



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 102 00 029 B4** 2007.01.18

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **102 00 029.8**
(22) Anmeldetag: **03.01.2002**
(43) Offenlegungstag: **22.08.2002**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **18.01.2007**

(51) Int Cl.⁸: **G01N 21/39** (2006.01)
G01N 21/61 (2006.01)
H01S 3/102 (2006.01)
G01J 3/42 (2006.01)

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 2 Patentkostengesetz).

(66) Innere Priorität:

101 00 185.1 **04.01.2001**

(73) Patentinhaber:

Toschek, Peter E., Prof. Dr., 20149 Hamburg, DE

(72) Erfinder:

Baev, Valerie M., Priv.-Doz. Dr., 22559 Hamburg, DE; Stark, Arnold, Dipl.-Phys., 20259 Hamburg, DE; Toschek, Peter E., Prof. Dr., 20149 Hamburg, DE

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

DE 37 18 908 C1
US 58 41 533 A
US 40 19 056 A
US 38 93 771 A

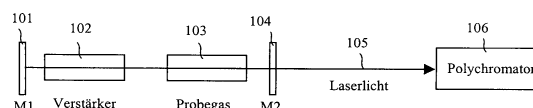
EP 09 23 798 B1

WO 00/20 844 A1

WHITE, J.U.: Long optical paths of large aperture, J. Opt. Soc. Am. 32, 285-288 (1942);
O'KEEFE, A. et al: Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources, Rev. Sci. Instrum., 59, 2544-2551 (1988);
BAEV, V.M. et al: Laser intracavity absorption spectroscopy, Appl. Phys. B69, 171-202 (1999);
SIGRIST (Ed.), M.W.: Air Monitoring by Spectroscopic Techniques, (Wiley, New York, 1994), S. 163-180;
LATZ, T. et al: External photoacoustic detection of a trace vapour inside a multimode laser, Appl. Opt. 38, 2625-2629 (1999);

(54) Bezeichnung: **Höchstempfindlicher Gasdeteaktor**

(57) Hauptanspruch: Höchstempfindlicher Gasdeteaktor, mittels eines Vielmodenlasers, in dessen Resonator das nachzuweisende Gas einbringbar ist, so dass dessen Lichtemission mit dem Absorptionsspektrum des Gases kodiert ist, und mit einer externen, vorzugsweise photoakustischen Nachweis-Zelle, vorzugsweise mit einem phasenempfindlichen Gleichrichter und einem Ausgabegerät zur Messung des Absorptionssignals oder der Gaskonzentration, gekennzeichnet durch
eine Modulationseinrichtung zum Modulieren des Emissionsspektrums des Lasers und/oder der Absorption des Probegases im Resonator und/oder in der externen Zelle und
eine Einrichtung zur Aufnahme des Messsignals auf der Modulationsfrequenz



Beschreibung

[0001] Eine der wichtigsten Methoden zum Nachweis von Spurengasen ist die Absorptionsspektroskopie. Bei dieser Methode wird die Veränderung des Spektrums von Licht nach dessen Durchgang durch den Absorber gemessen. Das Transmissionsspektrum $I(\omega)$ enthält Information über den Absorptionskoeffizienten $\kappa(\omega)$ des Probegases gemäß dem Lambert-Beerschen Gesetz: $I(\omega) = I_0(\omega)\exp[-\kappa(\omega)l]$, wobei l die Länge der Absorptionszelle ist. Der Absorptionskoeffizient wird durch die Konzentration der Absorbiererteilchen n und deren Absorptionsquerschnitt $\sigma(\omega)$ bestimmt: $\kappa(\omega) = n\sigma(\omega)$. Die Messung des Absorptionssignals $K = \ln(I_0/I) \equiv (I_0 - I)/I_0$ erlaubt bei bekanntem Querschnitt und bekannter Absorptionslänge die Konzentration des Probegases zu bestimmen: $n = K/\sigma l$. Die geringste nachweisbare Konzentration wird dabei durch die Länge des Absorptionsweges (Systemempfindlichkeit) und durch die kleinste nachweisbare relative Abschwächung des Lichtes $(I_0 - I)/I_0$ (Nachweisgrenze) bestimmt. Die geringste nachweisbare Konzentration kann durch die Erhöhung der Systemempfindlichkeit und durch die Verminderung der Nachweisgrenze reduziert werden.

