen uno respecto al otro, o en el caso en el que exista un ángulo entre los ejes centrales de los caminos ópticos, puede ser posible omitir el segundo elemento óptico 742 del dispositivo. En este caso, puede ser posible ubicar el primer fotodetector 320 de manera que el pulso de luz

atenuado 715 puentee el primer fotodetector 320, y el haz de luz atenuado 175 llegue al primer fotodetector 320.

En caso de que los ejes centrales de los caminos ópticos co-céntricos se desplacen uno con respecto al otro, al menos parte del pulso de luz 710 se guía al segundo camino óptico 800. Sin embargo, ya que el primer camino óptico 160 (el del haz de luz) y el segundo camino óptico (el del pulso de luz) se superponen al menos parcialmente, al menos parte de los fotones del pulso de luz es guiada así al primer camino óptico 160.

La fuente 700 de pulsos de luz puede ser, p. ej., una de:

- Un pulso láser,
- Una fuente de destellos de xenón,
- Un láser continuo con un cortador,
- Un láser continuo que se hace funcionar en modo de pulsos,
- Un diodo emisor de luz (LED) que se hace funcionar en modo de pulsos,
- Un LED continuo con un cortador,
- Una fuente de luz continua que se hace funcionar en modo de pulsos, y
- Una fuente de luz continua con un cortador.

Algunas fuentes de luz pueden se hacen funcionar en un modo de pulsos usando la corriente impulsora en el modo de pulsos. Un cortador puede comprender, p. ej., un disco opaco giratorio, disco que comprende una rendija dispuesta para que la luz pase a través de la rendija. Cuando la luz se dirige hacia el disco se genera un pulso de luz cuando la luz pasa por la rendija del disco, que de otro modo sería opaco.

Cuando se mide el perfil del contenido del compuesto gaseoso, la resolución espacial depende de la duración del pulso de luz. Por lo tanto, la duración se selecciona de acuerdo con los requisitos de resolución como se trató anteriormente.

Preferiblemente, la duración es como mucho 10 ns e incluso más preferiblemente como máximo 1 ns. La fuente de luz se puede seleccionar de acuerdo con los requisitos de duración. P. ej., un láser de pulsos 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 bloqueados en modo, y pueden emitir series de pulsos en lugar de pulsos de luz individuales. Un destello de xenón puede tener una duración de impulso del orden de 1  $\mu$ s. El tiempo entre pulsos subsiguientes, es decir, el tiempo entre el final de un pulso y el comienzo de un pulso subsiguiente, es preferiblemente significativamente mayor que el tiempo de recuperación de las partes del gas, que puede ser del orden de 2  $\mu$ s. El tiempo entre pulsos subsiguientes puede ser, p. ej., al menos 10 veces el tiempo de recuperación. P. ej., el tiempo podría ser de al menos 20  $\mu$ s.

El tiempo entre pulsos subsiguientes no es necesariamente más que el tiempo de recuperación de las partes de las moléculas gaseosas. En una realización, el tiempo entre pulsos subsiguientes fue 1 s. En otra realización, el tiempo entre pulsos subsiguientes fue de 100 ms. En caso de que se emita un pulso durante el período de recuperación, la intensidad atenuada  $I_{k0}$  también se atenúa ligeramente debido a los átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte en el camino óptico debido al pulso de luz previo.

El primer elemento óptico 740 en la realización de la Fig. 7b y el segundo elemento óptico 742 en la realización de la Fig. 7a están dispuestos para guiar el haz de luz 170 a un primer camino óptico 160 y el pulso de luz 710 a un segundo camino óptico 800 de modo que el segundo camino óptico 800 se solape con el primer camino óptico 160. El elemento óptico (740, 742) puede ser, por ej., un reflector selectivo a la longitud de onda que funciona 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 las Figs. 7a y 7b. En una configuración diferente, el elemento óptico (740, 742) podría reflejar luz que tenga una longitud de onda larga y dejar pasar luz que tenga una longitud de onda corta. El primer elemento óptico puede seleccionarse entre una variedad de elementos ópticos conocidos. Por ejemplo, un prisma o una rejilla también pueden funcionar como un reflector selectivo a la longitud de onda. Un acoplador de fibras también puede funcionar como el primer elemento óptico.

El segundo elemento óptico 742 en la realización de la Fig. 7b y el primer elemento óptico 740 en la realización de la Fig. 7a están dispuestos para dejar pasar el haz de luz atenuado 175 y para desviar, reflejar o absorber el pulso de luz atenuado 715. El elemento óptico (742, 740) está dispuesto para dejar pasar al fotodetector 320 luz que tenga la longitud de onda  $\lambda_b$ . El elemento óptico (742, 740) también está dispuesto para impedir que el pulso de luz atenuado 715 entre en el fotodetector 320. El elemento óptico (742, 740) puede ser uno cualquiera de los tratados anteriormente (740, 742) que se pueden usar como otro elemento óptico. El elemento óptico (742, 740) también puede ser un filtro dispuesto para absorber luz que tenga la longitud de onda  $\lambda_{p1}$ . En este caso, el dispositivo no comprende el segundo fotodetector 720.

El tercer elemento óptico 744 está dispuesto para reflejar una primera parte de luz conocida (pequeña) que golpea la superficie del tercer elemento óptico 744, y para dejar pasar una segunda parte de la luz. Por lo tanto, midiendo la intensidad (o energía) de la primera parte reflejada del pulso de luz 710 usando el tercer fotodetector 722, se puede calcular la intensidad (o energía) de la segunda parte del pulso de luz 710.

5 Con referencia a las Figs. 7c y 7d, el pulso de luz 710 y/o el haz de luz 170 no son necesariamente monocromáticos y/o coherentes. La Figura 7c muestra una realización de un dispositivo 990 para medir el perfil del contenido de un compuesto gaseoso en una mezcla de gases usando un pulso de luz disociativo 710. El pulso de luz se emite desde la fuente de pulsos de luz 700. El pulso de luz no es ni monocromático ni coherente, y la fuente de pulsos de luz es una fuente puntual. Por lo tanto, el pulso de luz 710 se propaga como una envoltura expansiva de una esfera. Sin embargo, la fuente 700 de pulsos de luz está situada en el lado opuesto del primer camino óptico 160 a la fuente 310 de haces de luz. Por lo tanto, una parte de los fotones del pulso 710 de luz viajan a lo largo del primer camino óptico 160 en una segunda dirección, en donde la segunda dirección es opuesta a la dirección de los fotones del haz de luz 170.

15 La Figura 7d muestra una realización de un dispositivo 990 para medir el perfil del contenido de un compuesto gaseoso en una mezcla de gases usando un pulso de luz disociativo 710. El pulso de luz se emite desde la fuente de pulsos de luz 700. El pulso de luz es esencialmente monocromático y esencialmente coherente. Sin embargo, el haz de luz 170 se emite desde una fuente puntual 700. Una parte del haz de luz 170 es guiada al primer camino óptico 160 de manera que estos fotones viajan en la primera dirección. Como se muestra en la figura, una parte de los fotones del pulso de luz 710 se desplaza a lo largo del primer camino óptico 160 en una segunda dirección, en donde la segunda dirección es opuesta a la dirección de los fotones del haz de luz 170. Uno podría naturalmente también definir un segundo camino óptico 800 de manera que una parte del pulso de luz 710 se desplace a lo largo del segundo camino óptico 800, y una parte del haz de luz 170 sea guiado hacia el segundo camino óptico 800.

25 Si la fuente de pulsos de luz 700 no está dispuesta para emitir un pulso de luz coherente 710, la intensidad del pulso de luz 710 puede disminuir debido - entre otras cosas - a la distancia a medida que el pulso de luz 710 se propaga a lo largo del primer camino óptico 160. Por ejemplo, si el pulso de luz 710 se propaga como una envoltura expansiva de una esfera, la intensidad del pulso de luz 710 disminuye como  $1/r^2$ , donde  $r$  es la distancia recorrida por el pulso de luz 710. Esto debe tenerse en cuenta en los cálculos. Preferiblemente, el pulso de luz 710 es coherente, como se describe, p. ej., en la Fig. 7a.

30 Con referencia a la Fig. 7e, el pulso de luz 710 y/o el haz de luz 170 pueden estar dispuestos para viajar en el mismo camino óptico parcialmente en la misma dirección. En la Fig. 7e, una primera parte 160a del primer camino óptico se extiende desde una primera pared 102a a una segunda pared 102b. Una segunda parte 160b del se extiende desde la segunda pared 102b hasta la primera pared 102a. El haz de luz 170 se desplaza a lo largo del (160, 160b). El haz de luz 170 se refleja mediante un reflector 145. El reflector puede ser una parte de la segunda pared 102b, o puede insertarse en la segunda pared 102b. En la figura, la punta de flecha doble indica la dirección del haz de luz no reflejado y del pulso de luz, mientras que una punta de flecha triple indica la dirección del haz de luz reflejado y del pulso de luz. Las paredes 102a, 102b limitan el espacio 110. El pulso de luz 170 es guiado a un segundo camino óptico (800a, 800b). En particular, una parte del pulso de luz 710 es guiada, usando los elementos ópticos 744, 740 y 742, a una primera parte 800a de un segundo camino óptico que se extiende desde la primera pared 102a a la segunda pared 102b. Una segunda parte 800b del segundo camino óptico se extiende desde la segunda pared 102b hasta la primera pared 102a. Las partes del primer camino óptico 160a y 160b son esencialmente paralelas y co-céntricas. Las partes del segundo camino óptico 800a y 800b son esencialmente paralelas y co-céntricas. Las primeras partes 160a y 800a de los caminos ópticos son esencialmente paralelas y co-céntricas. Para mayor claridad, las diferentes partes se indican con flechas separadas, incluso si los caminos son co-céntricos.

45 Cuando el pulso de luz 710 entra en el espacio 110, comienza a transformar el compuesto gaseoso 510 en átomos, moléculas, iones o radicales por disociación, ionización o excitación. En el espacio 110, el impulso de luz se propaga primero a lo largo de la primera parte 800a del segundo camino óptico, en una segunda dirección. Al mismo tiempo, algunos fotones del haz de luz 170 se desplazan a lo largo de la segunda parte 160b del primer camino óptico en una primera dirección, en donde la primera dirección es inversa a la segunda dirección. En la Fig. 7d, solo una parte de los fotones del haz de luz 170 se desplaza en la primera dirección, y al menos parte de los fotones del pulso de luz 710 viajan en la segunda dirección. Por el contrario, en la Fig. 7a todos o sustancialmente todos los fotones del haz de luz 170 viajan en una primera dirección, y al menos parte de los fotones del pulso de luz viajan en una segunda dirección, en donde la segunda dirección es inversa a la primera dirección.

50 Como el pulso de luz 710 o el haz de luz 170 no son necesariamente monocromáticos, y todos los componentes mostrados en las Figs. 7a - 7e no son necesarios para llevar a cabo el método, un dispositivo 990 para medir el perfil del contenido de un compuesto gaseoso en una mezcla de gases comprende:

- Una fuente de haces de luz 310, dispuesta para emitir un haz de luz 170 que comprenda fotones que tienen una longitud de onda de haz  $\lambda_b$ ,
- Un fotodetector 320, dispuesto para detectar la intensidad de un haz de luz atenuado 175, y

- Medios para guiar al menos parte del haz de luz 170 a un primer camino óptico 160 de manera que al menos parte de los fotones del haz de luz 170 se desplacen en una primera dirección, en donde
    - o El primer camino óptico 160 está situado ópticamente entre el fotodetector 320 y la fuente de haces de luz 310,
  - 5      o El primer camino óptico 160 pasa a través de un espacio 110 dispuesto para contener la mezcla de gases, y
  - o El haz de luz 170 está dispuesto para ser atenuado al haz de luz atenuado 175 dentro del espacio 110,
- y el dispositivo además comprende:
- Una fuente de pulsos de luz 700, donde la fuente de pulsos 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 transforman (disocian, ionizan) al menos parte de (i) los átomos, moléculas, iones o radicales del compuesto gaseoso 510, o (ii) los átomos, moléculas, iones, o radicales del compuesto gaseoso 510b preexcitados, o (iii) las partes transformadas 530, 534, o (iv) las partes transformadas 530, 534 preexcitadas en el primer camino óptico 160 en una primera parte 520 y opcionalmente en otra parte (525, 532, 536; Figs. 2, 2a, 2b, 2c, 8a, 10) y
  - 10      -
  - 15      - Un elemento óptico dispuesto para guiar al menos parte del último pulso de luz 710, 710a u otro pulso de luz 710b, 710c al primer camino óptico 160, de manera que los fotones 515, 515b del último pulso de luz 710, 710a o los fotones del otro pulso de luz 710b, 710c se desplacen en una segunda dirección, en donde la segunda dirección es inversa a la primera dirección, y
  - 20      -
  - El fotodetector 320 está dispuesto para detectar un primer perfil  $I_k(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en función del tiempo.

La expresión "ópticamente entre" se tratará más adelante. La expresión "otro pulso de luz 710b, 710c" se discutirá más adelante. Las expresiones "parte transformada", "partes transformadas preexcitadas" y "otra parte" se tratarán más adelante. En caso de que se use una fuente 310 no coherente de haces de luz, el haz de luz 170 puede comprender sólo una parte de la luz emitida por la fuente de haces de luz. En caso de que se use una fuente 310 coherente de haces de luz, se puede usar toda o esencialmente toda la luz emitida desde la fuente de haces de luz como el haz de luz 170. En caso de que se mida el contenido de oxígeno sin medir el perfil del contenido de gas, el dispositivo no comprende necesariamente medios para guiar el haz 170 y el pulso 710 en direcciones opuestas.

El perfil del contenido de gas se puede calcular en una unidad de procesamiento de datos 910 que recibe el primer perfil  $I_k(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en el fotodetector 320 en función del tiempo. El contenido de oxígeno de la mezcla de gases puede calcularse en una unidad de procesamiento de datos 910 que recibe el primer perfil  $I_k(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en el fotodetector 320 en función del tiempo.

La unidad de procesamiento de datos 910 puede estar comprendida en el dispositivo 990 para medir el perfil del contenido de gas. La unidad de procesamiento de datos 910 puede estar comprendida en el dispositivo 990 para medir el contenido de oxígeno de la mezcla de gases. En el caso de que la unidad de procesamiento de datos se encuentre muy alejada del fotodetector 320, el dispositivo 990 puede tener un tamaño relativamente grande.

Incluso si no se muestra en las figuras 7a y 7b, como se trató en relación con el método, el dispositivo puede comprender una fuente de haces 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 del 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.

El dispositivo 990 puede comprender un fotodetector 320 que está dispuesto para medir los perfiles de intensidad del haz de luz atenuado, o atenuado adicionalmente, a dos longitudes de onda diferentes. Estas longitudes de onda pueden corresponder a la primera longitud de onda del haz  $\lambda_{b1}$  y a la segunda longitud de onda del haz  $\lambda_{b2}$ . El primer perfil  $I_k(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en función del tiempo puede detectarse a la primera longitud de onda de haz  $\lambda_{b1}$ . Un segundo perfil  $I_k^2(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en función del tiempo puede detectarse a la segunda longitud de onda del haz  $\lambda_{b2}$ . El segundo perfil  $I_k^2(t)$  puede usarse para determinar el perfil del contenido del segundo compuesto gaseoso en la mezcla de gases en el primer camino óptico 160 como se trató para el primer compuesto gaseoso y el primer perfil  $I_k(t)$ .

El dispositivo 990 puede comprender dos fotodetectores, en el que el primero de estos dos fotodetectores está dispuesto para medir la intensidad del haz de luz atenuado, o atenuado adicionalmente, a la primera longitud de onda del haz  $\lambda_{b1}$ , y el segundo de estos dos fotodetectores está dispuesto para medir la intensidad del haz de luz atenuado, o atenuado adicionalmente, a la segunda longitud de onda del haz  $\lambda_{b2}$ . El primer perfil  $I_k(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en función del tiempo puede detectarse a la primera longitud de onda de haz  $\lambda_{b1}$  con el primer fotodetector. Un segundo perfil  $I_k^2(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en

función del tiempo puede detectarse a la segunda longitud de onda de haz  $\lambda_{b2}$  con el segundo fotodetector. El segundo perfil  $I_k^2(t)$  puede usarse para determinar el perfil del contenido del segundo compuesto gaseoso en la mezcla de gases en el primer camino óptico 160 como se trató para el primer compuesto gaseoso y el primer perfil  $I_k(t)$ .

- 5 Incluso si no se muestra en las Figuras 7a y 7b, el dispositivo puede comprender otra fuente de haces de luz dispuesta para emitir luz que comprenda fotones que tengan una segunda longitud de onda de haz  $\lambda_{b2}$ . La longitud de onda del haz  $\lambda_b$  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 se trataron en relación con el método.
- 10 El dispositivo 990 puede comprender:
- Un fotodetector 320 que está dispuesto para medir la intensidad del primer y segundo haces de luz atenuados, o atenuados adicionalmente, o
  - De ambos
    - o Un primer fotodetector 320 que está dispuesto para detectar un primer perfil  $I_k(t)$  indicativo de la intensidad del primer haz de luz atenuado 175 en función del tiempo y
    - o Un segundo fotodetector que está dispuesto para detectar un segundo perfil  $I_k^2(t)$  indicativo de la intensidad del segundo haz de luz atenuado en función del tiempo.

Por lo tanto, los perfiles de intensidad primero y segundo  $I_k(t)$  e  $I_k^2(t)$  se pueden detectar usando uno o dos fotodetectores, como se trató anteriormente. El primer perfil  $I_k(t)$  puede detectarse en la primera longitud de onda del haz  $\lambda_{b1}$ . El segundo perfil  $I_k^2(t)$  puede detectarse en la segunda longitud de onda del haz  $\lambda_{b2}$ .

- 20 El dispositivo 990 puede comprender adicionalmente otra fuente de pulsos de luz u otros medios para formar otro pulso de luz. La otra fuente de pulsos de luz puede estar dispuesta para emitir el otro pulso de luz que comprende fotones que tienen la otra longitud de onda de pulso  $\lambda_{p1,1}$ . El otro pulso puede usarse para disociar una molécula de un segundo compuesto gaseoso, como se analiza en el contexto del método.
- 25 El otro pulso de luz puede estar dispuesto para propagarse en una dirección opuesta a la dirección del haz de luz. Por lo tanto, también se puede medir el perfil del contenido de un segundo compuesto gaseoso.

Además, si para disociar la molécula de gas (Fig. 2b) se usa excitación de dos fotones o de múltiples fotones, 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:

- 30 - Preexcitar al átomo, molécula, ion o radical del compuesto gaseoso 510 a un átomo, molécula, ion o radical pre-excitado de compuesto gaseoso, o
- Preexcitar una parte transformada (530, 534, Figs. 8a y 10) a una parte transformada preexcitada.

Los medios para formar otro pulso de luz pueden comprender un divisor de pulsos de luz y un retardador de pulsos de luz. Los medios para formar otro pulso de luz pueden comprender una fuente de pulsos de luz. Como la fuente de pulsos de luz para excitar las moléculas de gas o las partes excitadas se puede usar una fuente de pulsos de luz, como se trató en relación con la primera fuente de pulso de luz.

#### **Contenido y perfil de gas, disociación, ionización o excitación en un solo paso**

40 El cálculo del contenido del compuesto gaseoso se tratará con referencia a la Fig. 6. El perfil de intensidad  $I_k(t)$  de la Fig. 6 se puede obtener, p. ej., del dispositivo de la Fig. 7b. Sin embargo, los principios son aplicables también para el perfil de intensidad de la Fig. 5b, obtenible a partir de un dispositivo de la Fig. 5a, 7a o 7e. El cálculo de perfil se muestra sólo para el caso de disociación, en donde el compuesto gaseoso es una molécula de gas. Al usar los mismos principios, es evidente cómo calcular el contenido de gas y el perfil del contenido de gas para la ionización o la excitación.

En lo siguiente,

- 45 - Se supone que el pulso de luz 710 es monocromático o esencialmente monocromático,
- Se supone que la molécula del compuesto gaseoso 510 se excita al estado disociativo 512 con un solo fotón 515 (Fig. 2a),
- Se supone que el haz de luz 170 es monocromático o esencialmente monocromático,
- Se supone que el haz de luz 170 y el pulso de luz 710 viajan a lo largo del mismo (primer) camino óptico,

- La cantidad  $I_{k,\min}$  representa un mínimo local, un mínimo local calculado o un mínimo local extrapolado de la intensidad del haz de luz atenuado adicionalmente 175, y
- La cantidad  $I_{k0}$  representa una intensidad de referencia del haz de luz atenuado adicionalmente 175.

5 El mínimo local  $I_{k,\min}$  se puede calcular a partir del primer perfil  $I_k(t)$  como se trató anteriormente o utilizando medios conocidos. La intensidad de referencia  $I_{k0}$  puede calcularse a partir del primer perfil  $I_k(t)$  como se trató anteriormente o utilizando medios conocidos. A partir de las intensidades atenuadas  $I_{k0}$  e  $I_{k,\min}$ , el cálculo del contenido del compuesto gaseoso en la mezcla de gases se puede hacer de la siguiente manera:

La intensidad del haz de luz 170 disminuye en el espacio 110 por al menos uno de:

- 10 (i) Absorción debida a los 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 como la dispersión o absorción por otros compuestos o partículas, y
- (iii) Absorción debida a otros átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte producidos por otros procesos de disociación de las moléculas de gas, p. ej., producidos por disociación térmica.