Stand der Technik

[0002] Die Systemempfindlichkeit wurde bisher z.B. durch die Verwendung von Vielfachreflexionszellen [1] oder passiven optischen Resonatoren erhöht („cavity ringdown spectroscopy“) [2]. Bei diesen Methoden beträgt die erreichbare effektive Absorptionslänge einige Kilometer. Sie wird durch Lichtverluste an den Spiegeln begrenzt. Noch höhere Systemempfindlichkeit wird durch die Verwendung von aktiven optischen Resonatoren erreicht (ICAS – Intracavity Laser Absorption Spectroscopy) [3], wie auf dem Bild 1 dargestellt. Bei diesem Verfahren befindet sich der Probegas (**103**) im Resonator eines Vielmodenlasers. Die breitbandigen Lichtverluste an den Resonatormiegeln (**101**) und (**104**) werden dabei durch den Laserverstärker (**102**) ausgeglichen, die schmalbandigen Absorptionslinien des Probegases dagegen nicht. Die Laseremission (**105**) wird spektral analysiert, z.B. mit Hilfe eines Polychromators (**106**), und das Absorptionssignal wird im Emissionsspektrum des Lasers nachgewiesen. Die effektive Absorptionslänge ergibt sich aus dem Produkt der ungestörten Dauer der Laseremission und der Lichtgeschwindigkeit. Die bisher höchste effektive Absorptionslänge wurde mit einem Farbstofflaser erreicht und beträgt ca. 70000 km [3].

[0003] Die Nachweisgrenze des Absorptionssignals im Laser-Emissionsspektrum lässt sich durch Unterdrückung des Rauschens herabsetzen. Eine Methode, die sich dafür eignet, lässt sich aus dem Verfahren der photoakustischen Spektroskopie ableiten [4]. Bei der photoakustischen Spektroskopie wird ein La-

ser (**101**, **102**, **104**) auf ein Wellenlängengebiet mit möglichst starker Absorption des Probegases eingestellt und mit Hilfe z.B. eines Unterbrechers (**207**) moduliert (Bild 2). Anschließend durchquert das Laserlicht eine Zelle (**203**), die mit dem Probegas gefüllt und mit einem Mikrophon (**208**) ausgestattet ist. Absorption von Laserlicht in der Probezelle erhöht periodisch die Gastemperatur und erzeugt eine Schallwelle, die mit dem Mikrophon nachgewiesen wird. Mit entsprechender Eichung kann das Mikrophonsignal zur Messung der Konzentration des Probegases benutzt werden.

[0004] Bild 3 zeigt die Kombination der beiden Verfahren: Spektroskopie im Laser-Resonator und photoakustische Spektroskopie. Diese Kombination erlaubt gleichzeitig die Erhöhung der Systemempfindlichkeit und die Reduzierung der Nachweisgrenze [5]. Bei dieser Kombination wird das nachzuweisende Gas (**103**) in den Resonator eines Vielmodenlasers eingebracht; dessen Lichtemissionsspektrum wird daher mit dem Absorptionsspektrum des Gases markiert. Das emittierte Laserlicht (**105**) wird mit Hilfe eines Unterbrechers moduliert und durchquert anschließend die externe photoakustische Zelle (**303**), die mit dem Probegas in hoher Konzentration gefüllt ist. Als Folge der im Bereich von Absorptionslinien des Probegases – und nur dort – verringerten spektralen Leistung des Lasers wird das photoakustische Signal reduziert. Diese Abnahme des photoakustischen Signal wird für die Bestimmung der Gaskonzentration in der Probezelle im Laser-Resonator verwendet.

[0005] Die Nachteile dieses bekannten Verfahrens [5] sind erhöhtes Rauschen durch Aufheizen der Fenster und Wände der Probezelle, durch Instabilität des Emissionsspektrums, und durch Bewegungsgeräusche des Unterbrechers, ferner der mechanische Verschleiß des Unterbrechers.

Aufgabenstellung

[0006] Um diese Nachteile zu beseitigen, werden statt der Laserleistung entweder das Emissionsspektrum des Lasers, z.B. mit Hilfe einer Vorrichtung zur Einstellung und Modulation des Spektrum (**409**), oder die Absorption des Probegases im Resonator moduliert, und das Mikrophonsignal wird auf der Modulationsfrequenz vorzugsweise phasenempfindlich aufgenommen (Bild 4).

Ausführungsbeispiel

[0007] Das Emissionsspektrum des Vielmodenlasers wird auf den Bereich ausgewählter starker Absorptionslinien des Probegases eingestellt und auf diese Einstellung geregelt. Einstellung und Regelung der mittleren spektralen Position der Laseremission erfolgt durch Leistungstabilisierung des Laserstrahls

hinter einem Interferenzfilter (413), das im spektralen Bereich der Einstellung eine steile Transmissionsflanke oder ein schmales Maximum besitzt. Um kontinuierlichen Messbetrieb zu ermöglichen, wird vorzugsweise nur ein Teil des Strahls für die Erzeugung des Stellsignals verwendet, der mit Hilfe eines Strahlteilers (412) abgelenkt wird. Alternativ erfolgt die Leistungstabilisierung des Laserstrahls, der die photoakustische Zelle durchquert hat. Die Leistungstabilisierung erfolgt durch die Regelung des Emissionsspektrums des Lasers mit Hilfe eines Spektrum-Einstellers (409), so daß das elektrische Stellsignal (415) aus dem Photodetektor (414) auf einem vorgegebenen Wert konstant gehalten wird. Der andere Teil des Laserstrahls durchquert die externe photoakustische Zelle (303).

[0008] Die spektrale Lage der Laseremission (Sollbereich) wird durch Änderung des Winkels zwischen Interferenzfilter (413) und Laserstrahl gesteuert. Zusätzlich zur stabilisierten Einstellung der Mitte des Laserspektrums auf einen bestimmten Wert erfolgt Modulation um diesen Wert (Wellenlängenmodulation) mit Hilfe des Spektrum-Einstellers (409). Die Einstellung und Modulation (409) des Emissionsspektrums des Lasers können z.B. durch Verschiebung und Modulation der Lage einer als dispersives Element wirkenden Linse im Laser-Resonator erfolgen [6]. Die Verschiebung und Modulation der Lage der Linse im Laser-Resonator kann auf elektromagnetische Weise, z.B. durch Befestigung der Linse an einer elektromagnetisch bewegten Lautsprechermembran, oder piezoelektrisch erfolgen.

[0009] Alternativ zur Wellenlängen-Modulation kann das Absorptionssignal des Probegases amplitudenmoduliert werden, z.B.

- durch Modulation der Konzentration des Gases im Laser-Resonator mit Hilfe von kontinuierlichem Abpumpen des Gases aus dem Resonatorvolumen oder aus einer internen Probezelle (411), verbunden mit periodischer gepulster Injektion des Probegases (410).
- durch periodische spektrale Verschiebung der Absorptionslinien des Probegases durch den Zeeman-Effekt eines angelegten modulierten Magnetfeldes im Volumen des Probegases oder durch den Stark-Effekt bei Verwendung eines modulierten elektrischen Feldes im Volumen des Probegases

[0010] Alternativ oder zusätzlich zur Modulation des Absorptionssignals im Laser-Resonator kann auch das Absorptionssignal in der photoakustischen Zelle moduliert werden. In diesem Fall wird das Meßsignal auf der Summen- oder Differenzfrequenz erzeugt („Inter-Modulation“)

[0011] Da im vorgeschlagenen Verfahren die gesamte Laserleistung in der photoakustischen Zelle

nahezu konstant bleibt, werden die Störsignale durch Aufheizen der Fenster und Wände der Probezelle unmoduliert bleiben und daher nicht zum Messsignal beitragen.

[0012] Zur weiteren Verminderung der Nachweisgrenze kann eine photoakustische Zelle verwendet werden, die Mehrfachdurchgang des Laserstrahls durch diese Zelle erlaubt.

[0013] Zur Messung der Konzentrationen verschiedener Gaskomponenten können mehrere photoakustische Zellen im Laserstrahl in Reihe angeordnet sein.

[0014] Anstatt der photoakustischen Zelle kann auch eine Fluoreszenzzelle oder eine optogalvanische Zelle entsprechend verwendet werden.

[0015] Als Verstärker des Vielmodenlasers kann ein mit Seltenen Erden, Übergangsmetallen oder Farbzentren dotierter Festkörper, eine mit Seltenen Erden dotierte Faser, ein Halbleiter oder ein Farbstoff verwendet werden.