15 Por lo tanto, para la intensidad medida antes de la disociación de moléculas gaseosas, se puede escribir  $I_{k0} = \varphi I_0$ , 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 entrar en el espacio 110, y  $\varphi$  es un factor de atenuación. El factor de atenuación  $\varphi$  tiene 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 por átomos o moléculas disociadas de la primera parte, es decir, el proceso (i) anterior. Por lo tanto, para la intensidad después de la disociación, se puede escribir:

20 
$$(1) I_{k,\min} = \varphi \exp\left(-\xi_M \frac{N}{V} \sigma_M L\right) I_0 = I_{k0} \exp\left(-\xi_M \frac{N}{V} \sigma_M L\right)$$

25 donde  $I_{k,\min}$  es la intensidad mínima local del haz de luz atenuado 175 después de la disociación de las moléculas gaseosas por el pulso de luz 710,  $I_{k0}$  es la intensidad antes o después de la disociación,  $\xi_M$  es el contenido de la primera parte 520 (medido en proporción, por ej., en ppm o ppb; el subíndice M representa un metal, la molécula gaseosa 510 puede ser, por ej., un hidróxido de un 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 520 para el haz de luz que tiene una longitud de onda  $\lambda_b$ . Como ejemplo, la sección transversal de absorción  $\sigma_M$  para potasio a la longitud de onda de 766,515 nm es  $1,47 \times 10^{-12} \text{ cm}^2$ . Para el sodio, a la longitud de onda de 589 nm, la sección transversal de absorción  $\sigma_M$  es  $1,95 \times 10^{-12} \text{ cm}^2$ .

30 El volumen V se refiere al volumen en el primer camino óptico 160 donde tiene lugar la disociación, y N se refiere al número total de átomos y moléculas dentro de este volumen. L es la distancia, en la que tiene lugar la absorción de la luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_b$  en los átomos o moléculas de la primera parte. P. ej., si el haz de luz 170 y el pulso de luz tienen la misma sección transversal, son co-céntricos y son paralelos, el volumen V es esencialmente el área de la sección transversal de la luz o del pulso multiplicada por la distancia L.

35 La primera parte 520 (átomo, molécula, ion o radical) está presente en 160 debido al proceso de disociación. Cada proceso de disociación utiliza la energía de un cuanto fotónico del pulso de luz 710. La energía de un fotón del pulso de luz monocromática 710 es  $hc/\lambda_{p1}$ . Por lo tanto, el número de átomos de metal disociados se puede escribir como:

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

40 donde  $N_M$  es el número de átomos metálicos,  $E_{0p1}$  es la energía del pulso de luz 710 que entra en el espacio 110 (o la energía de la segunda parte del pulso de luz 710, si se usa el tercer elemento óptico 744), y  $E_{p1}$  es la energía del pulso de luz atenuado 715 que sale del espacio 110. Se supone que la disminución del pulso de energía  $E_{p01}-E_p$  se usa totalmente para disociar las moléculas gaseosas. Aplicando la ley Beer-Lambert para el pulso de luz 710:

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

45 donde  $\xi_G$  es el contenido de interés del compuesto gaseoso (medido en proporción, por ej., en ppm o ppb) 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 de 300 K, la sección transversal de absorción  $\sigma_G$  para la longitud de onda del pulso de 310 nm puede ser aproximadamente  $(1-10) \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ . Como otro ejemplo, la sección transversal de absorción para el cloruro de potasio para la longitud de onda del pulso de 266 nm es de aproximadamente  $10^{-21} \text{ m}^2$  (que es igual a  $10^{-17} \text{ cm}^2$  que se muestra en la Fig. 3a).

Sin embargo, la temperatura afecta la sección transversal de absorción y, por lo tanto, este valor podría 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 inferior a 2000°C. Por otro lado, el compuesto gaseoso debe estar en forma gaseosa para la aplicabilidad del método. El método se usa preferiblemente para la mezcla de gases que se origina a partir de un proceso térmico. Por lo tanto, el método puede ser aplicable, p. ej., para una mezcla de gases que tiene una temperatura de hasta 2000°C, y el método se usa preferiblemente para una mezcla de gases que tiene una temperatura en el intervalo de 300°C a 2000°C. A una temperatura más alta se debe tener en cuenta la dependencia de los parámetros con la temperatura.

Mediante el uso de ecuaciones (2) y (3) se puede calcular el número de moléculas de gas disociadas. La ecuación (3) describe qué cantidad de energía del pulso de luz se usa para disociar las moléculas de gas y ecuación (2) describe cómo esta energía se relaciona con el número de moléculas disociadas. El número de primeras partes 520 inducidas por disociación puede ser relativamente bajo. El número depende, por ej., de la energía del pulso de luz y también del contenido de moléculas gaseosas. Como ejemplo, 1/10000 - 1/1000 de las moléculas gaseosas 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 usando la ley de los gases ideales:  $pV=NkT$ , donde  $p$  es la presión,  $T$  es la temperatura y  $k$  es la constante de Boltzmann.

Usando estas ecuaciones, se puede derivar una ecuación para el contenido de gas:

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

en donde  $A_p$  es el área en sección transversal del pulso de luz 710. Como se trató anteriormente, cuando el perfil de intensidad no es uniforme, se puede usar un área efectiva  $A_{p,\text{eff}}$  en lugar de  $A_p$ . Por lo tanto, para un pulso de luz coherente,  $A_p L$  es el volumen  $V$ , en el que las moléculas de gas están disociadas. Un ejemplo de la distancia  $L$ , en la que tiene lugar la absorción de luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_p$  en los componentes de la primera parte, se representa en la Fig. 5a.

La ecuación 4 supone, p. ej., que el pulso de luz 710 es atenuado sólo debido a la absorción del compuesto gaseoso 510. En la práctica, también puede tener lugar otra absorción o dispersión. Sin embargo, una ecuación que tome estos procesos en cuenta es derivable.

A partir de la ecuación (4) puede verse que la sensibilidad del método depende, p. ej., de la energía del pulso de luz  $E_{0p1}$ , el área del pulso de luz  $A_p$  y la distancia  $L$ . El aumento de la energía del pulso, el aumento de la distancia  $L$  o la disminución del área del pulso aumentan la sensibilidad. En principio, no hay límite para la distancia  $L$ . Sin embargo, en algunas realizaciones, la distancia  $L$  puede variar de 1 cm a 50 m.

En las ecuaciones (2) y (3) anteriores, se supuso 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 pueden ocurrir la dispersión y la absorción en otras moléculas. La precisión del método puede mejorarse midiendo la energía del pulso  $E_{0p1}$  antes de la disociación con el tercer fotodetector 722 y la energía de pulso  $E_p$  después de la disociación con el segundo fotodetector 720 (Figs. 5a, 7a, 7b y 7e). La diferencia entre estas energías se puede comparar con la estimación teórica de la ecuación (3). En caso de que las desviaciones de la ecuación (3) sean grandes, ambas energías se pueden usar para deducir un valor para el contenido  $\xi_G$ .

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

El cálculo del perfil de contenido del compuesto gaseoso se tratará con referencia a la Fig. 5b. El perfil de intensidad  $I_k(t)$  de la Fig. 5b se puede obtener, p. ej., con un dispositivo de la Fig. 5a, 7a o 7e. En este caso, los fotones del haz 170 y los fotones del pulso 710 viajan en direcciones opuestas (es decir, inversas). El pulso 710 entra en el espacio 110 desde un primer lado (por ej., un orificio en la primera pared 102a). Por lo tanto, estos fotones del pulso están situados en un primer límite del espacio 110. Además, algunos fotones del haz de luz 170 también están situados en el mismo límite del espacio 110. Para el análisis a continuación, el tiempo (en el fotodetector) 320 se establece en cero ( $t=0$ ) cuando estos fotones del haz de luz 170 entran en el fotodetector 320.

En el momento  $t=0$  se puede escribir  $I_k(0) = \phi I_0$ , donde  $\phi$  es el factor de atenuación como se definió anteriormente (véase la Ec. 1). Cuando el tiempo avanza, el impulso 710 también avanza en el espacio 110, por lo que la

intensidad en el fotodetector 320 comienza a disminuir. Para la disminución, se puede escribir usando la ley de Beer-Lambert (véase la ecuación 1):

$$(5) \quad I_k(t + \Delta t) = \exp[-\xi_M(ct/2) \frac{N}{V} \sigma_M \frac{c\Delta t}{2}] I_k(t),$$

$$I_k(0) = \phi I_0$$

5 donde  $I_k(t)$  es la intensidad en el fotodetector en el tiempo  $t$ ,  $\xi_M(ct/2)$  es el contenido de la primera parte 520 (por ej., un átomo de metal) a la distancia de  $ct/2$  desde el primer límite del espacio 110.  $c\Delta t/2$  es la longitud experimentada en el fotodetector 320 y recorrida por el impulso 710 en el incremento de tiempo  $\Delta t$ . El factor  $1/2$  se debe a las direcciones opuestas del haz 170 y el pulso 710. Es decir, durante el incremento de tiempo  $\Delta t$ , (primero) el pulso recorre una distancia  $c\Delta t/2$  en una segunda dirección disociando así las moléculas de gas 510, y (segundo) el haz recorre la misma distancia en una primera dirección opuesta. Esta es también la razón por la cual la ubicación del contenido  $\xi_M$  se da como  $ct/2$ , no como  $ct$ .

Obsérvese que como  $I_k(t)$  representa la señal en el fotodetector 320, la intensidad en  $t=0$  es la intensidad del haz que ha sido atenuado por los procesos (ii) y (iii) (véase el análisis anterior a la ecuación 1), pero no por (i) absorción debida a los átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte producidos en la disociación de moléculas gaseosas utilizando el pulso de luz 710. Por lo tanto, la reducción de intensidad del haz de luz debido a otros procesos se tiene inherentemente cuenta en esta ecuación.

15 De este modo, la derivada (numérica) respecto al tiempo para la señal se puede escribir como:

$$(6) \quad \frac{I_k(t + \Delta t) - I_k(t)}{\Delta t} = \frac{I_k(t)}{\Delta t} \{ \exp[-\xi_M(ct/2) \frac{N}{V} \sigma_M \frac{c\Delta t}{2}] - 1 \}$$

Usando la Ec. 6 y el primer perfil  $I_k(t)$ , puede calcularse el contenido de la primera parte a la distancia de  $ct/2$  desde el límite del espacio 110 para todos los valores disponibles de  $t$ . Por lo tanto, se puede calcular el perfil  $\xi_M(x)$  del contenido de la primera parte 520.

20 El perfil  $\xi_M(x)$  del contenido de la primera parte está relacionado con el perfil del contenido del compuesto gaseoso, en principio de una manera similar, como se describió en las Ecs. 2 y 3. Más específicamente, el pulso de luz disocia las moléculas gaseosas como:

$$(7) \quad N_M = \xi_M(x)N = \frac{\frac{E_{p1}(x) - E_{p1}(x + \Delta x)}{E_{p1}(x)} E_{p1}(x)}{hc / \lambda_{p1}},$$

25 donde  $E_{p1}(x + \Delta x)$  es la energía del pulso que ha recorrido una distancia  $x + \Delta x$ , y  $E_{p1}(x)$  es la energía del pulso que ha recorrido la distancia  $x$ . En caso de que el pulso sea coherente, por lo que la energía (y la intensidad) disminuye principalmente debido a la absorción en moléculas gaseosas, se puede escribir (véase la Ec. 2):

$$\xi_G(x)N = \frac{E_{p1}(x) - E_{p1}(x + \Delta x)}{hc / \lambda_{p1}} = \frac{E_{p1}(x) - E_{p1}(x + \Delta x)}{E_{p1}(x)} \frac{E_{p1}(x)}{hc / \lambda_{p1}} =$$

$$[1 - \exp(-\xi_G(x) \frac{N}{V} \sigma_G \Delta x)] \frac{E_{p1}(x)}{hc / \lambda_{p1}}, \text{ donde}$$

$$(8) \quad E_{p1}(x + \Delta x) = E_{p1}(x) \exp(-\xi_G(x) \frac{N}{V} \sigma_G \Delta x), \text{ porque}$$

$$I_{p1}(x + \Delta x) = I_{p1}(x) \exp(-\xi_G(x) \frac{N}{V} \sigma_G \Delta x)$$

30 donde  $\xi_G(x)$  es el contenido de compuesto gaseoso de interés. La intensidad del pulso de luz,  $I_{p1}(x)$  es proporcional a la energía del pulso, y la disminución de la intensidad del pulso de luz se ha descrito utilizando la ley de Beer-Lambert (véase la Ec.3). El perfil  $\xi_G(ct/2)$ , en función del tiempo a partir de la instancia, cuando el pulso 710 entra en el espacio 110, se indicó anteriormente. El perfil  $\xi_G(x)$  es el mismo perfil, en función de la ubicación  $x=ct/2$ .

Como se ha visto a partir de la Ecuación 8, debe conocerse la energía del pulso  $E_{p1}(x)$  en función de la ubicación  $x$ . Para fines de cálculo, se puede suponer que la energía del pulso en función de la ubicación en el primer camino

óptico,  $E_{p1}(x)$ , decaerá exponencialmente. Por otra parte, el perfil se puede suponer conocido, p. ej., que decae exponencialmente, si se conocen o se miden los siguientes:

- La longitud  $L$  del camino óptica,
- La energía inicial  $E_{op1}$  del pulso de luz 170, es decir,  $E_{p1}(0)$ , y
- 5 - La energía final del pulso de luz atenuado 175,  $E_{p1}(x)$ , en donde  $x \geq L$ .

Aún más, cuando se ha calculado un perfil  $\xi_G(x)$  para el contenido de gas, la no uniformidad puede tenerse en cuenta para calcular el perfil de energía de pulso  $E_{p1}(x)$ . En este caso, la atenuación del pulso de luz debido al perfil no uniforme del contenido de gas se puede usar para calcular la atenuación local debida al compuesto gaseoso. Además, el contenido de gas total puede usarse para calcular la atenuación debida al compuesto gaseoso. Aún más, a partir de las mediciones de la energía de pulso inicial y de la energía final del pulso atenuado, se puede determinar la atenuación debida a otros factores. De esta forma, el cálculo del perfil del contenido de gas puede realizarse de forma iterativa.

En caso de que se utilice un pulso no coherente, se debe tener en cuenta la disminución de la intensidad del pulso, y también el hecho de que la disminución de la intensidad no se relaciona únicamente con la disociación de las moléculas gaseosas 510, sino también con la extensión del pulso. Se encuentra un problema similar en entornos de dispersión (por ejemplo, calderas), cuando se usa un pulso 710 de láser estrecho. En estos casos, la dispersión amplía el pulso reduciendo de este modo la intensidad. Para una dispersión relativamente baja incluso en una caldera, se puede usar un diámetro de pulso de al menos 25 mm.

#### Principio de medición, disociación, ionización y/o excitación en dos etapas

También se ha notado que no todas las moléculas gaseosas pueden disociarse con un pulso de luz en la primera parte y en la segunda parte de manera que la primera parte (o la segunda parte) tenga al menos un pico claro en su sección transversal de absorción tal que estaría disponible una fuente del haz de luz para esa longitud de onda. Por ejemplo, algunos dihaluros metálicos del tipo  $M^2H^a_2$ , en los que el metal  $M^2$  es un átomo de metal (por ej., 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 usando un fotón. Por ejemplo, el dicloruro de plomo,  $PbCl_2$  es de este tipo. El dicloruro de plomo podría disociarse en un átomo de plomo y en otro compuesto u otros compuestos usando un pulso de luz que tenga una longitud de onda muy corta. Por ejemplo, para el cloruro de plomo, la longitud de onda podría estar en el intervalo de 150 nm a 200 nm. Sin embargo, las fuentes de luz que emiten tales pulsos de alta energía son relativamente caras. Por otra parte, la luz que tiene una longitud de onda tan corta es absorbida por otros gases, tales como el oxígeno, y por lo tanto no puede propagarse a grandes distancias. En muchas aplicaciones, es preferible una distancia de medición relativamente larga (es decir, un camino óptico largo). Se observó que el  $PbCl_2$  se puede disociar en una molécula de (mono)cloruro de plomo y en un átomo de cloro. Sin embargo, la molécula de (mono)cloruro de plomo no tiene picos de absorción bien definidos en la longitud de onda visible o cerca del ultravioleta (UV). Tiene bandas de absorción en el régimen de UV. Sin embargo, estas bandas se mezclan fácilmente con bandas de absorción de otros compuestos, p. ej.,  $HgCl_2$ . Por otra parte, 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, p. ej., en el intervalo de  $10^{-6}$  a  $10^{-5}$ . Por lo tanto, la absorción de la mezcla de gases correspondiente a la o las longitudes de onda del haz de luz 170 no puede aumentarse significativamente mediante la disociación de  $PbCl_2$  en  $PbCl$  y  $Cl$ .

Con referencia a la Fig. 8a, se observó 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 etapas. En la primera etapa, el  $PbCl_2$  se disocia en  $PbCl$  y  $Cl$ . En la segunda etapa, el  $PbCl$  se disocia más en  $Pb$  y  $Cl$ . En una realización, se usan dos pulsos de luz disociativos subsiguientes de diferentes longitudes de onda. En otra realización, se usa 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 la primera etapa, y además comprender fotones dispuestos para disociar las moléculas en la segunda etapa. Por otra parte, los fotones para la primera y la segunda etapa pueden tener la misma longitud de onda. Sin embargo, los fotones para la primera y la segunda etapa pueden tener diferentes longitudes de onda. Por ejemplo, un pulso de luz que comprende fotones que tienen la longitud de onda de 266 nm puede disociar el  $PbCl_2$  en  $PbCl$  y  $Cl$ , y además disociar el  $PbCl$  en  $Pb$  y  $Cl$ .

Sin embargo, se prefiere disociar la molécula del compuesto gaseoso 510 en dos etapas controladas. Esto se puede hacer usando un segundo último pulso de luz 710b para la primera disociación (por ej.,  $PbCl_2$  en  $PbCl$  y  $Cl$ ) y un último pulso de luz 710a para la segunda disociación (por ej.,  $PbCl$  en  $Pb$  y  $Cl$ ). En este caso, los fotones para la primera y la segunda etapa preferiblemente tienen diferentes longitudes de onda. De esta forma, el proceso es más controlado, lo que resulta en una calibración más fácil. Por otra parte, el cálculo del contenido del compuesto gaseoso se vuelve más simple.

Después de la primera y la segunda disociación, el átomo de plomo disociado está en un estado excitado. La vida útil del estado de excitación puede ser breve; puede ser solo unos pocos nanosegundos, o puede ser algunos microsegundos. La vida útil depende del estado de los átomos conducidos disociados. Por lo tanto, las mediciones

deben ser cronometradas con precisión. En particular, si la vida útil de la tercera parte 530, en la que el segundo último pulso de luz 710b disocia la molécula de gas 510, es corta, la temporización del último pulso de luz 710a debe hacerse cuidadosamente.

5 En la Fig. 8a, la molécula de dicloruro de plomo se disocia en primer lugar con un segundo último pulso de luz 710b. El segundo último pulso de luz 710b comprende fotones 516 que tienen la longitud de onda  $\lambda_{p2}$ . El segundo último pulso de luz 710b puede comprender además fotones que tienen diferentes longitudes de onda. Preferiblemente, el segundo último pulso de luz 710b es monocromático. La longitud de onda  $\lambda_{p2}$  se selecciona de manera que la molécula de gas 510 (dicloruro de plomo en la Fig. 8a) se excita primero a una molécula 512 en un estado disociativo que además se disocia en la segunda parte 525 (cloro en Fig. 8a) y una tercera parte 530 (monocloruro de plomo en la Fig. 8a). Para el dicloruro de plomo, la longitud de onda  $\lambda_{p2} = 355$  nm se puede usar para el segundo último pulso de luz 710b. Aquí la longitud de onda se da con la precisión de un nm.

10 A continuación, la tercera parte 530 se excita a un estado disociativo 531 con un último pulso de luz 710a. El último impulso de luz 710a 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 710a es monocromático. La longitud de onda  $\lambda_{p1}$  se selecciona de manera que la tercera parte 530 es excitada a un estado disociativo 531 con el último impulso de luz 710a. En la Fig. 8a, donde se excita el monocloruro de plomo, se usó la longitud de onda  $\lambda_{p1} = 266$  nm. A continuación, el estado disociativo 531 se disocia en una cuarta parte 532 (un átomo de cloro) y en la primera parte 520 (un átomo de plomo excitado). La primera parte 520 se detecta usando espectroscopía de absorción y un haz de luz 170, como se trató anteriormente. El haz de luz 170 se atenúa adicionalmente al haz de luz atenuado 175 debido a la absorción en la primera parte 520, que en la Fig. 8a es un átomo de plomo excitado.

15 En la realización de la Fig. 8a, la cuarta parte 532 (Cl) puede estar en un estado excitado o relajado. Esto no afecta mucho las mediciones. Sin embargo, la primera parte 520 (Pb) está en un estado excitado. Como la primera parte 520 se detecta utilizando espectroscopía de absorción, la longitud de onda del haz  $\lambda_b$  debe seleccionarse de manera que la longitud de onda del haz corresponda al perfil de absorción de la primera parte excitada 520, p. ej., un átomo de plomo excitado. En otra realización, la primera parte puede estar en un estado relajado, por lo que la longitud de onda del haz debe corresponder al perfil de absorción de la primera parte 520 relajada. El haz de luz comprende fotones que tienen la longitud de onda del 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 Fig. 8a, se utilizó un haz de luz monocromático con la longitud de onda del haz  $\lambda_b = 406$  nm.

20 Es evidente que, de forma más general, un átomo, molécula, ion o radical del compuesto gaseoso 510 se puede transformar al menos en la primera parte 520 en dos etapas subsiguientes. La primera etapa comprende transformar (disociar, ionizar o excitar) el átomo molécula, ion o radical del compuesto gaseoso 510 en al menos la tercera parte 530 (es decir, una parte transformada) usando el segundo último pulso de luz 710b. La segunda etapa comprende la transformación (disociación, ionización o excitación) de la tercera parte 530 en al menos la primera parte 520.

25 Por otra parte, como se trató en relación con la disociación en una etapa (Fig. 2b), también en este caso el átomo, molécula, ion o radical del compuesto gaseoso 510 se puede preexcitar a un estado preexcitado 510b antes de excitarlo adicionalmente al estado disociativo 512. Además, la tercera parte 530 (es decir, la parte transformada) se puede preexcitar a una parte transformada preexcitada antes de transformar adicionalmente la parte transformada preexcitada en la primera parte. De este modo, el átomo, molécula, ion o radical del compuesto gaseoso 510 se puede transformar usando al menos un fotón. Por otra parte, volviendo a referirse a la Fig. 2b, la tercera parte 530 puede transformarse usando al menos un fotón. Por lo tanto, para preexcitar el compuesto gaseoso 510 o la tercera parte 530 se puede usar una excitación de dos fotones o una de múltiples fotones.

El método puede comprender dos de:

- 45 - Disociar el compuesto gaseoso 510 o el compuesto gaseoso preexcitado 510b en la tercera parte 530 y en una segunda parte 525,
- Disociar la tercera parte 530 o la tercera parte preexcitada en la primera parte 520 y en una cuarta parte 532,
- Ionizar el compuesto gaseoso 510 o el compuesto gaseoso preexcitado 510b en la tercera parte 530, liberando de este modo al menos un electrón,
- 50 - Ionizar la tercera parte 530 o la tercera parte preexcitada en la primera parte 520, liberando de este modo al menos un electrón,
- Excitar el compuesto gaseoso 510 o el compuesto gaseoso preexcitado 510b en la tercera parte 530, y
- Excitar la tercera parte 530 o la tercera parte preexcitada en la primera parte 520.

Además, el método puede comprender al menos uno de:

- Preexcitar del compuesto gaseoso 510 al compuesto gaseoso preexcitado 510b usando un pulso de luz, y
- Preexcitar la tercera parte 530 a la tercera parte preexcitada usando un pulso de luz.

5 En caso de que la tercera parte se obtenga por ionización de la primera parte, la tercera parte es una parte ionizada. Una "parte dividida" puede referirse a una parte disociada o a una parte ionizada. Una "parte transformada" puede referirse a una parte disociada, una parte ionizada o una parte excitada. La parte transformada puede ser, p. ej., la tercera parte 530 obtenida por la transformación del compuesto gaseoso 510. La parte transformada puede ser, p. ej., la quinta parte 534 obtenida por la transformación de la tercera parte 530 (Fig. 10).

10 La Fig. 8b muestra las escalas de tiempo para las mediciones de dicloruro de plomo y las intensidades de los pulsos de luz y del haz. En el instante  $t=t_1$ , se emite el segundo último pulso de luz 710b que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p2}$ . Después de un tiempo  $\Delta t_p$ , se emite el último pulso de luz 710a que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p1}$ . Estos pulsos se muestran en la Fig. 8b como los picos de intensidad para las longitudes de onda correspondientes. Además, se muestra la intensidad del haz de luz atenuado 175 que tiene la longitud de onda  $\lambda_b$ . La intensidad del haz de luz atenuado 175 disminuye poco después del último impulso de luz 170a, porque algunos átomos de plomo excitados (primera parte 520) están presentes en el primer camino óptico 160.

15 La vida útil del estado excitado del átomo de plomo es muy corta. Por lo tanto, la intensidad del haz de luz atenuado se recupera rápidamente después del último pulso de luz. Por lo tanto, en esta realización, el período de recuperación se define en gran medida por la longitud del último pulso de luz 710a. Los átomos de plomo excitados están presentes en el primer camino óptico cuando el último pulso de luz disocia las moléculas de cloro del plomo, y solo unos pocos nanosegundos después del pulso.

20 Para algunos otros gases, el segundo último pulso de luz 710b puede transformar el compuesto gaseoso 510 en la segunda parte 525 y la tercera parte 530, en donde la tercera parte está en un estado excitado. La longitud de onda del último pulso 710a puede seleccionarse para transformar la tercera parte 530 del estado excitado en la primera parte 520. Por otra parte, si la vida útil del estado excitado de la tercera parte 530 es corta, el último pulso 710a tiene que ser sincronizado de modo que el último pulso 710a realmente excite los átomos, moléculas, iones o radicales excitados de la tercera parte. Aún más, si la tercera parte 530 está en un estado excitado, es posible sincronizar el último pulso de modo que la tercera parte 530 tenga tiempo suficiente para relajarse del estado excitado a un estado relajado o a otro estado excitado antes de que la tercera parte 530 sea disociada. 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 sea capaz de transformar la tercera parte 530 en el estado relajado o en el otro estado excitado.

El método comprende:

- Generar una secuencia de pulsos de luz, donde la secuencia de pulsos de luz comprende el último pulso de luz 710a y el segundo último pulso de luz 710b, y
- 35 - Transformar, utilizando la secuencia de pulsos de luz, al menos parte de los átomos, moléculas, iones o radicales del compuesto gaseoso 510 en al menos una primera parte 520.

40 Como se trató anteriormente, la secuencia de pulsos de luz puede comprender un pulso de luz previo a la excitación, dispuesto para preexcitar el compuesto gaseoso 510 o la tercera parte 530 antes de la transformación (disociación, ionización o excitación). Como se tratará a continuación, la secuencia de pulsos de luz puede comprender también otros pulsos de luz. En el caso, en el que el compuesto gaseoso 510 se disocia usando sólo el último pulso de luz 710, la secuencia de pulsos de luz comprende solo el último pulso de luz.

45 Los compuestos gaseosos que pueden medirse usando una disociación en dos etapas incluyen haluros metálicos de la forma  $M^2H^a_2$ , en donde  $M^2$  es un átomo de metal tal como un átomo de Ni o de metal pesado, p. ej., Sn, Cu, Zn, Pb o Hg o un átomo de metal alcalino 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  $PbCl_2$  es de interés en muchos procesos térmicos. Además, algunos trihaluros se pueden disociar primero en un monohaluro. Por ejemplo, algunos trihaluros de Bi, Sb y P pueden disociarse en un monohaluro correspondiente usando un pulso. El monohaluro puede disociarse adicionalmente en un átomo de halógeno y en otro átomo. Estos deben considerarse sólo como gases ejemplo del método.

50 Cuando se usan dos pulsos subsiguientes para disociar las moléculas del compuesto gaseoso 510 y se debe medir el perfil del contenido del compuesto gaseoso, al menos parte de al menos uno de:

- El último pulso de luz 710a y
- El segundo último pulso de luz 710b

está dispuesto para viajar en una segunda dirección, en donde la segunda dirección es inversa a la primera

dirección, donde al menos parte de los fotones del haz de luz 170 están dispuestos para viajar en la primera dirección. Algunos ejemplos de dispositivos se mostrarán a continuación.

5 Al menos parte del segundo último pulso de luz 710b puede guiarse a un tercer camino óptico 810 (Fig. 9a). Al menos parte del último pulso de luz 710a puede guiarse a un segundo camino óptico 800 (Fig. 9a). Al menos parte del haz de luz 170 puede guiarse a un primer camino óptico 160 (Fig. 9a). Preferiblemente, todos los caminos ópticos 160, 800, 810 son paralelos y co-céntricos. Preferiblemente, el haz de luz 170, el último pulso de luz 710a y el segundo último pulso de luz 710b son esencialmente monocromáticos y esencialmente coherentes.

El resultado de la medición, particularmente el primer perfil  $I_k(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en función del tiempo depende de varios factores:

- 10 - La dirección del último pulso de luz 710a con respecto al haz de luz (en sentido inverso o en la misma dirección),
- La dirección del segundo último impulso de luz 710b con respecto al haz de luz (en sentido inverso o en la misma dirección),
- La vida útil de los átomos, moléculas, iones o radicales de la tercera parte 530, y
- 15 - La vida de los átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte 520.

El perfil puede medirse usando al menos un primer perfil  $I_k(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en función del tiempo. Sin embargo, cómo se usa el perfil (perfiles) depende del caso. Algunas posibilidades incluyen:

- 20 - Determinar el perfil del contenido del compuesto gaseoso a partir de un perfil, como se trató anteriormente para el caso de disociación en una sola etapa y larga vida útil.
- Determinar el perfil del contenido del compuesto gaseoso a partir de varios perfiles, donde cada perfil se puede usar para determinar el contenido del compuesto gaseoso en una ubicación específica en el camino óptico.

25 Por ejemplo, en el caso del cloruro de plomo,  $PbCl_2$ , la vida útil de la primera parte 520 es muy corta. En este caso, y posiblemente en otros casos en los que la vida útil de la primera parte 520 es muy corta, una realización preferida del método comprende:

- Generar un haz de luz continuo 170,
- Guiar el haz de luz 170 a un primer camino óptico 160 de manera que al menos una parte de los fotones del haz de luz 170 recorra el primer camino óptico 160 en una primera dirección,
- 30 - Generar un segundo último pulso de luz 710b, donde el segundo último pulso de luz 710b comprende fotones 516 que tienen una segunda longitud de onda de pulso  $\lambda_{p2}$ ,
- Generar un último pulso de luz 710a, donde el último pulso de luz 710a comprende fotones 515 que tienen una primera longitud de onda de pulso  $\lambda_{p1}$ ,
- 35 - Guiar al menos parte del segundo último impulso de luz 710b al primer camino óptico 160, de manera que los fotones 516 del segundo último pulso de luz 710b viajen en la primera dirección, y
- Guiar al menos parte del último pulso de luz 710a al primer camino óptico 160, de manera que los fotones 515 del último pulso de luz 710a viajen en una segunda dirección, en donde
- La segunda dirección es inversa a la primera dirección.

40 El dispositivo correspondiente se muestra en la Fig. 9b. Sin embargo, con el método como tal, el contenido del compuesto gaseoso 510 se mide desde un único punto en el primer camino óptico, donde el punto es el punto en el que se unen el segundo último pulso de luz 710b y el último pulso de luz 710a. El punto de encuentro se puede seleccionar variando la diferencia de tiempo  $\Delta t_{p1}$  entre los pulsos (Fig. 8b). Seleccionando varios puntos de encuentro, se puede medir el perfil del contenido del compuesto gaseoso. Se trataron cuestiones similares en relación con la disociación en una sola etapa y la vida útil corta.

45 En una realización, el método para medir el perfil del contenido de un compuesto gaseoso a partir de una mezcla de gases comprende detectar un primer perfil  $I_k(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en función del tiempo. En esta realización, el haz de luz atenuado 175 se atenúa adicionalmente mediante los átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte de 520 en el primer camino óptico 160. Además, en esta realización, los átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte de 520 son inducidos por la transformación de los

50 productos de transformación de la tercera parte 530. Además, en este caso, los productos de transformación de la

tercera parte 530 son inducidos por la n transformación de las moléculas gaseosas 510 (Fig. 8a). El perfil  $I_k(t)$  o los perfiles  $I_k(t)$  se pueden usar como se trató anteriormente.

5 Como se trató anteriormente para la disociación en una sola etapa, se puede usar un solo haz para medir los perfiles de los contenidos de dos compuestos gaseosos diferentes que comprenden el mismo átomo. P. ej., si la mezcla de gases comprende tanto cloruro de plomo ( $PbCl_2$ ) como bromuro de plomo ( $PbBr_2$ ), se puede usar un haz de luz común para detectar tanto el cloruro como el bromuro. La molécula de cloruro de plomo se disociaría en el átomo de plomo utilizando dos pulsos de luz (el último y el segundo último). Por otra parte, el bromuro de plomo se disociaría en el átomo de plomo usando: (i) otro pulso de luz, (ii) otros dos pulsos, o (iii) otro pulso y uno del último pulso 710a y el segundo último pulso 710b. Por lo tanto, la disminución de la intensidad del haz de luz atenuado después de disociar el cloruro de plomo podría usarse para determinar el contenido de cloruro de plomo y su perfil. Por otra parte, la disminución de la intensidad del haz de luz atenuado después de disociar el bromuro de plomo podría usarse para determinar el contenido de bromuro de plomo y su perfil.

Como se trató anteriormente para la disociación en una única etapa, se pueden usar:

- 15 - dos haces, donde el primer haz comprende fotones correspondientes a una longitud de onda máxima de un primer compuesto gaseoso y el segundo haz comprende fotones correspondientes a una longitud de onda máxima de un segundo compuesto gaseoso o
- un haz, que comprende fotones correspondientes a las longitudes de onda máximas de dos compuestos gaseosos,

20 para medir dos compuestos gaseosos diferentes que comprenden átomos diferentes. P. ej., si la mezcla de gases contiene tanto cloruro de plomo ( $PbCl_2$ ) como cloruro de zinc ( $ZnCl_2$ ), se pueden usar para detectar ambos cloruros dos haces de luz o un haz de luz que comprendan fotones correspondientes a una longitud de onda máxima del zinc y fotones correspondientes a una longitud de onda máxima del plomo. Posiblemente, se puede o pueden usar la misma fuente o fuentes de pulsos de luz para disociar ambos cloruros. La disminución de la intensidad del haz de luz atenuado correspondiente al pico de absorción del zinc podría utilizarse para determinar el contenido de cloruro de zinc y su perfil. La disminución de la intensidad del haz de luz atenuado correspondiente al pico de absorción del plomo podría utilizarse para determinar el contenido de cloruro de plomo y su perfil. Por lo tanto, se puede usar un solo haz que tenga picos correspondientes a dos átomos diferentes para medir el contenido de dos compuestos gaseosos y sus perfiles. De manera similar, se pueden usar dos haces para medir dos compuestos gaseosos y sus perfiles.

### 30 **Dispositivo de medición, disociación, ionización y/o excitación en dos etapas**

Las Figuras 9a a 9e muestran realizaciones de un dispositivo 990 para medir el perfil del contenido de un compuesto gaseoso 510 en una mezcla de gases. El dispositivo 990 está dispuesto para usar el segundo último pulso de luz 710b y el último pulso de luz 710a para disociar la molécula de gas en la primera parte y en las otras partes. El dispositivo 990 está dispuesto para usar un haz de luz 170 para detectar el contenido de la primera parte.

35 En las Figs. 9a a 9e, al menos parte de los fotones del haz de luz 170 se propagan a lo largo de un primer camino óptico 160 en una primera dirección (es decir, hacia abajo en las Figuras 9a a 9e).

En la Fig. 9a, una parte de los fotones 516 del segundo último impulso de luz 710b (véase la Fig. 8a) están dispuestos para viajar en una segunda dirección, en donde la segunda dirección es inversa a la primera dirección. Además, en la Fig. 9a, una parte de los fotones 515 del último pulso de luz 710a (véase la Fig. 8a) están dispuestos para viajar en la segunda dirección.

En la Fig. 9b, una parte de los fotones 516 del segundo último impulso de luz 710b están dispuestos para viajar en una segunda dirección, en donde la segunda dirección es inversa a la primera dirección. Además, en la Fig. 9b, una parte de los fotones 515 del último pulso de luz 710a están dispuestos para viajar en la primera dirección.

45 En la Fig. 9c, una parte de los fotones 516 del segundo último pulso de luz 710b están dispuestos para viajar en la primera dirección. Además, en la Fig. 9b, una parte de los fotones 515 del último pulso de luz 710a están dispuestos para viajar en una segunda dirección, en donde la segunda dirección es inversa a la primera dirección.

En las Figs. 9a a 9c, sólo una parte de los fotones del último pulso 710a es guiada al primer camino óptico 160, ya que otra parte de los fotones es guiada al fotodetector 722a que mide la energía del último pulso 710a. Además, solo una parte de los fotones del segundo último pulso 710b es guiada al primer camino óptico 160, mientras que otra parte de los fotones es guiada al fotodetector 722b midiendo la energía del segundo último pulso 710b.

En la Fig. 9d, la segunda fuente de pulsos de luz 700b está dispuesta para generar un segundo último pulso de luz 710b, donde el segundo último pulso de luz 710b es no coherente y no monocromático. La segunda fuente de pulsos de luz 700b es una fuente puntual. Por lo tanto, el segundo último pulso de luz 710b se propaga como una envoltura expansiva de una esfera. El segundo último pulso de luz 710b comprende fotones que tienen la longitud de onda  $\lambda_{p2}$ . Cuando pasa el primer camino óptico 160, el segundo último pulso de luz 710b transforma los átomos, moléculas,

iones o radicales del compuesto gaseoso 510 en el primer camino óptico. El último pulso de luz 710a está dispuesto para propagarse a lo largo del primer camino óptico 160 después de la segunda última transformación (véanse las Figs. 8a y 8b). Los fotones del último pulso de luz 710a están dispuestos para viajar a lo largo del primer camino óptico en una segunda dirección, en donde la segunda dirección es inversa a la primera dirección. El dispositivo puede ser aplicable en casos en los que las vidas útiles de la tercera parte 530 y de la primera parte 520 (Fig. 8a) son relativamente largas.

En la Fig. 9e, la segunda fuente de pulsos de luz 700b está dispuesta para generar un segundo último pulso de luz 710b, donde el segundo último pulso de luz 710b es esencialmente coherente y esencialmente monocromático. El segundo último pulso de luz 710 es guiado a un tercer camino óptico 810. Sin embargo, el tercer camino óptico 810 no es paralelo ni co-céntrico ni con el primer camino óptico 160 ni con el segundo camino óptico 800. El tercer camino óptico 810 está dispuesto para cruzar el primer camino óptico en un punto, donde el punto está definido por el ángulo  $\alpha$  de la segunda fuente de pulsos de luz 700b, donde el ángulo  $\alpha$  es también el ángulo entre el primer camino óptico 160 y el tercer camino óptico 810. El perfil puede medirse de al menos dos formas:

- (1) Generando un segundo último pulso de luz 710b con ángulo constante  $\alpha$ , y generando subsiguientemente el último pulso de luz 710a. De esta forma, el contenido del compuesto gaseoso se mide a partir del punto en el que se cruzan el tercer camino óptico 810 y el primer camino óptico 160.
- (2) Generando al menos un segundo (relativamente largo) pulso o pulsos luminosos 710b, y variando simultáneamente el ángulo  $\alpha$  de modo que al menos parte de los fotones del al menos un segundo último pulso de luz 710b, en combinación, crucen múltiples puntos del primer camino óptico 160. El número de múltiples puntos puede ser, por ej., al menos cinco, al menos diez o al menos cincuenta. El número puede ser esencialmente infinito usando un segundo largo último pulso 710b y un ángulo  $\alpha$  continuamente variable. Después de la disociación, de este modo, de moléculas del compuesto gaseoso 510 en dichos múltiples puntos del primer camino óptico 160, se puede generar el último pulso de luz 710a. De esta manera, el contenido del compuesto gaseoso se mide a partir de los múltiples puntos del primer camino óptico 160.

Además, el dispositivo de la Fig. 9e puede ser aplicable en casos en los que las vidas útiles de la tercera parte 530 y de la primera parte 520 (Fig. 8a) son relativamente largas.

Se puede disponer una única fuente de pulsos de luz para que emita el último y el segundo pulso de luz, particularmente en el dispositivo de la Fig. 9a.

El dispositivo 990 de las Figs. 9a a 9e comprende:

- Una fuente de haces de luz 310, dispuesta para emitir un haz de luz 170 que tenga la longitud de onda del haz  $\lambda_b$ ,
- Una primera fuente de pulsos de luz 700a, dispuesta para emitir un último pulso de luz 710a que tenga la longitud de onda de pulso  $\lambda_{p1}$ , en donde
  - o La primera fuente de pulsos de luz 700a está dispuesta para emitir un segundo último pulso de luz 710b que tenga la longitud de onda de pulso  $\lambda_{p2}$  (no mostrada), o
  - o El dispositivo 990 comprende una segunda fuente de pulsos de luz 700b (Figs. 9a a 9c), dispuesta para emitir un segundo último pulso de luz 710b que tenga la longitud de onda de pulso  $\lambda_{p2}$ ,
- Al menos un elemento óptico, donde el elemento óptico o la combinación de al menos un elemento óptico está dispuesto para guiar:
  - o Al menos parte del haz de luz 170 a un primer camino óptico 160 de manera que al menos parte de los fotones del haz de luz 170 se desplacen en una primera dirección y
  - o Al menos parte de al menos uno de: (i) el último pulso de luz 710a y (ii) el segundo último pulso de luz 710b, al primer camino óptico 160 de manera que al menos parte de al menos uno de: (i) el último pulso de luz 710a y (ii) el segundo último pulso de luz 710b, se desplace en una segunda dirección, en donde
  - o La segunda dirección es inversa a la primera dirección,
- Un primer fotodetector 320, dispuesto para detectar un primer perfil  $I_k(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 que tiene la longitud de onda  $\lambda_b$ , en función del tiempo, y
- Una unidad de procesamiento de datos 910, donde la unidad de procesamiento de datos está dispuesta para determinar, usando el primer perfil  $I_k(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en función del tiempo, el perfil del contenido del compuesto gaseoso en la mezcla de gases.

La longitud de onda para el haz de luz 170 se puede seleccionar como se trató anteriormente para la disociación de pulso único. La fuente de haces de luz 310 puede ser sintonizable, es decir, la longitud de onda  $\lambda_b$  que emite puede

ajustarse para que corresponda con el pico de absorción de la primera parte 520.

En las Figs. 9a a 9c, la fuente de haces de luz 310 está dispuesta para emitir un haz de luz coherente y monocromático. En las Figs. 9a a 9c, la primera fuente de pulsos de luz 700a está dispuesta para emitir un último pulso de luz 710a coherente y monocromático. En las Figs. 9a a 9c, la segunda fuente de pulsos de luz 700b está dispuesta para emitir un segundo pulso de luz 710b coherente y monocromático.

La segunda fuente de pulsos de luz 700b es opcional. El segundo último pulso de luz 710b se puede integrar con la primera fuente de pulsos de luz 700a. Por ejemplo, la primera fuente de pulsos de luz 700a puede emitir dos pulsos subsiguientes. Como otro ejemplo, la primera fuente de pulsos de luz 700a puede emitir un pulso de luz que se divide en dos pulsos. El primero de estos pulsos se puede usar directamente para transformar el átomo, molécula, ion o radical del compuesto gaseoso 510 o el compuesto gaseoso preexcitado (es decir, como el segundo último pulso de luz 710b), y el último de estos pulsos puede retrasarse y usarse para transformar la tercera parte 530 o la tercera parte preexcitada (es decir, como el último pulso de luz 710a). Tanto la primera fuente de pulsos de luz 700a como el divisor de pulsos de luz se pueden denominar como 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 transforman al menos parte de: (i) átomos, moléculas, iones, o radicales del compuesto gaseoso 510 o (ii) átomos, moléculas, iones, o radicales del compuesto gaseoso 510b preexcitado en el primer camino óptico 160 en átomos, moléculas, iones, o radicales de la tercera parte 530 y, opcionalmente, en otra parte 525. En otra realización, el segundo último pulso luminoso 710b puede transformar una tercera parte 530 (relajada o preexcitada) que es el resultado de un proceso de transformación previo (Fig. 10).