[0016] Ein Ausführungsbeispiel zur Messung geringer Konzentration von Wasserdampf zeigt Bild 5. In diesem Beispiel wird Wasserdampf in den Resonator (503) eines Tm^{3+} -dotierten Vielmoden-Faserlasers (502) eingebracht. Das Emissionsspektrum des Faserlasers überlappt mit starken Absorptionslinien von Wasserdampf im Wellenlängenbereich von 1,82 μm bis 1,92 μm . Dies erlaubt empfindlichen Nachweis geringer Konzentrationen von Wasserdampf im Laser-Resonator.

[0017] Der thulium-dotierte Faser-Laser wird mit der Emission eines Diodenlasers (516) bei der Emissionswellenlänge 785 nm optisch angeregt. Der Diodenlaser wird mit einem stabilisierten elektrischen Strom (518) von etwa 100 mA betrieben, der mit einem Diodenlaser-Treibergerät (517) erzeugt wird. Die Diodenlaser-Emission (519) wird mit einer asphärischen Linse (520) kollimiert und mit einer zweiten asphärischen Linse (521) durch den ersten Resonatorspiegel (501), der auf der Faserstirnfläche aufgedampft ist in die Glasfaser eingekoppelt. Die andere Stirnfläche der Faser (522) ist für den spektralen Bereich von 1,7 μm bis 2 μm entspiegelt und vakuumdicht in die Probezelle (503) gekoppelt. Der zweite Resonatorspiegel (504) wird justierbar und vakuumdicht an der anderen Seite der Probezelle befestigt. Die asphärische Kollimationslinse (509) fokussiert den aus der Faser austretenden Strahl auf den zweiten Resonatorspiegel (504). Diese Linse wird auf einer elektromagnetisch angesteuerten (524) Lautsprechermembran (523) befestigt.

[0018] Der Ausgangsstrahl (105) des Lasers wird mit Hilfe eines Strahlteilers (412) in zwei Strahlen ge-

teilt. Der schwächere Strahl beleuchtet die Photodiode (414) hinter einem Interferenzfilter (413), das an der gewünschten spektralen Position der Mitte der Laseremission eine steile Transmissionsflanke hat. Das Signal der Photodiode wird zur Normierung des Ausgabesignals (529) und zur Einstellung und Regelung des Emissionsspektrums (528) mit Hilfe der Regелеlektronik (526) benutzt.

[0019] Der andere Teil des Laserstrahles durchquert die photoakustische Zelle (303), die mit dem Probegas in hoher Konzentration gefüllt und mit einem Mikrophon (208) ausgestattet ist. Absorption von Laserlicht in der Probezelle erhöht periodisch die Gastemperatur und erzeugt eine Schallwelle, die mit dem Mikrophon (208) gemessen werden kann. Um das akustische Signal zu erhöhen, ist in dem Strahlengang der photoakustischen Zelle ein Rohr (530) mit schmaler akustischer Resonanz auf der Frequenz 2 kHz eingebaut. Zur weiteren Erhöhung des akustischen Signals können in der Mitte des Resonanzrohr mehrere Mikrophone eingebaut und parallel geschaltet werden. Als Folge der im Bereich von Absorptionslinien des Probegases – und nur dort – verringerten spektralen Leistung des Lasers wird das photoakustische Signal reduziert. Diese Abnahme des photoakustischen Signals wird für die Bestimmung der Gaskonzentration in der Probezelle im Laser-Resonator verwendet.

[0020] Das Mikrophonsignal (531) wird mit Hilfe der Signalelektronik (532) phasenempfindlich aufgenommen. Die Signalelektronik enthält einen phasenempfindlichen Gleichrichter und einen Referenzoszillator. Das Signal des Referenzoszillators (528) wird zur Ansteuerung der Modulation des Emissionsspektrums des Lasers verwendet. Das Ausgangssignal (533) der Signalelektronik wird auf die Laser-Leistung normiert (529) und mit Hilfe eines Ausgabegeräts (534) angezeigt. Dieses Signal wird für die Bestimmung der Gaskonzentration in der Probezelle im Laser-Resonator verwendet.

[0021] Die minimal nachweisbare Konzentration von Wasserdampf mit einem solchem Gerät beträgt nach den gegenwärtigen Möglichkeiten der Realisierung etwa 1 ppb.