Como se muestra en las Figs. 9a a 9c, el dispositivo 990 puede además comprender:

- Una lente 746, dispuesta para converger el haz de luz atenuado 175 en el primer fotodetector 320,
- Un segundo fotodetector 720a, dispuesto para detectar la intensidad del último pulso de luz atenuado 715a, último pulso de luz atenuado que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p1}$ ,
- Un tercer fotodetector 720b, dispuesto para detectar la intensidad del segundo pulso de luz atenuado 715b, segundo pulso de luz atenuado que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p2}$ ,
- Un cuarto fotodetector 722a, dispuesto para detectar la intensidad de la luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p1}$ , y
- Un quinto fotodetector 722b, dispuesto para detectar la intensidad de la luz que tiene la longitud de onda  $\lambda_{p2}$ .

Las energías de los pulsos antes de las disociaciones se miden preferiblemente con los fotodetectores 722a y 722b.

Preferiblemente, los pulsos de luz no se guían al fotodetector 320. Esto puede tenerse en cuenta mediante el elemento óptico 742a (Figs. 9b y 9c), que puede disponerse para dejar pasar sólo fotones que tienen aproximadamente la longitud de onda del haz  $\lambda_b$  y disponerse para reflejar o absorber los fotones 516, 515 de al menos uno de los pulsos de luz 710b y 710a. Obsérvese que la realización de la Fig. 9a no tiene dicho elemento, ya que tanto el último como el segundo último pulso se desplazan hacia la fuente de haces de luz 310 en el camino óptico 160.

Los tamaños de los pulsos de luz se seleccionan preferiblemente de modo que el segundo último pulso de luz 710b tenga una sección transversal mayor que el último pulso de luz 710a. Por otra parte, el segundo último y el último pulso de luz son preferiblemente coherentes y monocromáticos y se desplazan a lo largo del primer camino óptico 160. Por lo tanto, el volumen del segundo camino óptico 800 está preferiblemente comprendido en el volumen de un tercer camino óptico 810. Es decir, el tercer camino óptico tiene un diámetro mayor que el segundo camino óptico. El tercer camino óptico 810 se refiere al camino óptico que recorre el segundo último pulso de luz 710b. Preferiblemente, el primer 160 y el segundo 800 camino óptico son esencialmente paralelos y co-céntricos. Además, preferiblemente el segundo 800 y el tercer 810 camino óptico son esencialmente paralelos y co-céntricos. Incluso si las flechas en las Figs. 9a a 9c están ligeramente separadas, los caminos ópticos 160, 800 y 810 son preferible y esencialmente paralelos y co-céntricos.

Además, el tamaño del último pulso de luz 710a y del 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, como se trató para el caso de sólo un pulso disociativo. Por lo tanto, el volumen del primer camino óptico 160 está preferiblemente comprendido en el volumen del segundo camino óptico 800. Es decir, el segundo camino óptico tiene un diámetro mayor que el primer camino óptico.

La longitud de onda del último pulso de luz 710a se puede seleccionar de manera que se transforme la tercera parte 530. Sin embargo, para controlar las diferentes etapas del proceso de transformación, la longitud de onda puede seleccionarse también de modo que la molécula de compuesto gaseoso 510 no se transforme con el último pulso de luz 710a, o al menos una parte significativa de los átomos, moléculas, iones o radicales del compuesto gaseoso 510 no se transformen con el último pulso de luz.

La longitud de onda del segundo último pulso de luz 710b se puede seleccionar de manera que el pulso 710b transforme al menos parte de los átomos, moléculas, iones o radicales del compuesto gaseoso 510. La longitud de onda del segundo último pulso de luz 710b puede ser, p. ej., menor que 430 nm. Sin embargo, para controlar las diferentes etapas del proceso de transformación, la longitud de onda puede seleccionarse también de manera que la tercera parte 530 no se transforme con el segundo último pulso de luz, o el segundo último pulso de luz 710b transforma significativamente más átomos, moléculas, iones o radicales del compuesto gaseoso 510 que las terceras partes 530. Este último criterio no es crítico, ya que el tiempo entre pulsos, en particular el tiempo entre un último pulso de luz 710a y un segundo pulso subsiguiente 710b, puede seleccionarse de manera que las terceras partes 530 no estén presentes en el camino óptico en el momento del segundo último pulso subsiguiente 710b.

A partir del perfil  $I_k(t)$ , el cálculo del contenido del compuesto gaseoso y del perfil del contenido del compuesto gaseoso se puede realizar siguiendo los principios establecidos en el caso de la disociación en una sola etapa.

### Principio de medición, disociación, ionización y/o excitación en tres etapas

Se ha observado adicionalmente que el contenido de algunas moléculas 510 del compuesto gaseoso en una mezcla de gases puede medirse usando tres pulsos de luz subsiguientes para disociar la molécula de gas. Con referencia a la Fig. 10, una molécula de cloruro de cromo  $\text{CrCl}_3$  510 puede disociarse utilizando tres pulsos de luz disociativos subsiguientes en un átomo de cromo (primera parte 520), que puede estar o no en un estado excitado, y en otras partes (525, 532, 536), en donde las otras partes son átomos de cloro.

La molécula 510 (molécula gaseosa) de (tri)cloruro de cromo se puede excitar con un tercer último pulso de luz 710c a la molécula gaseosa 512 en un estado disociativo. El tercer último impulso de luz 710c comprende fotones 517 que tienen la longitud de onda  $\lambda_{p3}$  del tercer pulso. El tercer último pulso de luz 710c puede comprender además fotones que tienen otra longitud de onda. Preferiblemente, el tercer último pulso de luz 710c es monocromático. La longitud de onda del tercer pulso  $\lambda_{p3}$  se selecciona para excitar la molécula gaseosa 510 a la molécula gaseosa excitada 512 en un estado disociativo. La molécula gaseosa 512 se disocia en la segunda parte 525 y en la tercera parte 530. En la Fig. 10, la segunda parte 525 es un átomo de cloro y la tercera parte 530 es una molécula de (di)cloruro de cromo.

La tercera parte 530 (molécula de (di) cloruro de cromo) se puede excitar con un segundo último impulso de luz 710b a una tercera parte 531 excitada en un estado disociativo. El segundo último pulso de luz 710b comprende fotones 516 que tienen la longitud de onda  $\lambda_{p2}$  del segundo pulso. El segundo último pulso de luz 710b puede comprender además fotones que tienen otra longitud de onda. Preferiblemente, el segundo último pulso de luz 710b es monocromático. La longitud de onda  $\lambda_{p2}$  del segundo pulso se selecciona para excitar a la tercera parte 530 a una tercera parte 531 excitada en un estado disociativo. La tercera parte excitada 531 se disocia en una cuarta parte 532 y en una quinta parte 534. En la Fig. 10, la cuarta parte 532 es un átomo de cloro y la quinta parte 534 es una molécula de (mono)cloruro de cromo.

La quinta parte 534 (molécula de (mono)cloruro de cromo) se puede excitar con el último pulso de luz 710a a una quinta parte 535 excitada en un estado disociativo. El último pulso de luz 710a comprende fotones 515 que tienen la primera longitud de onda del 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 del pulso se selecciona para excitar a la quinta parte 534 a una quinta parte 535 excitada en un estado disociativo. La quinta parte 535 excitada se disocia en la primera parte 520 y en una sexta parte 536. En la Fig. 10, la primera parte 520 es un átomo de cromo y la sexta parte 536 es un átomo de cloro.

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 segundo último pulso de luz 710b se selecciona de modo que la tercera parte 530 sea excitada a un estado disociativo, teniendo 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 sea excitada a un estado disociativo, teniendo en cuenta si la quinta parte 534 está en un estado excitado o en un estado relajado.

La primera parte 520 se sondada con el haz de luz 170, que se atenúa al haz de luz atenuado 175. La atenuación puede ser al menos parcialmente debida a la absorción debida a los átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte de 520 producidos en la disociación de moléculas gaseosas utilizando el último pulso de luz 710a. Otros mecanismos de absorción se trataron anteriormente (por ej., cerca de la Ec. 1). De este modo, se puede medir el primer perfil  $I_k(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado (175) en función del tiempo, como se trató anteriormente.

Es evidente que los átomos, moléculas, iones o radicales del compuesto gaseoso 510 se pueden de manera más general transformar en las primeras partes 520 como se ha descrito anteriormente. Por lo tanto, el método puede comprender tres de:

- Disociar el compuesto gaseoso 510 o el compuesto gaseoso preexcitado 510b en la tercera parte 530 y una

segunda parte 525,

- Disociar la tercera parte 530 o la tercera parte preexcitada en la quinta parte 534 y una cuarta parte 532,
- Disociar la quinta parte 534 o la quinta parte preexcitada en la primera parte 520 y una sexta parte 536,
- 5 - Ionizar el compuesto gaseoso 510 o el compuesto gaseoso preexcitado 510b en la tercera parte 530, liberando de este modo al menos un electrón,
- Ionizar la tercera parte 530 o la tercera parte preexcitada en la quinta parte 534, liberando de este modo al menos un electrón,
- Ionizar la quinta parte 534 o la quinta parte preexcitada en la primera parte 520, liberando de este modo al menos un electrón,
- 10 - Excitar el compuesto gaseoso 510 o el compuesto gaseoso preexcitado 510b a la tercera parte 530,
- Excitar la tercera parte 530 o la tercera parte preexcitada a la quinta parte 534, y
- Excitar la quinta parte (534) o la quinta parte excitada a la primera parte 520.

Además, el método puede comprender al menos uno de:

- Preexcitar el compuesto gaseoso 510 al compuesto gaseoso preexcitado 510b usando un pulso de luz,
- 15 - Preexcitar la tercera parte 530 a la tercera parte preexcitada usando un pulso de luz, y
- Preexcitar la quinta parte 534 a la quinta parte preexcitada usando un pulso de luz.

20 El haz de luz 170 comprende fotones que tienen la longitud de onda del haz  $\lambda_b$ . El 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 manera que corresponda al perfil de absorción de la primera parte 520 (excitada o relajada). Por lo tanto, la transformación del átomo, molécula, ion o radical del compuesto gaseoso 510, finalmente en la primera parte 520 aumenta la absorción del haz de luz en la mezcla de gases a la longitud de onda de haz  $\lambda_b$ . La tercera parte 530 puede estar en un estado excitado, en donde la vida del estado excitado es corta. Por lo tanto, la temporización del segundo último pulso de luz 710b debe seleccionarse para que excite a la tercera parte 530 a un estado disociativo.

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

La excitación con dos fotones o la excitación con fotones múltiples se pueden usar para excitar al menos uno de:

- La molécula gaseosa 510,
- 30 - La tercera parte 530, y
- La quinta parte 534,

al estado disociativo correspondiente, como se trató anteriormente en el contexto de la disociación en una etapa y la disociación en dos etapas.

El contenido de dos compuestos gaseosos se puede medir con al menos uno de:

- 35 - Usar un haz de luz que comprende fotones que tienen una primera longitud de onda correspondiente al pico de absorción de un primer compuesto gaseoso y fotones que tienen una segunda longitud de onda correspondiente al pico de absorción de un segundo compuesto gaseoso,
- Usar dos haces de luz, donde el primer haz de luz comprende fotones que tienen una primera longitud de onda correspondiente al pico de absorción de un primer compuesto gaseoso y el segundo haz de luz comprende fotones que tienen una segunda longitud de onda correspondiente al pico de absorción de un
- 40 - segundo compuesto gaseoso,
- Usar un múltiplo de pulsos de luz de manera que una primera combinación de pulsos disocie el primer compuesto gaseoso finalmente en un átomo, molécula, ion o radical de la primera parte, y una segunda combinación de pulsos disocie el segundo compuesto gaseoso finalmente en un átomo, molécula, ion o
- 45 - radical de la (misma) primera parte, y
- Usar un múltiplo de pulsos de luz de manera que una primera combinación de pulsos disocie el primer

compuesto gaseoso finalmente en un primer átomo, molécula, ion o radical la de primera primera parte, y una segunda combinación de pulsos disocie el segundo compuesto gaseoso finalmente en un átomo, molécula, ion o radical de la (diferente) segunda primera parte.

5 Con el fin de medir el perfil del contenido de un compuesto gaseoso, el haz de luz 170 es guiado por un primer camino óptico 160 de manera que al menos parte de los fotones del haz de luz 170 se desplacen en una primera dirección. Además, al menos parte de al menos uno de:

- El último pulso de luz 710a,
- El segundo último pulso de luz 710b, y
- El último pulso de luz 710c,

10 está dispuesto para viajar a lo largo del primer camino óptico 160 en una segunda dirección, en donde la segunda dirección es inversa a la primera dirección.

**Dispositivo de medida, disociación en tres etapas**

Un dispositivo para medir el perfil del contenido de gas de una mezcla de gases, en el que el dispositivo está dispuesto para usar una disociación en tres etapas (Fig. 10), comprende

- 15 - Una fuente de haces 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
- Medios para generar un tercer último pulso de luz 710c. El tercer último 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 transforman al menos parte de: (i) átomos, moléculas, iones, o radicales del compuesto gaseoso 510 o (ii) átomos, moléculas, iones o radicales del compuesto gaseoso 510b preexcitado en el primer camino óptico 160 en átomos, moléculas, iones, o radicales de la tercera parte 530 y opcionalmente a otra parte 525. Y
- 20 - Medios para generar un segundo último pulso de luz 710b. El segundo último 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 transforman al menos parte de: (i) átomos, moléculas, iones o radicales de la tercera parte 530 o (ii) átomos, moléculas, iones o radicales de la tercera parte 530 preexcitada en átomos, moléculas, iones, o radicales de la quinta parte 534 y opcionalmente en otra parte 532. Y
- 25 - Una primera fuente de pulsos de luz 700a. La primera fuente de pulsos de luz 700a está dispuesta para generar el último pulso de luz 710a que comprende los fotones 515 que tienen una primera longitud de onda de pulso  $\lambda_{p1}$ . Al menos una parte de los fotones 515 transforma al menos parte de: (i) átomos, moléculas, iones o radicales de la quinta parte 534 o (ii) átomos, moléculas, iones o radicales de la quinta parte 534 preexcitada en átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte 520, y opcionalmente a otra parte 536. Y
- 30 - Medios para guiar al menos parte del haz de luz 170 al primer camino óptico 160 de manera que al menos parte de los fotones del haz de luz 170 se desplacen en una primera dirección. Y
- 35 - Medios para guiar al menos parte del último pulso de luz 710, 710a u otro pulso de luz 710b, 710c al primer camino óptico 160, de manera que los fotones 515, 515b del último pulso de luz 710, 710a o los fotones 516, 517 del otro pulso de luz 710b, 710c se desplacen en una segunda dirección. Y
- Un fotodetector 320 dispuesto para detectar un primer perfil  $I_k(t)$  indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado 175 en función del tiempo.

40 Como se trató anteriormente para la transformación de una etapa y las transformaciones de dos etapas, el dispositivo comprende preferiblemente una fuente de haces de luz que tiene una longitud de onda sintonizable. De esta manera, la longitud de onda del haz de luz se puede seleccionar con precisión.

45 El medio para guiar al menos parte del último pulso de luz 710, 710a u otro pulso de luz 710b, 710c al primer camino óptico 160, de manera que los fotones 515, 515b del último pulso de luz 710, 710a o los fotones 516, 517 del otro pulso de luz 710b, 710c se desplacen en una segunda dirección puede comprender un elemento óptico o una disposición de elementos ópticos. Estos elementos ópticos pueden comprender al menos uno de guías de ondas, reflectores (por ej., un espejo/filtro dicróico) y deflectores.

El medio para generar el segundo último pulso de luz 710b y/o el tercer último pulso de luz 710c puede comprender uno de:

- 50 - Una fuente de pulsos de luz y

- Un divisor de pulsos de luz y un retardador de pulsos de luz.

P. ej., se puede usar una fuente de pulsos de luz, como se trató en conexión con la primera fuente de pulsos de luz.

La fuente de haces de luz está dispuesta preferiblemente para generar un haz de luz esencialmente monocromático y esencialmente coherente. La fuente de pulsos de luz está dispuesta preferiblemente para generar un último impulso de luz esencialmente monocromático y esencialmente coherente. El medio para generar el segundo último pulso de luz está dispuestos preferiblemente para generar un segundo pulso de luz esencialmente monocromático y esencialmente coherente. El medio para generar el tercer último pulso de luz está dispuesto preferiblemente para generar un tercer último pulso de luz esencialmente monocromático y esencialmente coherente.

Los tamaños de los pulsos de luz se seleccionan preferiblemente de modo que el tercer último pulso de luz 710c tenga una sección transversal mayor que el segundo último pulso de luz 710b. Por otra parte, un cuarto camino óptico (del tercer último pulso de luz) y el tercer camino óptico 810 (del segundo último pulso de luz) son preferible y esencialmente paralelos y co-céntricos en el sentido tratado anteriormente. Por lo tanto, el volumen del tercer camino óptico 810 está comprendido preferiblemente en el volumen del cuarto camino óptico. Es decir, el cuarto camino óptico tiene un diámetro mayor que el tercer camino óptico.

Además, el tamaño del segundo último pulso de luz 710b se selecciona preferiblemente de modo que el segundo último pulso de luz 710b tenga una sección transversal mayor que el último pulso de luz 710a. Por otra parte, el tercer camino óptico 810 (del segundo último pulso de luz) y el segundo camino óptico 800 (del último pulso de luz) son preferible y esencialmente paralelos y co-céntricos en el sentido tratado anteriormente. Por lo tanto, el volumen del segundo camino óptico 800 está preferiblemente comprendido en el volumen del tercer camino óptico 810. Es decir, el tercer camino óptico tiene un diámetro mayor que el segundo camino óptico.

Aún más, el tamaño del último pulso de luz 710a se selecciona preferiblemente de manera que el último pulso de luz 710a tenga una sección transversal mayor que el haz de luz 170. Por otra parte, el segundo camino óptico 800 (del último pulso de luz) y el primer camino óptico 160 (del haz de luz) son preferible y esencialmente paralelos y co-céntricos en el significado tratado anteriormente. Por lo tanto, el volumen del primer camino óptico 160 está preferiblemente comprendido en el volumen del segundo camino óptico 800. Es decir, el segundo camino óptico tiene un diámetro mayor que el primer camino óptico.

El tamaño preferido del haz de luz 170 se ha tratado anteriormente.

#### Otras características

El dispositivo 990 puede comprender una fuente de luz integrada. La fuente de luz integrada comprende al menos dos de: la fuente de haces de luz 310, la tercera fuente de pulsos de luz 700c, la segunda fuente de pulsos de luz 700b, la primera fuente de pulsos de luz 700a y la fuente de pulsos de luz 700. La fuente de luz integrada puede estar dispuesta para emitir luz de manera tal que los caminos ópticos sean esencialmente paralelos. Al menos ninguno del haz de luz y de los pulsos de luz pueden guiarse utilizando reflectores dentro de la fuente de luz integrada. Además, al menos ninguno del haz de luz y de los pulsos de luz pueden guiarse usando al menos una fibra óptica dentro de la fuente de luz integrada.

El dispositivo 990 puede estar integrado con un dispositivo térmico tal como una caldera o un gasificador o un reactor de torrefacción o un reactor de pirólisis. Por lo tanto, el perfil del contenido de un compuesto gaseoso emitido por el dispositivo térmico, p. ej., puede medirse el perfil del contenido de cloruro de potasio en los gases de combustión. La medición puede hacerse *in situ*. Es evidente que se puede integrar con dicho dispositivo térmico un dispositivo de cualquiera de las figuras 5a, 7a, 7b, 7c, 7e, 9a, 9b, 9c, o un dispositivo dispuesto para usar tres pulsos de luz para disociar una molécula gaseosa. Evidentemente, el haz de luz y el pulso de luz pueden viajar desde una pared del dispositivo térmico a otra pared como se muestra en las figuras.

Por otra parte, el dispositivo 990 puede hacerse funcionar desde una sola pared del dispositivo térmico, como se muestra en las Figs. 11a y 11b. En la Fig. 11a, se muestra un dispositivo 990 para medir el perfil del contenido de un compuesto gaseoso. Una parte del dispositivo está situada dentro de un dispositivo térmico 100. En la figura se muestra una pared 102 del dispositivo térmico 100. La pared separa el interior del dispositivo térmico del exterior del dispositivo térmico. El espacio 110, a través del cual se ejecutan los caminos ópticos 160, 800, está situado en el interior del dispositivo. Se observa que el perfil del contenido del compuesto gaseoso se mide a partir del camino óptico 160.

La Fig. 11b muestra un dispositivo 990 para medir el contenido de oxígeno de una mezcla de gases, donde la mezcla de gases comprende un compuesto gaseoso que comprende potasio. Obsérvese que en este caso el haz 170 y el pulso 710 se propagan en la misma dirección. Sin embargo, el contenido de oxígeno se puede medir también con el dispositivo de la Fig. 11a, ya que el método no es sensible a la orientación mutua del haz y el pulso. Una parte del dispositivo se encuentra dentro de un dispositivo térmico. En la figura se muestra una pared 102 del dispositivo. La pared separa el interior del dispositivo térmico del exterior del dispositivo térmico. El espacio 110, a través del cual se ejecutan los caminos ópticos 160, 800, está situado en el interior del dispositivo. Se observa que el contenido de oxígeno se mide a partir del camino óptico 160.

La Figura 12 muestra, en una vista lateral, una realización de un dispositivo térmico 100. El dispositivo térmico de la Fig. 12 es una caldera. El dispositivo 990 para medir el contenido de gas se puede integrar con la caldera. El dispositivo 990 puede estar integrado, p. ej., de modo que la caldera comprenda al menos una entrada óptica 130. La caldera puede comprender al menos una salida óptica 135 (véanse las Figs. 13a-13d).

- 5 La caldera de la Fig. 12 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, p. ej., un espacio de combustión 120, un canal 122 para los gases de combustión, y/o una chimenea 124. La caldera comprende intercambiadores de calor 150 situados en el espacio 110. Un intercambiador de calor 150 puede ser, p. ej., un dispositivo de sobrecalentamiento, un economizador, un precalentador de aire o un precalentador de agua de alimentación. La caldera comprende, en al menos una pared 102, al menos una entrada óptica 130, tal como una ventana 140 o un orificio 132 (Figs. 13a a 13d), para las mediciones ópticas. Una ventana 140 es transparente para que la luz se pueda propagar a través de la ventana. Preferiblemente, la luz del haz de luz de medición no se atenúa significativamente al viajar a través de la ventana. La caldera puede comprender al menos una salida óptica 135, tal como una ventana 140 o un orificio 132.
- 10 En caso de que se use un orificio 132 como una entrada óptica, se puede inyectar aire u otro gas a través del orificio 132 en la caldera con el fin de retener los gases de combustión en la caldera.

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

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

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

- 25 Las Figuras 13a a 13f muestran algunas posibilidades para disponer el camino óptico en un canal o un recipiente, p. ej., en un canal de gases de combustión. Con referencia a las Figs. 13a a 13f, la mezcla de gases puede estar situada en un espacio 110. El espacio 110 puede estar limitado por las paredes 102 (por ej., las paredes 102a1, 102a2, 102b1, 102b2, 102c, 102d1, 102d2). En el método, el espacio 110 no está necesariamente limitado por ninguna pared. En este caso, se puede medir el contenido del compuesto gaseoso en el ambiente. Por otra parte, el dispositivo se puede instalar en el ambiente y se puede usar como tal. Sin embargo, a menudo la mezcla de gases está situada en un canal o un recipiente limitado por al menos una pared 102 (por ej., una pared de un tubo).

- 30 El término "pared" se usa sólo 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 orificio 132, para mediciones ópticas. En la fig. 13a, una ventana 140 es transparente para que la luz se pueda propagar a través de la ventana. Preferiblemente, la luz del haz de luz de medición 170 (170a, 170b, 170c) no se atenúa significativamente mientras viaja a través de la ventana. Una pared 102 puede comprender al menos una salida óptica 135, tal como una ventana 140 o un orificio 132. En la Fig. 1a, la ventana 140a1 también está marcada con el número de referencia 130 para la entrada óptica. En la Fig. 1a, la ventana 140a2 también está marcada con el número de referencia 135 para salida óptica. En caso de que se use un orificio 132 (Fig. 13d; 132d1, 132d2) como una entrada óptica, se puede insuflar aire u otro gas a través del orificio 132 en el espacio 110 con el fin de retener la mezcla de gases en el espacio 110. En el método o con el dispositivo, se genera un haz de luz 170 (170a, 170b, 170c, 170d) y se guía a través de la entrada óptica al espacio 110. El camino que recorre el haz de luz forma el primer camino óptico 160. También puede generarse un camino óptico sin ninguna pared, en cuyo caso no se necesita una entrada óptica o una salida óptica.

- 35 Con referencia a las Figs. 13a-13f, entre una entrada óptica 130 y una salida óptica 135, en el espacio 110, se forma un primer camino óptico 160. Cuando el haz de luz 170 entra por la entrada óptica 130, el haz de luz viaja a lo largo del primer camino óptico 160 a la salida óptica 135. En las Figs. 13a-13c una ventana 140a1, 140b1 o 140c1 sirve como la entrada óptica 130 y otra ventana 140a2, 140b2, 140c2 sirve como la salida óptica 135. En la Fig. 13d, el orificio 132d1 sirve como la entrada óptica 130, y el orificio 132d2 sirve como la salida óptica 135.

- 40 Una realización preferida para el primer camino óptico 160a se muestra en la Fig. 13a, en la que una primera pared 102a1 comprende una primera ventana 140a1, una segunda pared 102a2 comprende una segunda ventana 140a2, la primera pared 102a1 es esencialmente paralela a la segunda pared 102a2, y el camino óptico 160a es esencialmente perpendicular a la primera ventana 140a1 y a la segunda ventana 140a2. Las ventanas pueden ser esencialmente paralelas a la pared. La pared 102 puede ser curva. En una realización preferida, las ventanas 140a1 y 140a2 son esencialmente planas. En esta realización, y también en las realizaciones de las Figs. 13c y 13d, el camino óptico 160 se extiende desde una pared 102a1 a una pared opuesta 102a2. Por lo tanto, el perfil del contenido del compuesto gaseoso se mide a partir de la longitud total (o anchura o altura) del canal limitado por las paredes 102. Como se muestra en la Fig. 13e, para medir el perfil en dos direcciones perpendiculares entre sí se pueden usar dos dispositivos que tengan caminos ópticos mutuamente perpendiculares. Como se muestra en la Fig. 13f, para medir un perfil bidimensional del contenido del compuesto gaseoso se pueden usar varios dispositivos que

tengan caminos ópticos mutuamente paralelos, en donde los caminos ópticos están ubicados en el mismo plano.

5 Otras realizaciones se muestran en las Figs. 13b a 13d. En la Fig. 13b, un haz de luz 170b entra y penetra por la primera ventana 140b1, se desplaza a lo largo de un primer camino óptico 160b a la segunda ventana 140b2, entra y penetra por la segunda ventana 140b2 y sale por la segunda ventana como haz de luz atenuado 175b. La primera ventana 140b1 está dispuesta en un ángulo con respecto a la segunda ventana 140b2. En la Fig. 13b, el ángulo es esencialmente un ángulo recto. Sin embargo, también son posibles otros ángulos.

10 En la Fig. 13c, un haz de luz 170c entra y penetra por la primera ventana 140c1, se desplaza a lo largo de una primera parte 160c1 del primer camino óptico hasta 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 manera que al menos parte del haz de luz sea guiado a una segunda parte 160c2 del camino óptico. La parte reflejada o dispersa del haz de luz viaja a lo largo de una segunda parte 160c2 del primer camino óptico a la segunda ventana 140c2, entra y penetra por la segunda ventana 140c2, y sale de la segunda ventana como el haz de luz atenuado 175c. El primer camino óptico 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 o un orificio 132 pueden funcionar tanto como la entrada óptica 130 como la salida óptica 135 (véase la Fig. 7e). La misma convención con las flechas de doble y triple punta se usa en la Fig. 13c como en las otras figuras, específicamente en la Fig. 7e.

20 En la Fig. 13d, un haz de luz 170d penetra por un primer orificio 132d1 (la entrada óptica 130), se desplaza a lo largo del primer camino óptico 160d hasta un segundo orificio 132d2 (la salida óptica 135) y sale por el segundo orificio 132d2 como el haz de luz atenuado 175d. También Se puede usar un orificio 132 en lugar de una ventana en las realizaciones mostradas en las Figs. 13a a 13c y 13e y 13f. Las paredes 102 en la Fig. 13d están dispuestas como se trató en el contexto de la Fig. 13a.

25 En las Figs. 13a-13d, el primer camino óptico 160 está situado ópticamente entre la entrada óptica 130 y la salida óptica 135. En caso de que se use un reflector 145, el camino óptico no está necesariamente físicamente entre la entrada óptica y la salida óptica, como se ilustra en Fig. 13c. La expresión "ópticamente entre" significa que la luz que entra por la entrada óptica puede viajar a lo largo del primer camino óptico hasta la salida óptica (o la entrada óptica, si un orificio o ventana actúa tanto como la entrada óptica como la salida óptica, Fig. 7e).

**REIVINDICACIONES**

1. Un método para medir el perfil espacial del contenido de un compuesto gaseoso en una mezcla de gases, método que comprende:
- 5
- Generar un haz de luz (170), donde el haz de luz (170) comprende fotones que tienen una longitud de onda del haz ( $\lambda_b$ ), y
  - Guiar al menos parte del haz de luz (170) a un primer camino óptico (160) de manera que al menos parte de los fotones del haz de luz (170) recorran el primer camino óptico (160) en una primera dirección, donde
  - 10 - El primer camino óptico (160) pasa a través de un espacio (110) que contiene la mezcla de gases que comprende el compuesto gaseoso,
- por lo que el haz de luz (170) es atenuado a un haz de luz atenuado (175),  
caracterizado por
- Generar al menos un último pulso de luz (710, 710a), donde el último pulso de luz (710, 710a) comprende fotones (515, 515b) que tienen una primera longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p1}$ ),
  - 15 - Dividir, utilizando el último pulso de luz (710, 710a) o una secuencia de pulsos de luz (710, 710a, 710b, 710c), al menos parte de los átomos, moléculas, iones o radicales del compuesto gaseoso (510), en una primera parte (520) y en una segunda parte (525), donde la secuencia de pulsos de luz (710, 710a, 710b, 710c) comprende al menos el último pulso de luz (710, 710a),
  - 20 - Seleccionar la longitud de onda del haz ( $\lambda_b$ ) de forma que la longitud de onda del haz ( $\lambda_b$ ) corresponda a un perfil de absorción de la primera parte (520),
  - Guiar al menos parte del último pulso de luz (710, 710a) o al menos parte de un pulso de luz (710, 710a, 710b, 710c) de la secuencia de pulsos de luz al primer camino óptico (160), tal que los fotones (515, 515b) de la parte guiada del pulso de luz viajen en una segunda dirección, donde
  - La segunda dirección es inversa a la primera dirección,
  - 25 - Detectar un primer perfil ( $I_k(t)$ ) indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado (175) en función del tiempo, y
  - Determinar, utilizando el primer perfil ( $I_k(t)$ ) indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado (175) en función del tiempo, el perfil espacial ( $\xi_G(x)$ ) del contenido del compuesto gaseoso en el primer camino óptico (160).
- 30 **2.** El método según la reivindicación 1, caracterizado por
- Dividir usando el último pulso de luz (710) al menos parte de: (i) los átomos, moléculas, iones, o radicales del compuesto gaseoso (510) o (ii) los átomos, moléculas, iones, o radicales del compuesto gaseoso preexcitado (510b) en el primer camino óptico (160) en átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte (520), y la segunda parte (525).
- 35 **3.** El método según la reivindicación 1 ó 2, **caracterizado porque**
- El último pulso de luz (710, 710a) comprende fotones que tienen la primera longitud de onda de pulso ( $\lambda_{p1}$ ), donde
  - La primera longitud de onda del pulso ( $\lambda_{p1}$ ) es como máximo 430 nm.
- 4.** El método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado porque al menos uno de
- 40
- El último pulso de luz (710, 710a), y
  - Otro pulso de luz (710b, 710c)
- es esencialmente coherente y esencialmente monocromático.
- 5.** El método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado porque
- El haz de luz (170) es monocromático o esencialmente monocromático.
- 45 **6.** El método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado porque

- El compuesto gaseoso es cloruro de potasio (KCl),
  - La primera longitud de onda del pulso ( $\lambda_{p1}$ ) es menor o igual que 320 nm, preferiblemente 266 nm, y
  - La longitud de onda del haz ( $\lambda_b$ ) corresponde a un pico de absorción del potasio, p. ej., 766,515 nm  $\pm$  0,01 nm, aproximadamente 770 nm, o aproximadamente 404 nm.
- 5    **7.**    Un dispositivo (990) para medir el perfil espacial del contenido de un compuesto gaseoso en una mezcla de gases, dispositivo que comprende:
- Una fuente de haces de luz (310), dispuesta para generar un haz de luz (170) que comprende fotones que tienen una longitud de onda del haz ( $\lambda_b$ ) y
  - Un fotodetector (320), donde
- 10    - Un primer camino óptico (160) está dispuesto ópticamente entre el fotodetector (320) y la fuente de haces de luz (310),
- Un espacio (110), a través del cual el primer camino óptico (160) está dispuesto para funcionar, está dispuesto para contener la mezcla de gases que absorbe el haz de luz (170),
  - El haz de luz (170) está dispuesto para ser atenuado a un haz de luz atenuado (175) mediante dicha absorción del haz de luz (170), y el dispositivo comprende
- 15    - Medios para guiar al menos parte del haz de luz (170) al primer camino óptico (160) de manera que al menos parte de los fotones del haz de luz (170) viajen en una primera dirección,
- caracterizado porque el dispositivo (990) comprende:
- Al menos una primera fuente de pulsos de luz (700, 700a), donde
- 20    - La primera fuente de pulsos 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) dividiendo al menos parte de: (i) átomos, moléculas, iones o radicales del compuesto gaseoso (510), (ii) átomos, moléculas, iones, o radicales del compuesto gaseoso (510b) pre-
- 25    - excitado, (iii) partes transformadas (530, 534), o (iv) partes transformadas (530, 534) preexcitadas en el primer camino óptico (160) en átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte (520), y unas segundas partes (525), por lo que el haz de luz (170) es adicionalmente atenuado al haz de luz atenuado (175) por absorción en los átomos, moléculas, iones o radicales de la primera parte (520) en el primer camino óptico (160), donde las partes transformadas (530, 534) han sido opcionalmente producidas a partir de los átomos, moléculas, iones o radicales del compuesto gaseoso (510) por
- 30    - transformación usando al menos otro pulso de luz, donde
- La fuente de haces de luz (310) está dispuesta para emitir un haz de luz (170) que comprende fotones que tienen una longitud de onda del haz ( $\lambda_b$ ) que corresponde a un perfil de absorción de la primera parte (520), y el dispositivo además comprende
  - Medios para guiar al menos parte del último pulso de luz (710, 710a) o al menos parte de otro pulso de luz (710b, 710c) al primer camino óptico (160), de manera que los fotones (515, 515b) de la parte guiada del último pulso de luz (710, 710a) o los fotones (516, 517) de la parte guiada del otro pulso de luz (710b, 710c) viajen en una segunda dirección, donde
  - La segunda dirección es inversa a la primera dirección, y
  - El fotodetector (320) está dispuesto para detectar un primer perfil ( $I_k(t)$ ) indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado (175) en función del tiempo, y
  - El dispositivo (990) comprende una unidad de procesamiento de datos (910) dispuesta para determinar, usando el primer perfil ( $I_k(t)$ ) indicativo de la intensidad del haz de luz atenuado (175) en función del tiempo, el perfil espacial del contenido de compuesto gaseoso en la mezcla de gases en el primer camino óptico (160).
- 35    -
- 40    -
- 45    **8.**    El dispositivo según la reivindicación 7, caracterizado porque
- La primera fuente de pulsos 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) dividiendo al menos parte de: (i) átomos, moléculas, iones o radicales del compuesto gaseoso (510) o (ii) átomos, moléculas, iones o radicales del compuesto gaseoso preexcitado (510b), en el primer camino óptico (160) en átomos, moléculas, iones o radicales de la
- 50    -

primera parte (520), y las segundas partes (525).

9. El dispositivo según la reivindicación 7 u 8, caracterizado porque
- La primera fuente de pulsos de luz (700, 700a) está dispuesta para generar un pulso de luz esencialmente monocromático y esencialmente coherente (710, 710a), o
- 5
- El dispositivo comprende medios para generar un pulso de luz esencialmente monocromático y esencialmente coherente (710b, 710c).
10. El dispositivo según la reivindicación 9, caracterizado porque
- La longitud de onda ( $\lambda_{p1}$ ,  $\lambda_{p2}$ ,  $\lambda_{p3}$ ) del pulso de luz esencialmente monocromático y esencialmente coherente (710, 710a, 710b, 710c) es como máximo de 430 nm.
- 10
11. El dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones 7 a 10, caracterizado porque
- La fuente de haces de luz (310) está dispuesta para generar un haz de luz esencialmente monocromático y esencialmente coherente (170).
12. El dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones 7 a 11, caracterizado porque
- El compuesto gaseoso es cloruro de potasio (KCl),
- 15
- La primera longitud de onda del pulso ( $\lambda_{p1}$ ) es menor o igual que 320 nm, preferiblemente 266 nm, y
  - La longitud de onda del haz ( $\lambda_b$ ) corresponde a un pico de absorción del potasio, p. ej., 766,515 nm  $\pm$  0,01 nm, aproximadamente 770 nm, o aproximadamente 404 nm.
13. Un dispositivo térmico (100), que comprende el dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones 7 a 12.

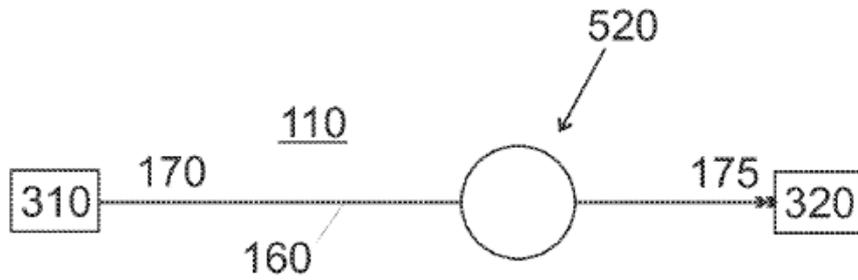


Fig. 1a

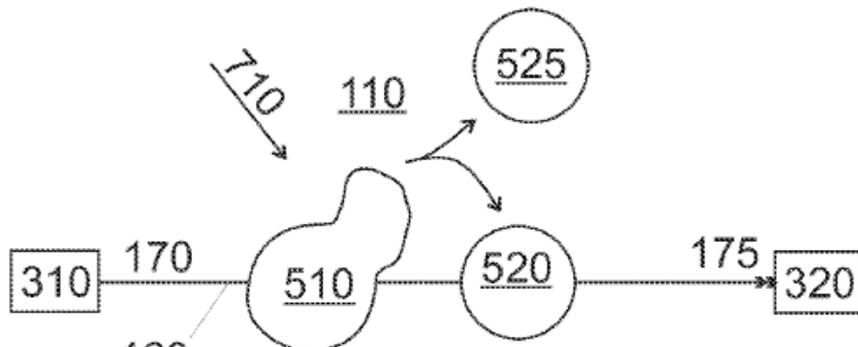


Fig. 1b

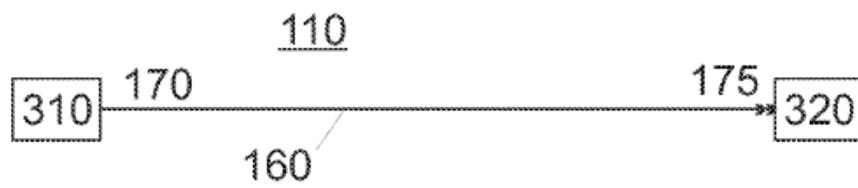
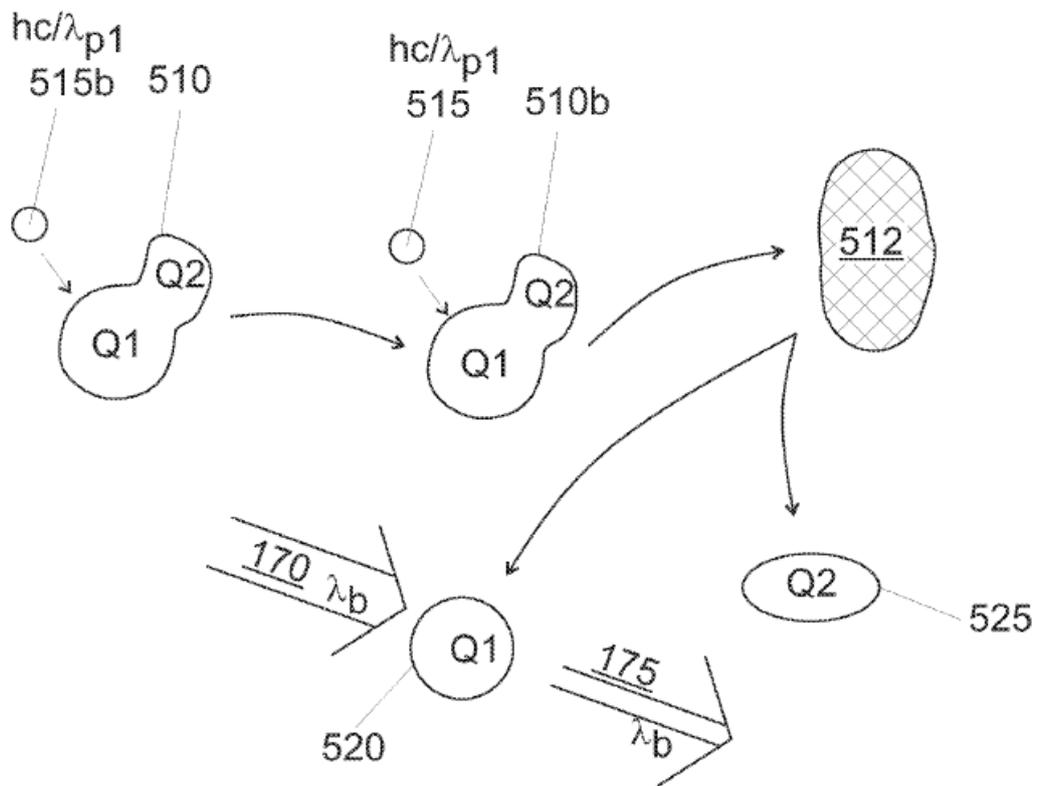
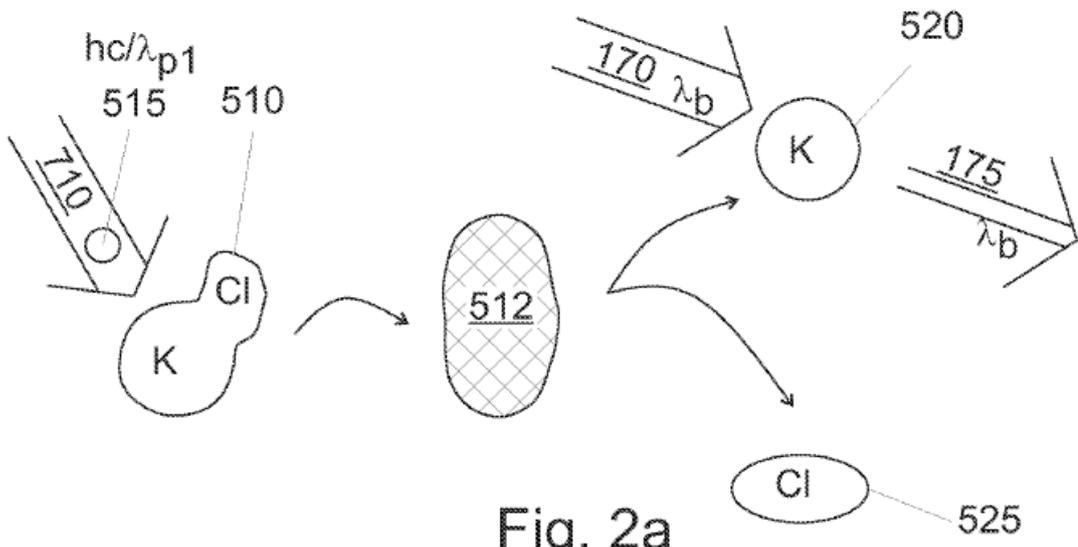