Referenzen

1. J. U. White, "Long optical paths of large aperture", J. Opt. Soc. Am. 32, 285–288 (1942).
2. A. O'Keefe and D. A. G. Deacon, "Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources", Rev. Sci. Instrum., 59, 2544–2551 (1988).
3. V. M. Baev, T. Latz, P. E. Toschek, "Laser intracavity absorption spectroscopy", Applied Physics B69, 171–202 (1999).
4. M. W. Sigrist (Ed.), Air Monitoring by Spectroscopic

Techniques, (Wiley, New York, 1994), s. 163–180.

5. T. Latz, G. Weirauch, V. M. Baev, and P. E. Toschek, "External photoacoustic detection of a trace vapour inside a multimode laser", Appl. Opt. 38, 2625–2629 (1999).

6. P. E. Toschek, V. M. Baev, R. Böhm, Diodenlaser-gepumpter Vielmoden-Wellenleiterlaser, insbesondere Faserlaser", Europäische Patentschrift EP 0923798 B1.

Patentansprüche

1. Höchstempfindlicher Gasdetektor, mittels eines Vielmodenlasers, in dessen Resonator das nachzuweisende Gas einbringbar ist, so dass dessen Lichtemission mit dem Absorptionsspektrum des Gases kodiert ist, und mit einer externen, vorzugsweise photoakustischen Nachweis-Zelle, vorzugsweise mit einem phasenempfindlichen Gleichrichter und einem Ausgabegerät zur Messung des Absorptionssignals oder der Gaskonzentration, gekennzeichnet durch eine Modulationseinrichtung zum Modulieren des Emissionsspektrums des Lasers und/oder der Absorption des Probegases im Resonator und/oder in der externen Zelle und eine Einrichtung zur Aufnahme des Messsignals auf der Modulationsfrequenz

2. Höchstempfindlicher Gasdetektor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Emissionsspektrum des Vielmodenlasers auf den Bereich ausgewählter starker Absorptionslinien des Probegases eingestellt und auf diese Einstellung geregelt wird.

3. Höchstempfindlicher Gasdetektor nach einem der Ansprüche 1–2, dadurch gekennzeichnet, dass Einstellung und Regelung des Emissionsspektrums des Lasers erfolgen durch Leistungstabilisierung des Laserstrahls hinter einem Interferenzfilter, das im spektralen Bereich der Einstellung eine steile Transmissionsflanke oder ein schmales Maximum besitzt.

4. Höchstempfindlicher Gasdetektor nach einem der Ansprüche 1–3, dadurch gekennzeichnet, dass die Veränderung des spektralen Messbereiches des Lasers durch Drehung des Interferenzfilters senkrecht zur optische Achse gesteuert wird.

5. Höchstempfindlicher Gasdetektor nach einem der Ansprüche 1–4, dadurch gekennzeichnet, dass die Einstellung und Modulation des Emissionsspektrums des Lasers erfolgt durch Verschiebung und Modulation der Lage einer als dispersives Element wirkenden Linse im Laser-Resonator.

6. Höchstempfindlicher Gasdetektor nach einem der Ansprüche 1–5, dadurch gekennzeichnet, dass die Verschiebung und Modulation der Lage der Linse

im Laser-Resonator auf elektromagnetische Weise erfolgt, z.B. durch Befestigung der Linse an einer elektromagnetisch angesteuerten Lautsprecher-membran.

7. Höchstempfindlicher Gasdetektor nach einem der Ansprüche 1–5, dadurch gekennzeichnet, dass die Verschiebung und Modulation der Lage der Linse im Laser-Resonator piezoelektrisch erfolgt.

8. Höchstempfindlicher Gasdetektor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass zur Messung des Absorptionssignals bzw. der Gaskonzentration eine externe photoakustische Zelle verwendet wird, die Einfach- und/oder Mehrfachdurchgang des Laserstrahls durch diese Zelle erlaubt.

9. Höchstempfindlicher Gasdetektor nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass zur Messung der Konzentrationen verschiedener Gaskomponenten mehrere photoakustische Zellen im Laserstrahl in Reihe angeordnet sind.

10. Höchstempfindlicher Gasdetektor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Absorptionssignal des Probegases amplitudenmoduliert wird durch die Modulation der Konzentration des Gases im Laser-Resonator.