Fig. 1c



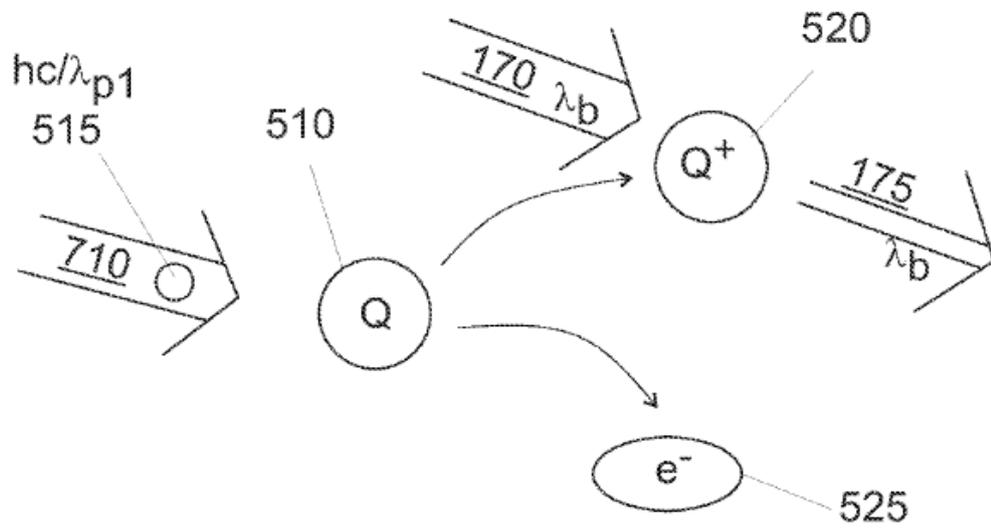


Fig. 2c

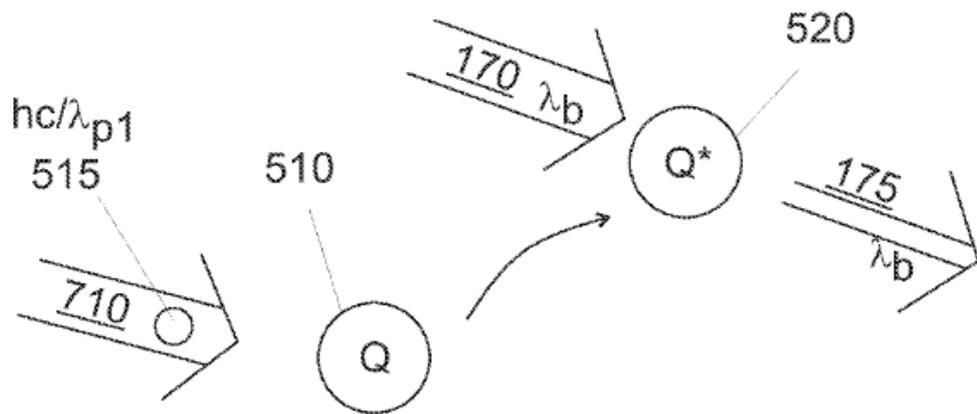


Fig. 2d

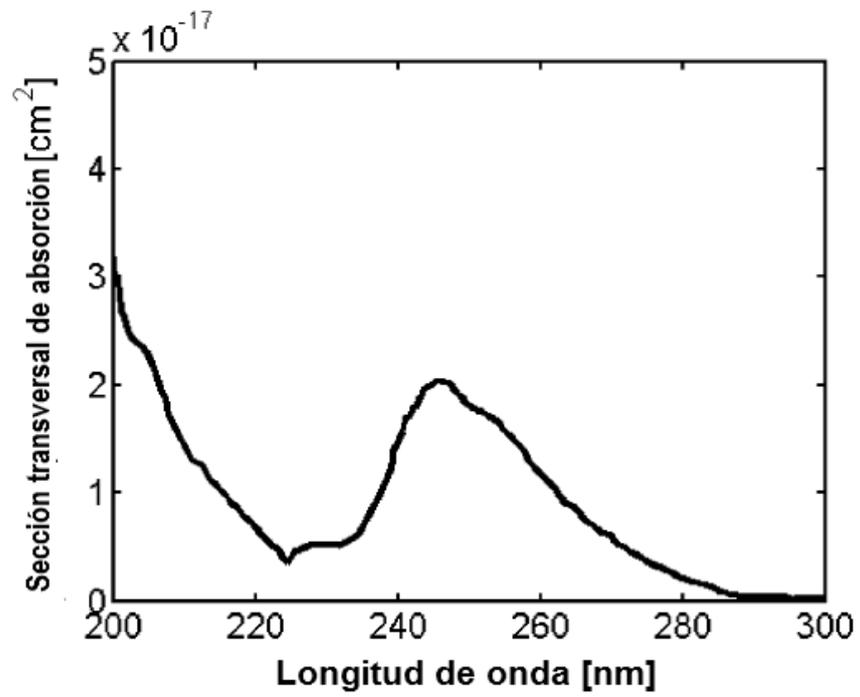


Fig. 3a

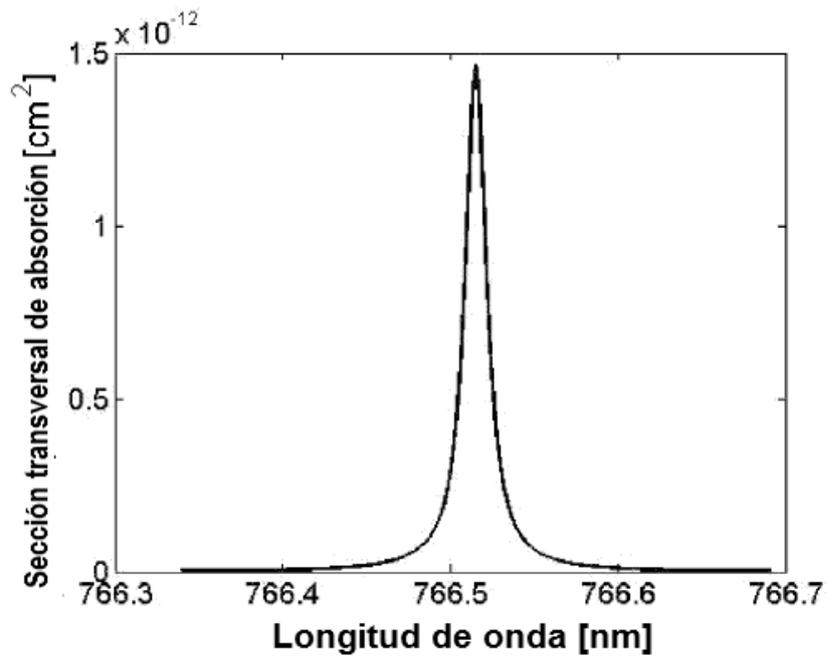


Fig. 3b

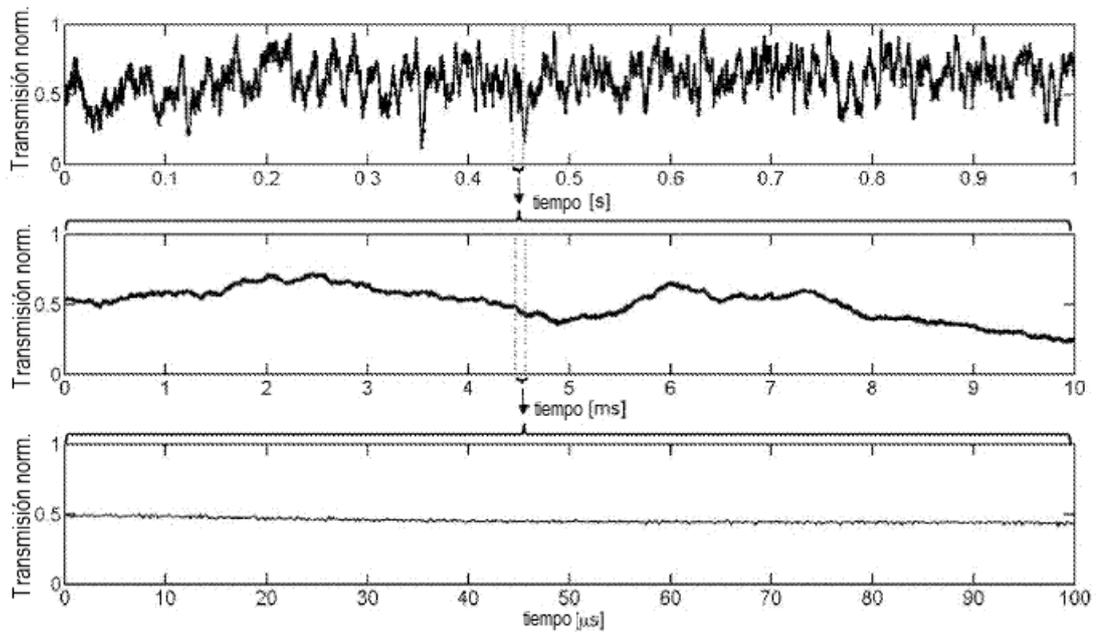


Fig. 4

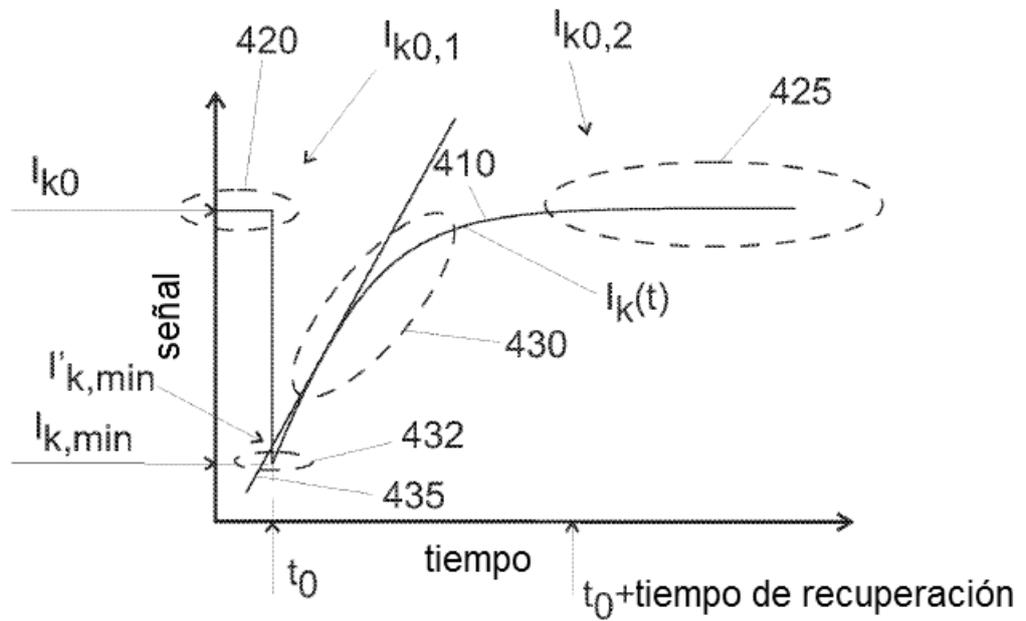
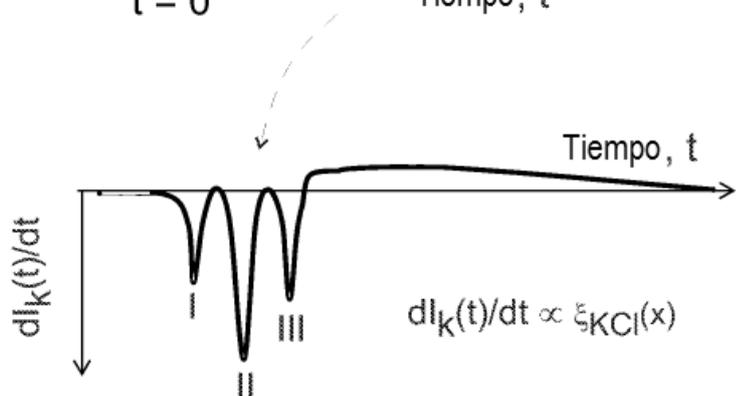
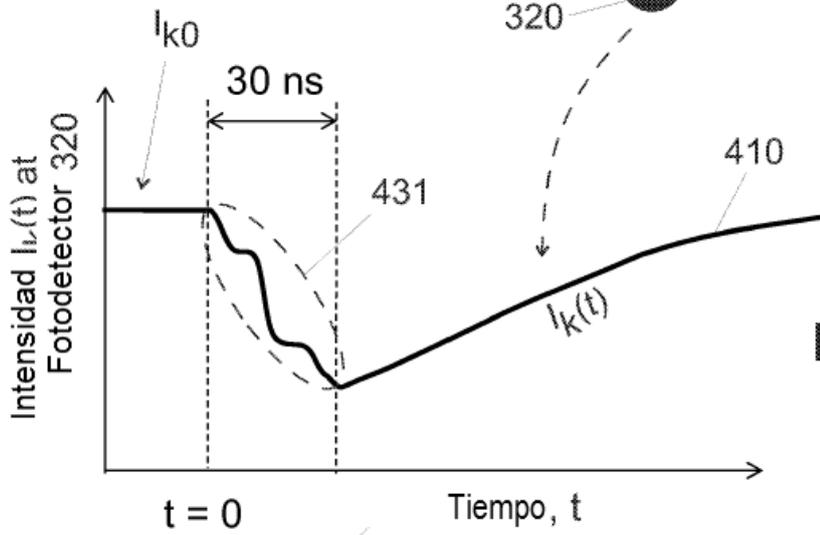
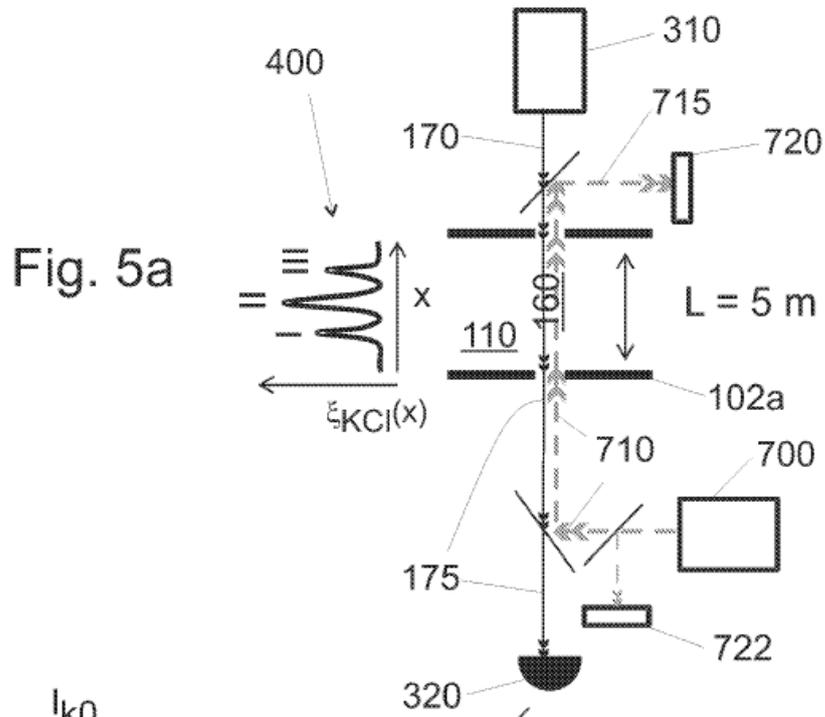
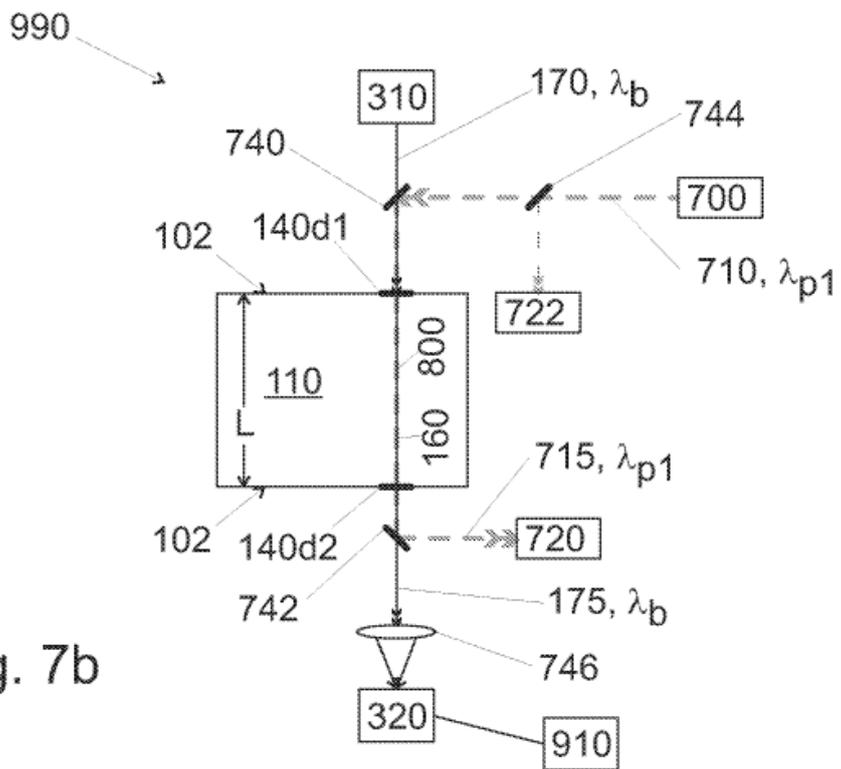
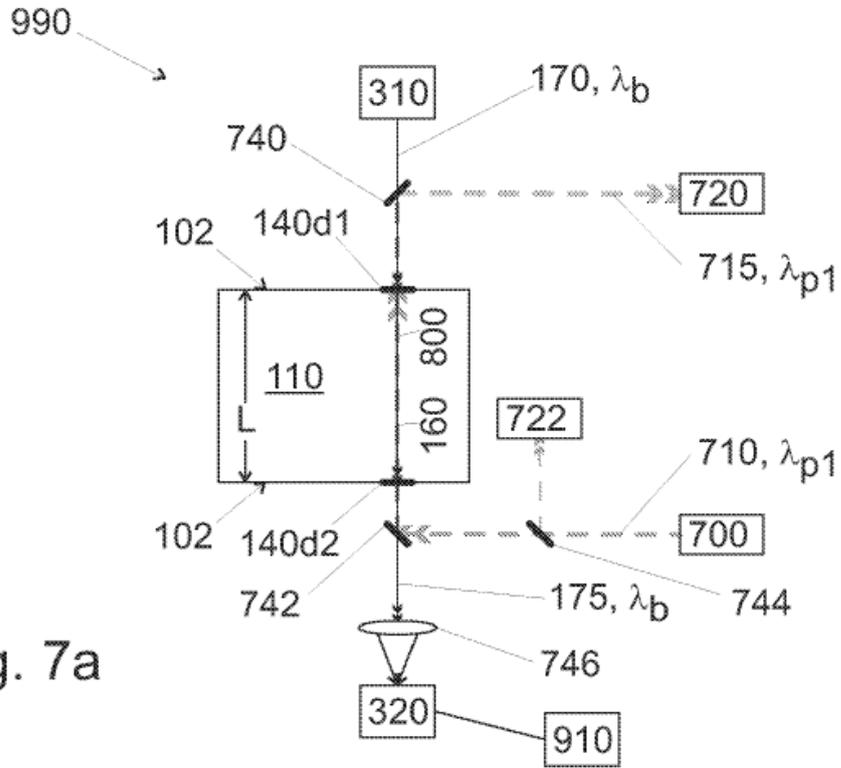
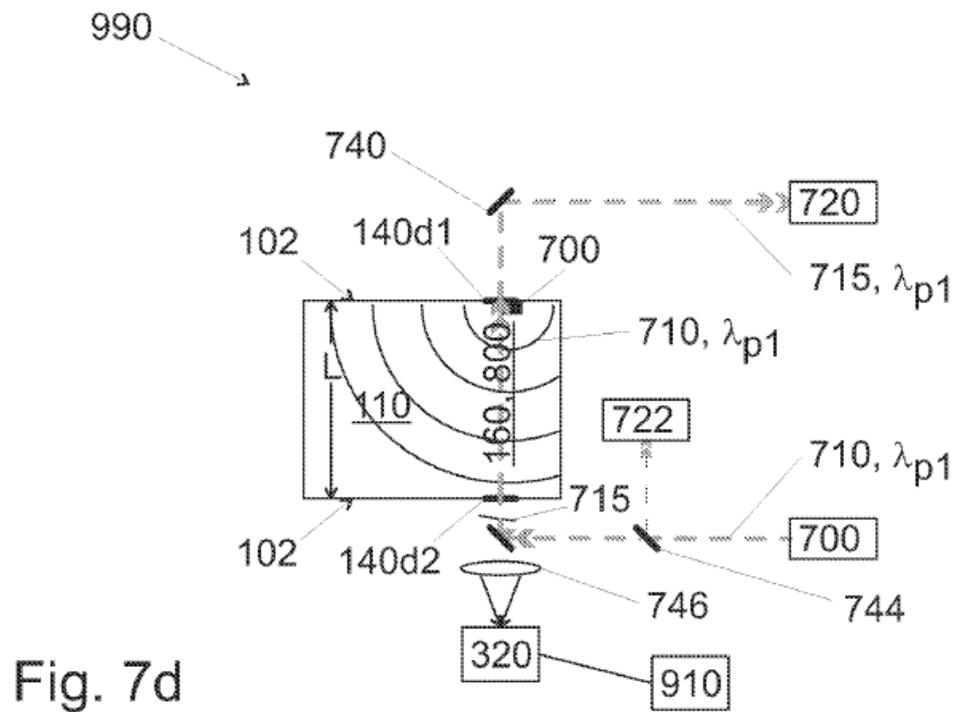
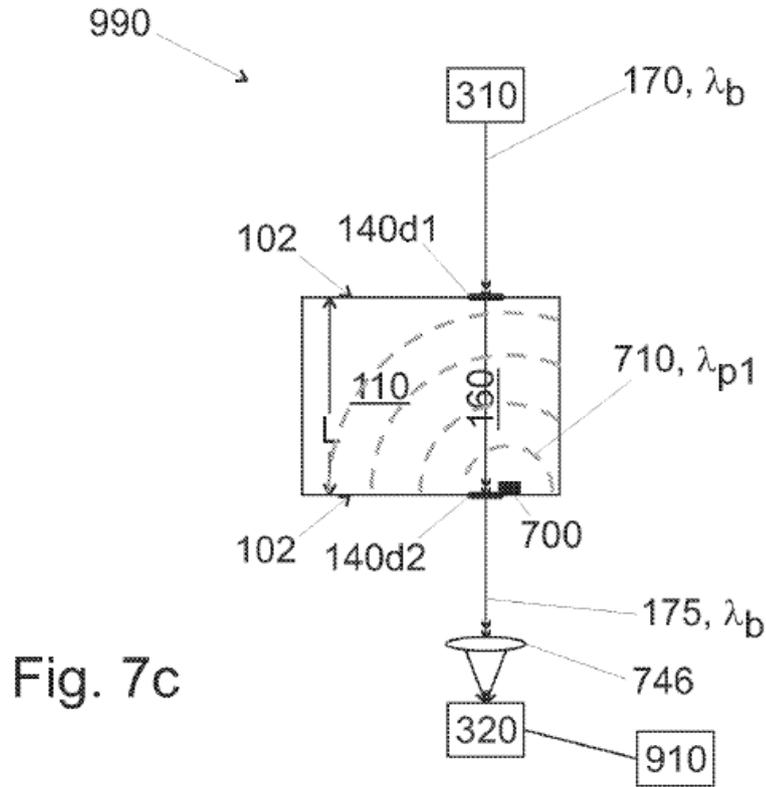
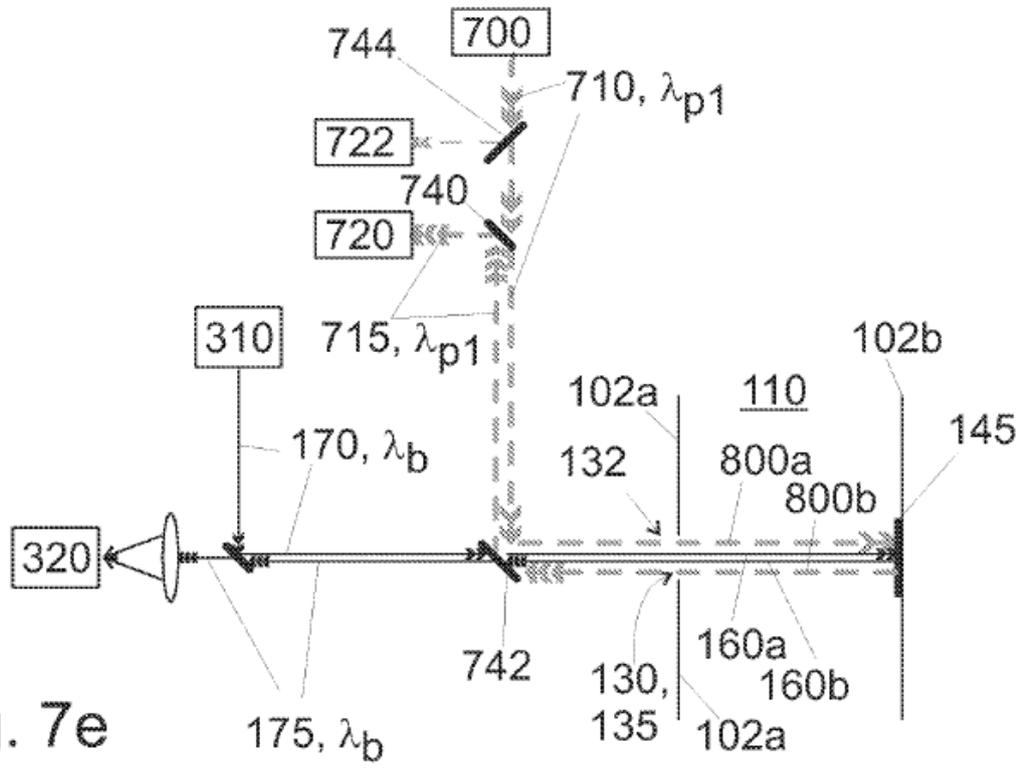