11. Höchstempfindlicher Gasdetektor nach einem der Ansprüche 1 und 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Gaskonzentration moduliert wird mit Hilfe von kontinuierlichem Abpumpen des Gases aus dem Resonatorvolumen oder aus einer internen Probezelle, verbunden mit periodischer gepulster Injektion des Probegases.

12. Höchstempfindlicher Gasdetektor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Absorptionssignal des Probegases spektral moduliert wird durch periodische spektrale Verschiebung der Absorptionslinien des Probegases.

13. Höchstempfindlicher Gasdetektor nach einem der Ansprüche 1 und 12, dadurch gekennzeichnet, dass die spektrale Verschiebung von Absorptionslinien des Probegases erfolgt durch den Zeeman-Effekt eines angelegten modulierten Magnetfeldes im Volumen des Probegases.

14. Höchstempfindlicher Gasdetektor nach einem der Ansprüche 1 und 12, dadurch gekennzeichnet, dass die spektrale Verschiebung von Absorptionslinien des Probegases erfolgt durch den Stark-Effekt bei Verwendung eines modulierten elektrischen Feldes im Volumen des Probegases.

15. Höchstempfindlicher Gasdetektor nach einem der Ansprüche 1, 10 und 12, dadurch gekennzeichnet, dass das Absorptionssignal des Probe-

ses nicht im Laser-Resonator, sondern in der photoakustischen Zelle moduliert wird.

16. Höchstempfindlicher Gasdetektor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Leistung des Vielmodenlasers auf der Frequenz der Laser-Relaxationsschwingungen moduliert ist.

17. Höchstempfindlicher Gasdetektor nach einem der Ansprüche 1–16, dadurch gekennzeichnet, dass anstatt der photoakustischen Zelle eine Fluoreszenzzelle verwendet wird.

18. Höchstempfindlicher Gasdetektor nach einem der Ansprüche 1–16, dadurch gekennzeichnet, dass anstatt der photoakustischen Zelle eine optogalvanische Zelle verwendet wird.

19. Höchstempfindlicher Gasdetektor nach einem der Ansprüche 1–18, dadurch gekennzeichnet, dass die Aufnahmeeinrichtung des Messsignals auf der Modulationsfrequenz eine phasenempfindlichen Einrichtung enthält.

20. Höchstempfindlicher Gasdetektor nach einem der Ansprüche 1–19, dadurch gekennzeichnet, dass eine Festkörper, eine Faser, ein Halbleiter oder ein Farbstoff als aktives Material des Vielmodenlasers verwendet wird.

21. Verfahren zur höchstempfindlichen Gasdetektion, bei welchem das nachzuweisende Gas in einen Resonator eines Vielmodenlasers eingebracht wird, das Absorptionssignal oder die Gaskonzentration mit Hilfe einer externen vorzugsweise photoakustischen Zelle, vorzugsweise mit Hilfe eines phasenempfindlichen Gleichrichters und eines Ausgabegeräts gemessen wird, und das Emissionsspektrum des Lasers und/oder die Absorption des Probegases im Resonator und/oder in der externen Zelle moduliert wird.

22. Verfahren nach Anspruch 21, bei welchem das Emissionsspektrum des Lasers durch Leistungsstabilisation des Laserstrahls eingestellt wird.

23. Verfahren nach Anspruch 22, bei welchem das Einstellen mit Hilfe eines Interferenzfilters durchgeführt wird, das im spektralen Bereich der Einstellung eine steile Transmissionsflanke oder ein schmales Maximum besitzt.

24. Verfahren nach Anspruch 23, bei welchem der spektrale Emissionsbereich des Lasers durch Drehung des Interferenzfilters senkrecht zur optischen Achse gesteuert wird

25. Verfahren nach einem der Ansprüche 21–24, bei welchem die Einstellung und Modulation des

Emissionsspektrums des Lasers durch Verschiebung und Modulation der Lage einer als dispersives Element wirkenden Linse im Laser-Resonator erfolgt.

26. Verfahren nach einem der Ansprüche 21–25, bei welchem die Verschiebung und Modulation der Lage der Linse im Laser-Resonator auf elektromagnetische Weise erfolgt, z.B. durch Befestigung der Linse an einer elektromagnetisch angesteuerten Lautsprechermembran.

27. Verfahren nach einem der Ansprüche 21–25, bei welchem die Verschiebung und Modulation der Lage der Linse im Laser-Resonator piezoelektrisch erfolgt.

28. Verfahren nach Anspruch 21, bei welchem zur Messung des Absorptionssignals bzw. der Gaskonzentration eine externe photoakustische Zelle verwendet wird, die einen Einfach- und/oder Mehrfachdurchgang des Laserstrahls durch diese Zelle erlaubt.

29. Verfahren nach Anspruch 28, bei welchem zur Messung der Konzentrationen verschiedener Gaskomponenten mehrere photoakustische Zellen im Laserstrahl in Reihe angeordnet sind.

30. Verfahren nach Anspruch 21, bei welchem das Absorptionssignal des Probegases durch die Modulation der Konzentration des Gases im Laser-Resonator amplitudenmoduliert wird.

31. Verfahren nach Anspruch 30, bei welchem die Gaskonzentration mit Hilfe von periodischem Abpumpen und/oder Zuführen des Gases im Resonatorvolumen moduliert wird.

32. Verfahren nach Anspruch 31, bei welchem die Zufuhr des Gases durch periodisch gepulste Injektion erfolgt.

33. Verfahren nach Anspruch 21, bei welchem das Absorptionssignal des Probegases durch periodische spektrale Verschiebung der Absorptionslinien des Probegases spektral moduliert wird.

34. Verfahren nach Anspruch 33, bei welchem die spektrale Verschiebung von Absorptionslinien des Probegases durch Anlegen eines modulierten Magnetfeldes im Volumen des Probegases erfolgt.

35. Verfahren nach Anspruch 33, bei welchem die spektrale Verschiebung von Absorptionslinien des Probegases durch Anlegen eines modulierten elektrischen Feldes im Volumen des Probegases erfolgt.

36. Verfahren nach einem der Ansprüche 21, 30 und 33, bei welchem das Absorptionssignal des Pro-

begases allein und/oder in der externen photoakustischen Zelle moduliert wird.

37. Verfahren nach Anspruch 21, bei welchem die Leistung des Vielmodenlasers auf der Frequenz der Laser-Relaxationsschwingungen moduliert ist.

38. Verfahren nach einem der Ansprüche 21–37 bei welchem anstatt der photoakustischen Zelle eine Fluoreszenzzelle verwendet wird.

39. Verfahren nach einem der Ansprüche 21–37 bei welchem anstatt der photoakustischen Zelle eine optogalvanische Zelle verwendet wird.

40. Verfahren nach einem der Ansprüche 21–39, bei welchem das Messsignal auf der Modulationsfrequenz phasenempfindlich aufgenommen wird.

41. Verfahren nach einem der Ansprüche 21–40, bei welchem ein Festkörper, eine Faser, ein Halbleiter oder ein Farbstoff als aktives Material des Vielmodenlasers verwendet wird.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

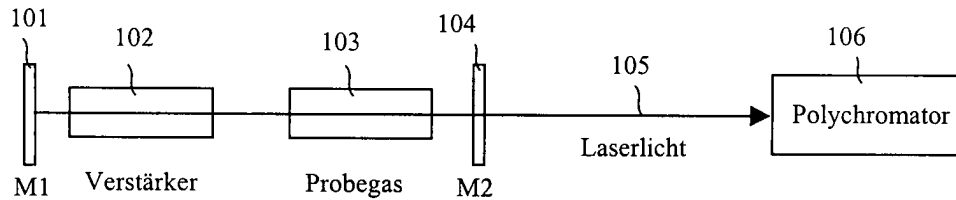


Bild 1. Schematische Darstellung von Absorptionsmessungen im Laser-Resonator (ICAS).

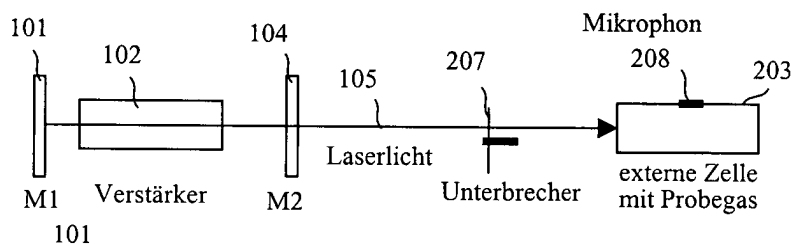


Bild. 2. Photoakustische Spektroskopie.