Fig. 6









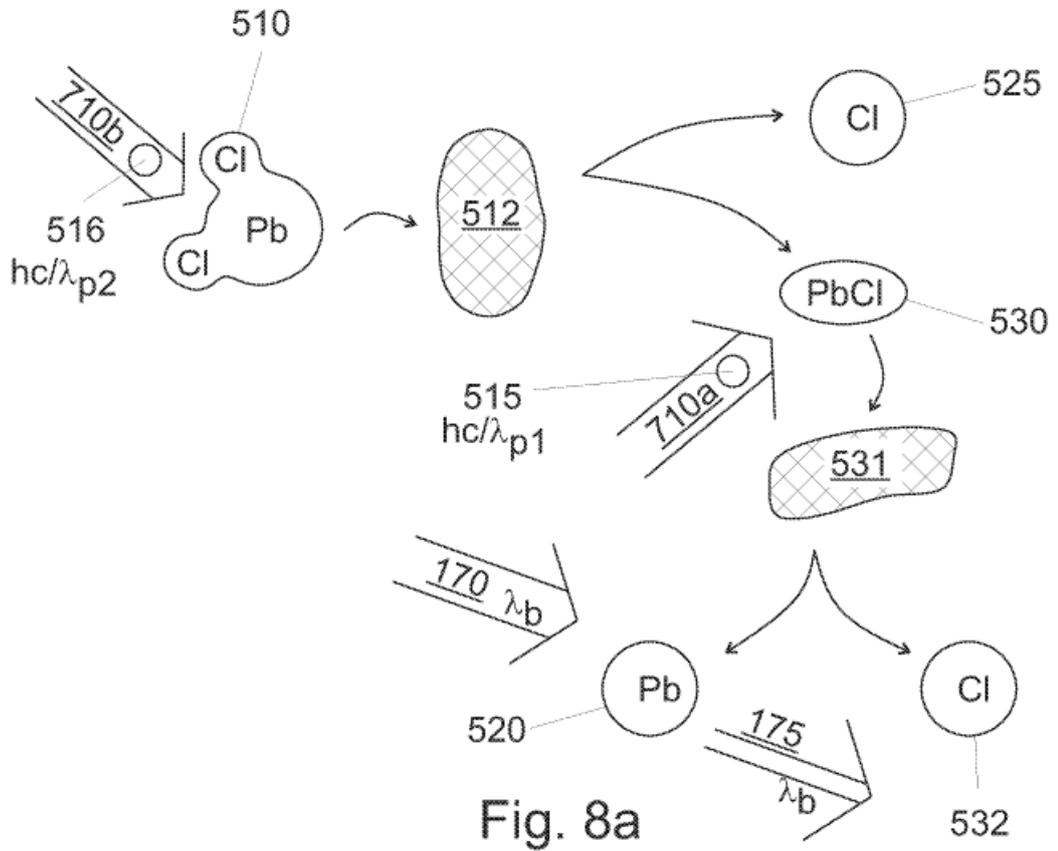


Fig. 8a

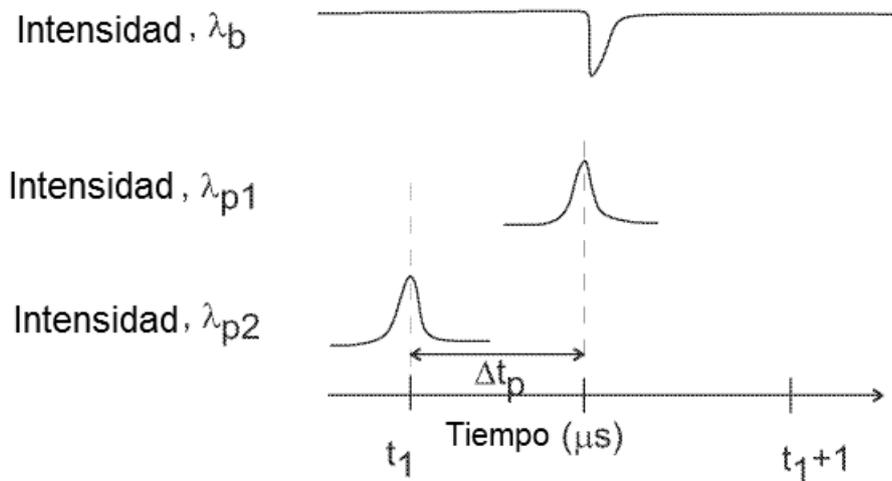
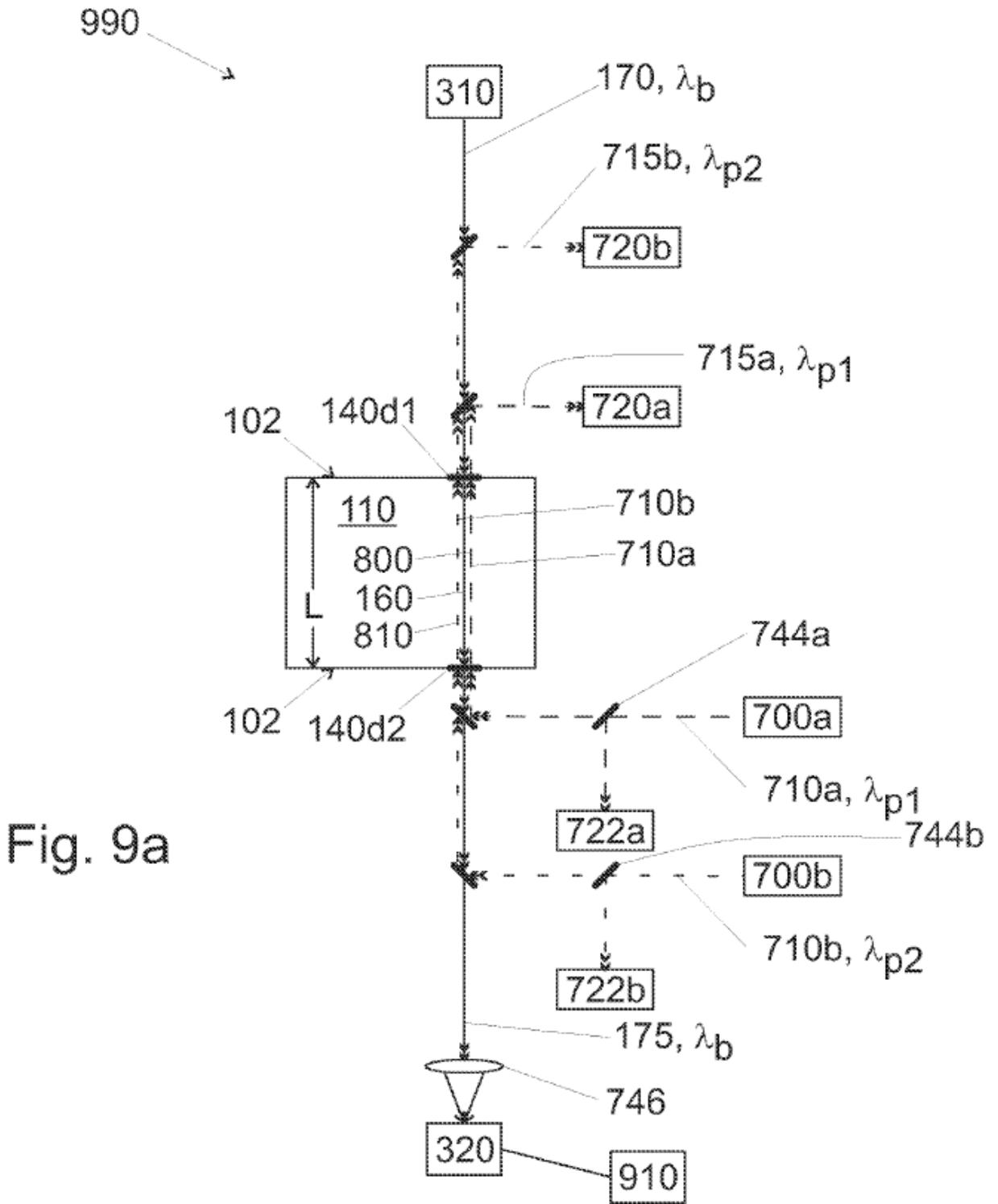
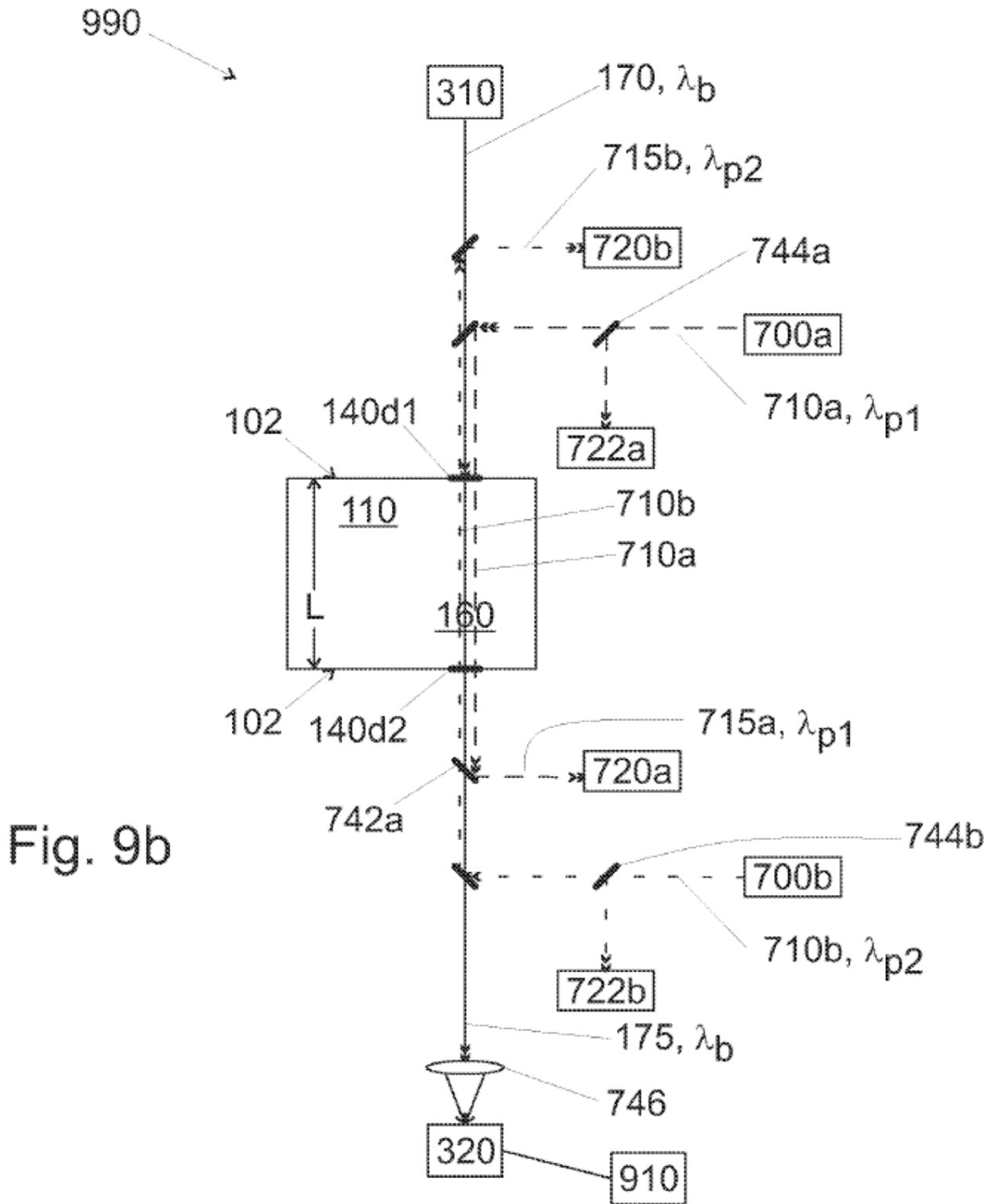


Fig. 8b





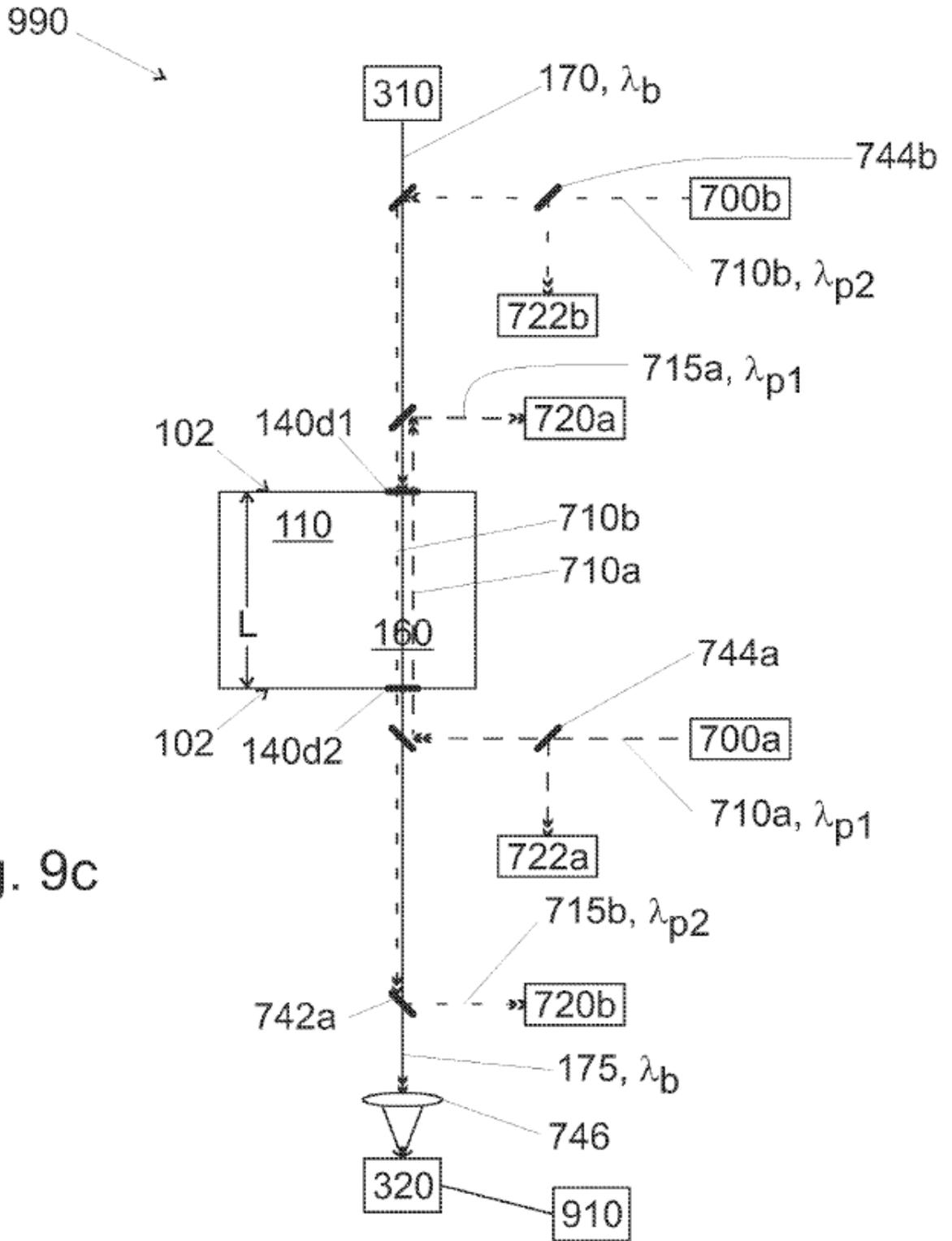


Fig. 9c

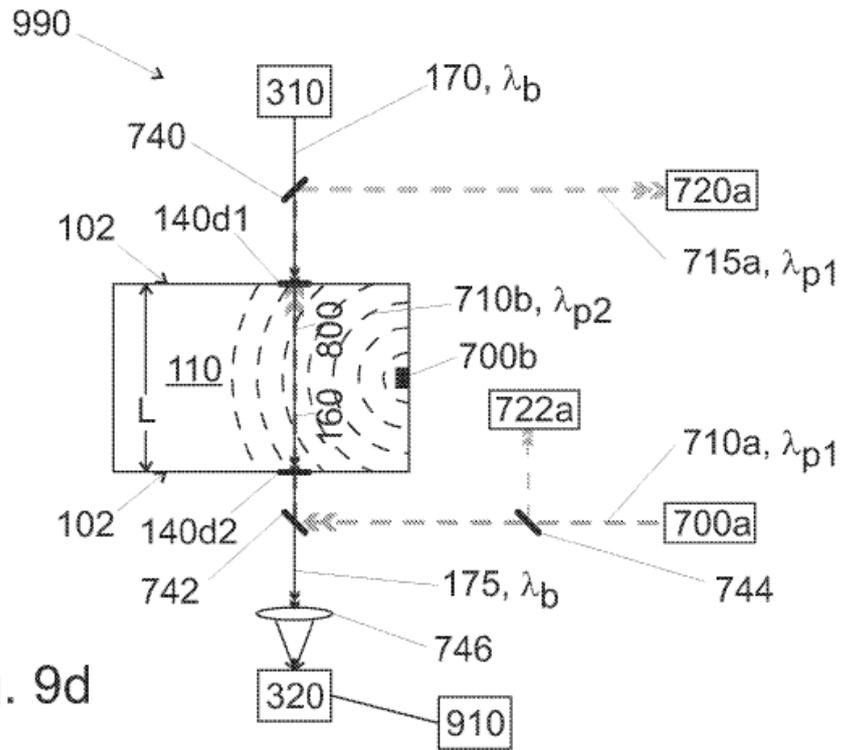


Fig. 9d

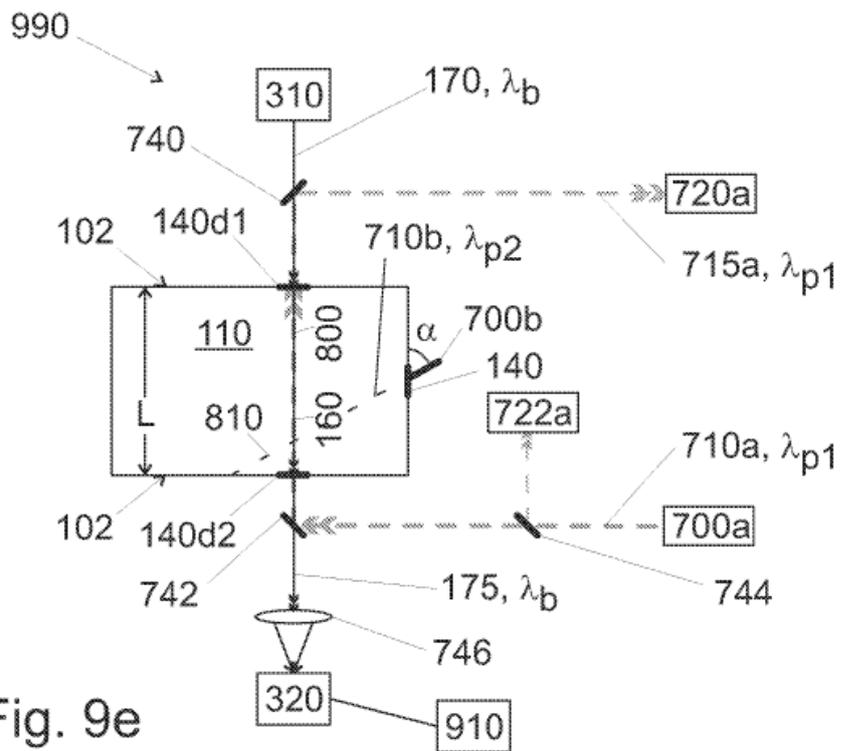


Fig. 9e

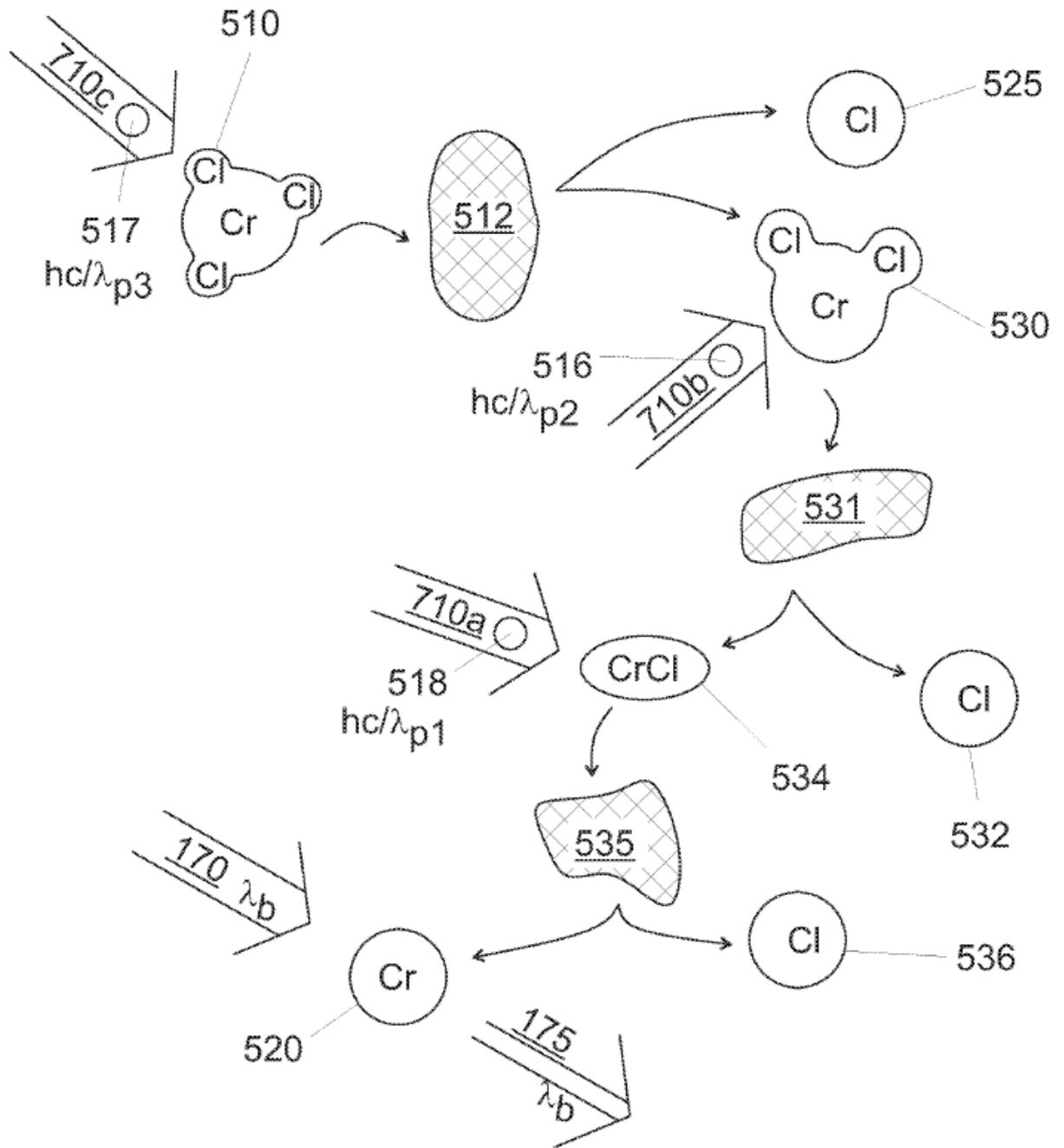


Fig. 10

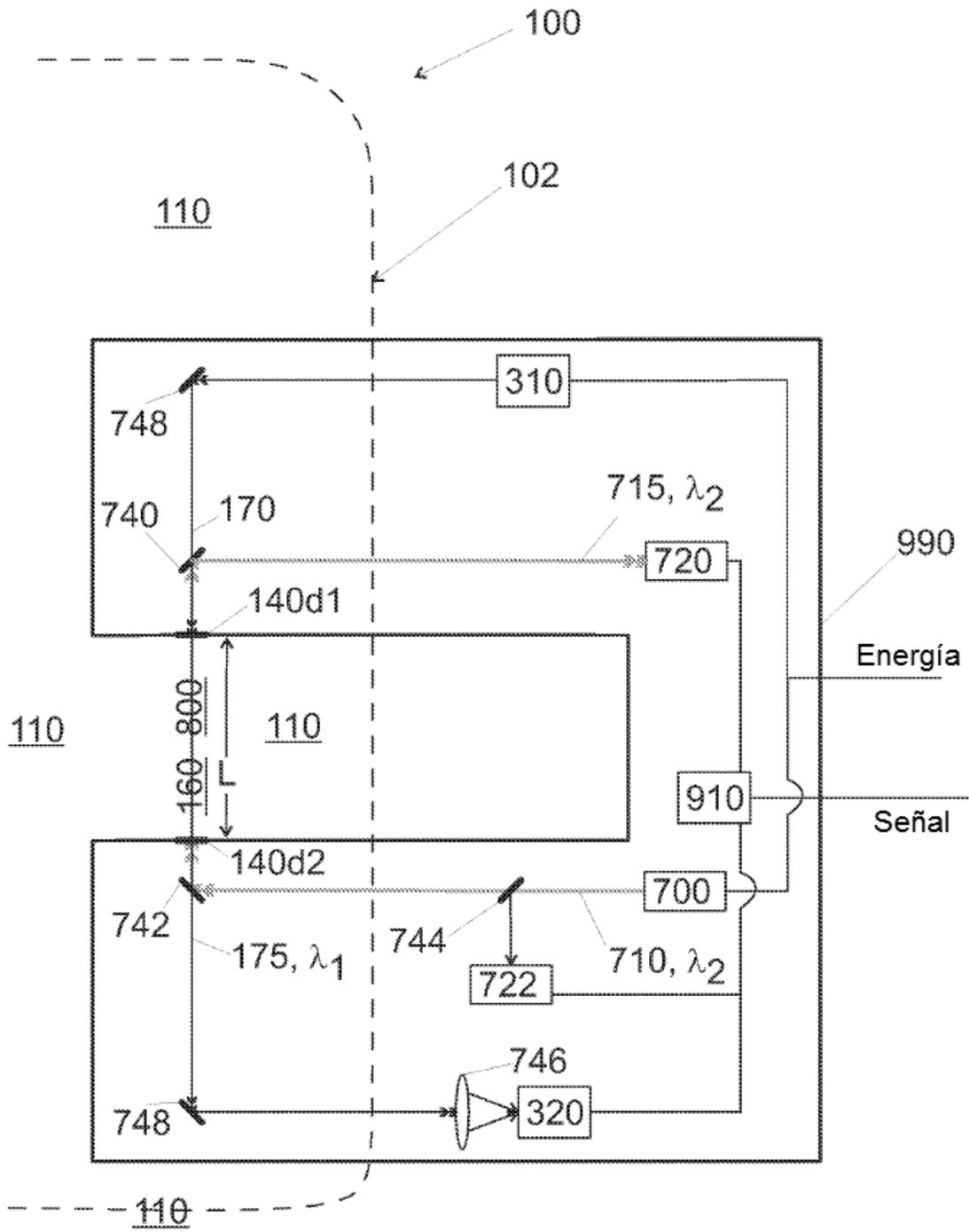


Fig. 11a

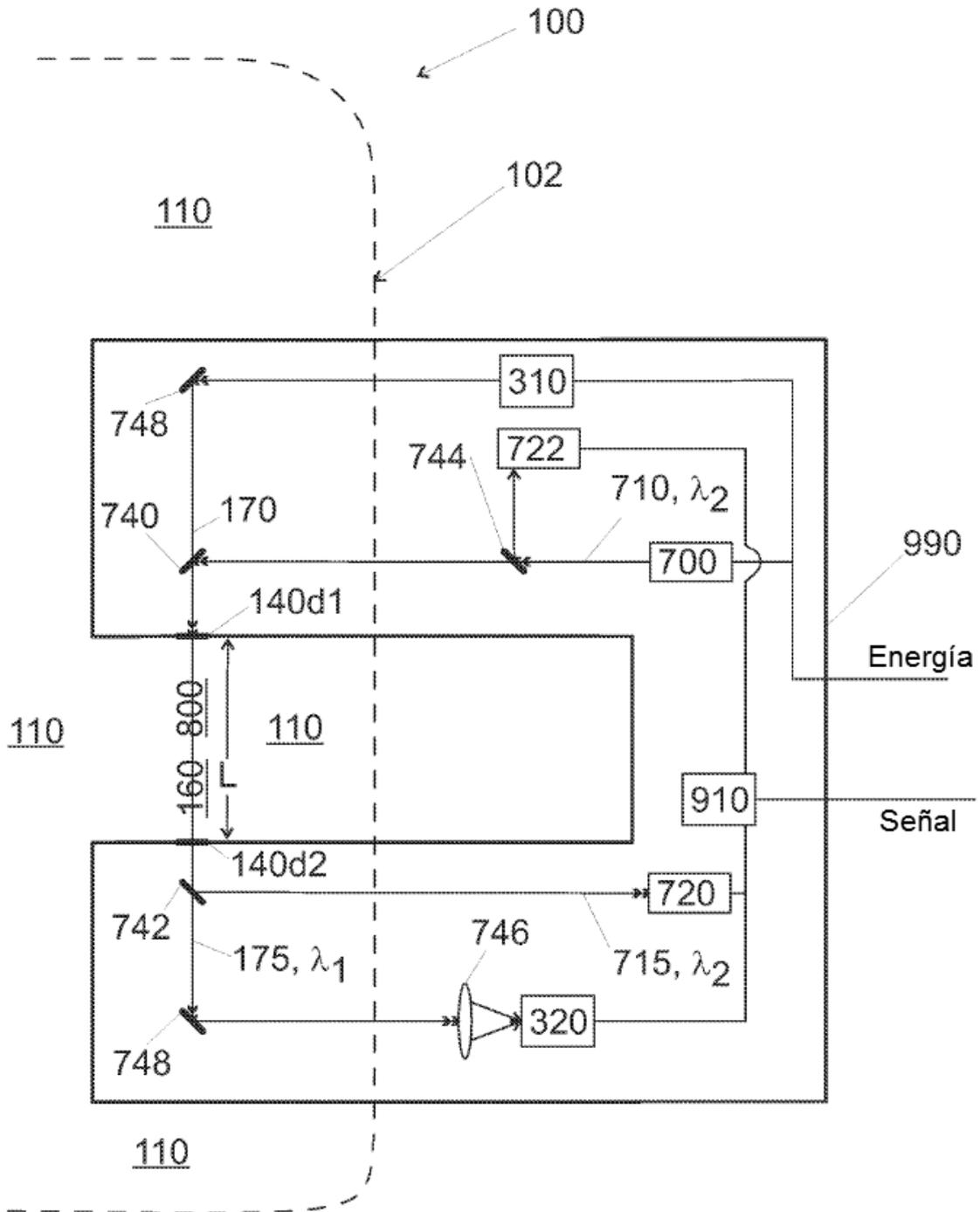
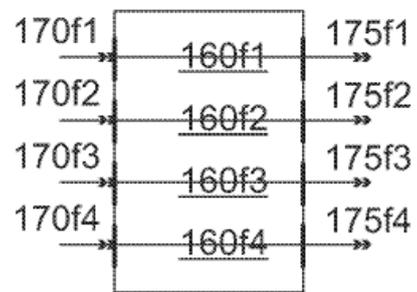
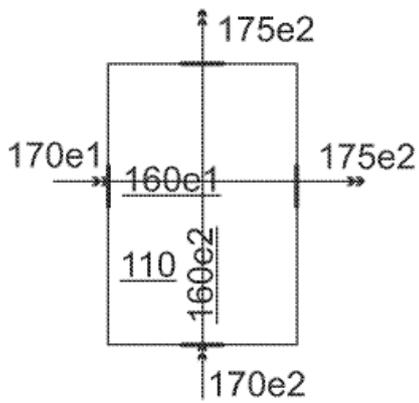
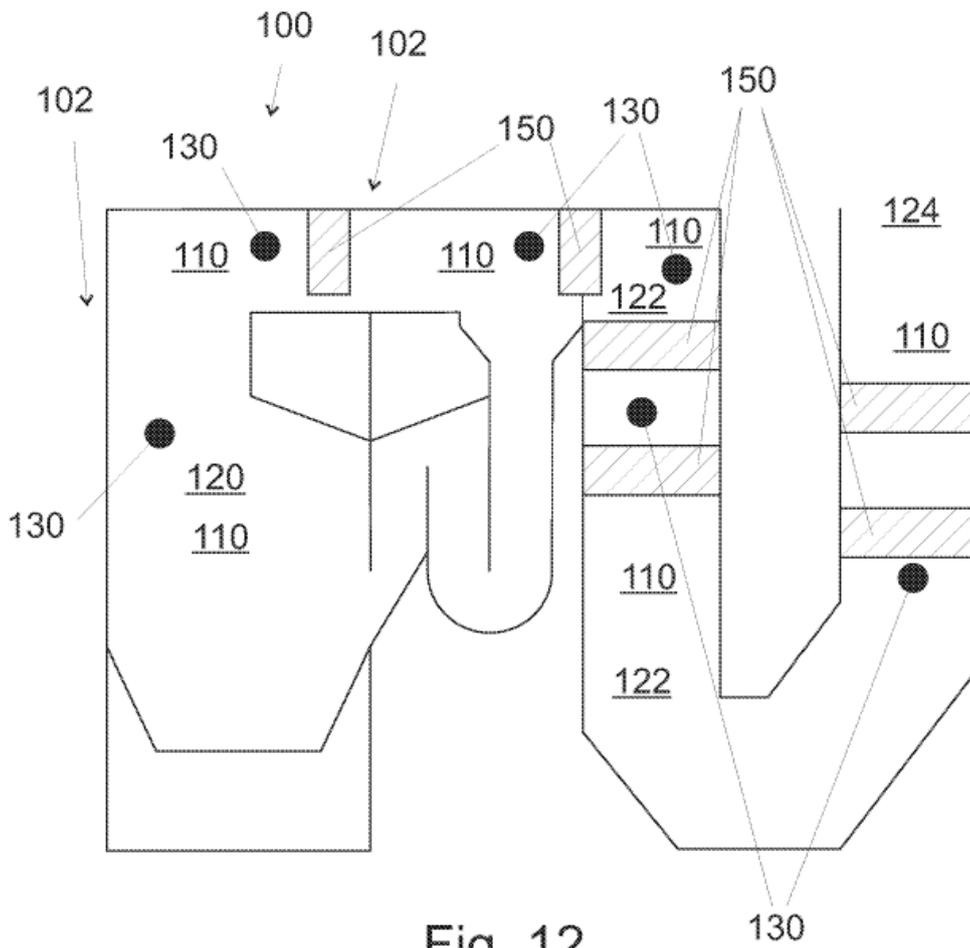


Fig. 11b



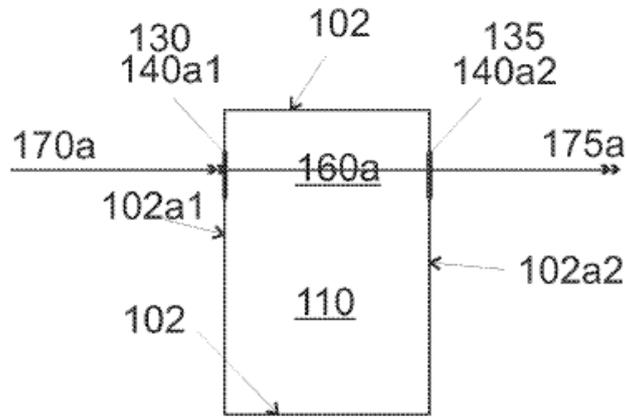


Fig. 13a

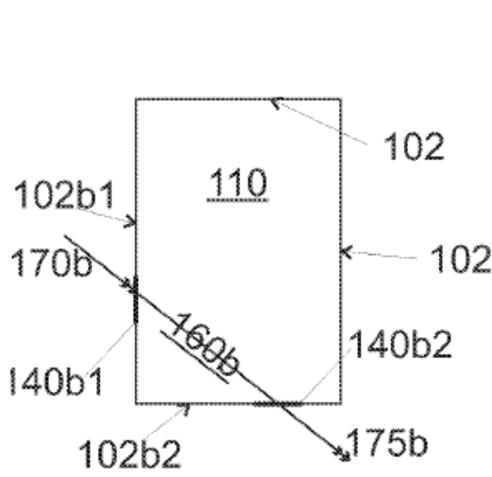


Fig. 13b

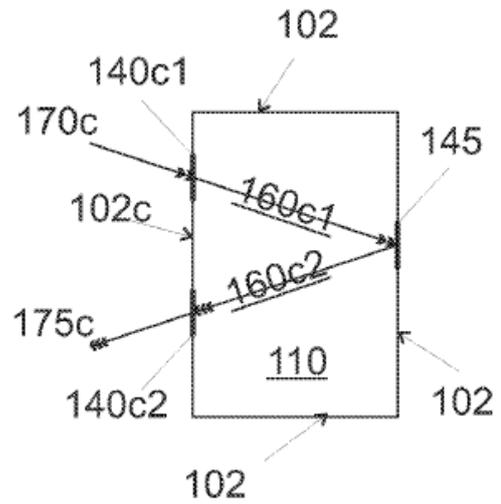


Fig. 13c

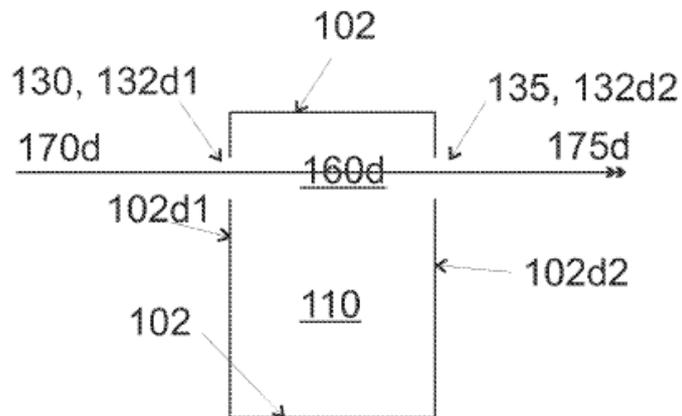


Fig. 13d