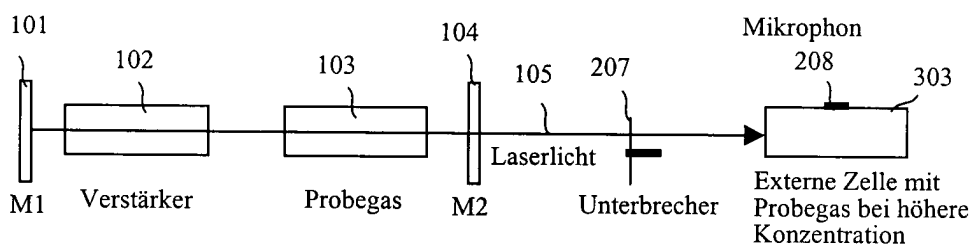


Bild. 3. Absorptionsspektroskopie im Laser-Resonator mit photoakustischen Nachweis außerhalb des Laser-Resonators

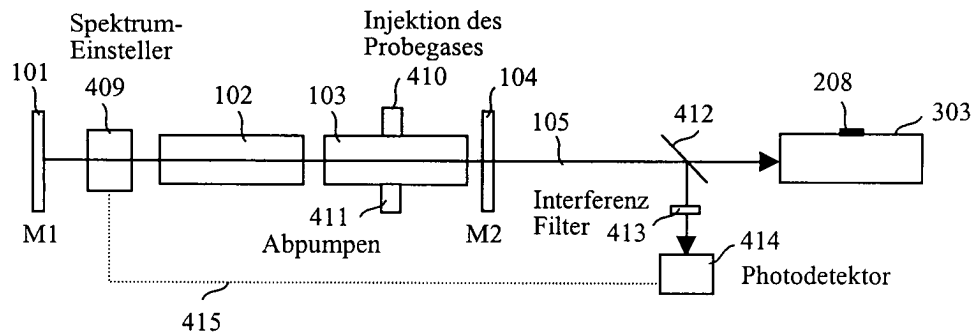


Bild. 4. Verbessertes Verfahren der Absorptionsspektroskopie im Laser-Resonator mit photoakustischem Nachweis außerhalb des Laser-Resonators

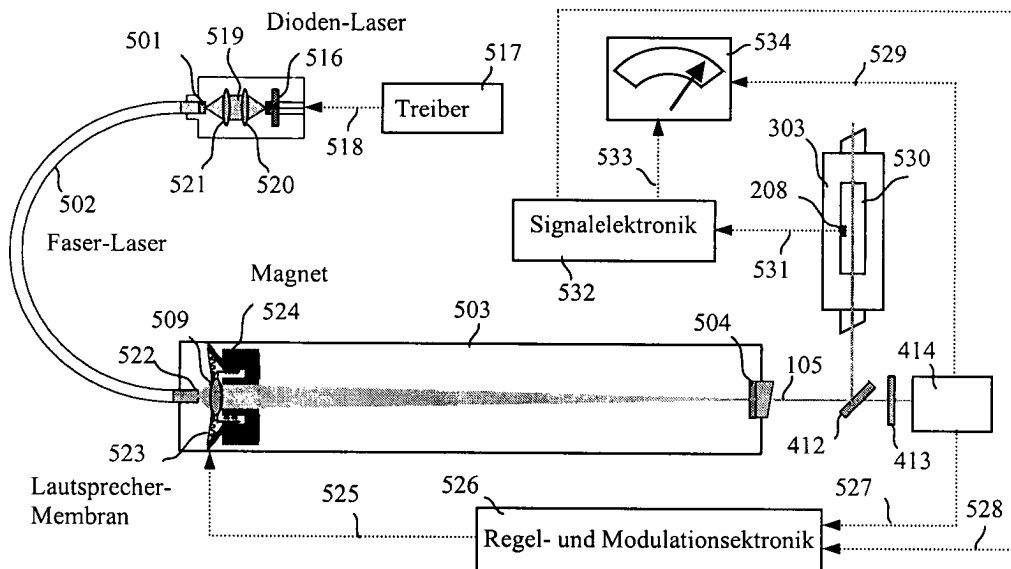


Bild 5. Ausführungsbeispiel