



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112834430 B

(45) 授权公告日 2022. 05. 31

(21) 申请号 202011626794.4

(22) 申请日 2020.12.31

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 112834430 A

(43) 申请公布日 2021.05.25

(73) 专利权人 山西大学
地址 030006 山西省太原市小店区坞城路
92号

(72) 发明人 武红鹏 董磊 卫婷婷
文钦佐·路易吉·斯帕格诺
安杰洛·桑保罗
彼得罗·帕蒂米斯科
玛丽莱纳·吉利奥

(74) 专利代理机构 太原申立德知识产权代理事
务所(特殊普通合伙) 14115
专利代理师 张向莹

(51) Int.Cl.
G01N 21/17 (2006.01)
G01N 21/01 (2006.01)
G01N 21/03 (2006.01)
G01N 21/09 (2006.01)

审查员 陈紫容

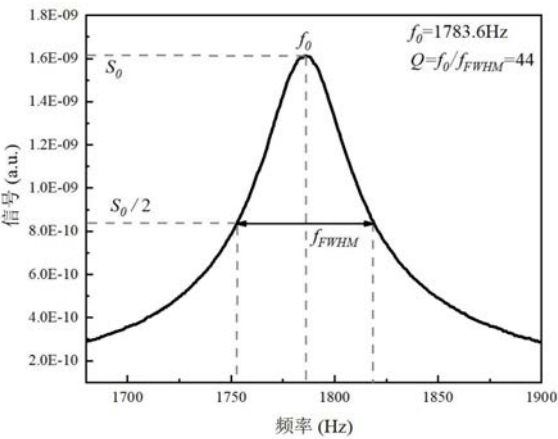
权利要求书3页 说明书8页 附图2页

(54) 发明名称

一种基于光声池声脉冲激励的气体检测装置及方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于光声池声脉冲激励的气体检测装置及方法,属于气体传感技术领域。该气体检测装置包括脉冲光声信号的激励光源模块、光声系统模块、数据采集及处理部分;本发明通过探测解调激励光源在光声池内激发的脉冲式光声信号获得拍频信号,实现对目标气体浓度和光声池电学参数的同步快速测量。解决了现有的基于共振型光声池的气体检测装置及方法存在的共振光声池共振频率等电学参数需要反复校准且装置响应时间长的问题。可用于国防科研、航天航空、工业过程控制等众多领域中的气体在线监测。



1. 一种基于光声池声脉冲激励的气体检测装置的气体检测方法,其特征在于:所述基于光声池声脉冲激励的气体检测装置包括:脉冲光声信号的激励光源部分、光声系统模块(3)和数据采集及处理部分;所述脉冲光声信号的激励光源部分包括激光器(1)、激光驱动器(5)、加法器(6)、激光波长调制函数发生器(7)、激光波长扫描函数发生器(8);所述激光驱动器(5)的输入端与加法器(6)输出端相连接,所述激光驱动器(5)的输出端与激光器(1)输入端相连接,所述加法器(6)的第一输入端、第二输入端分别与激光波长调制函数发生器(7)、激光波长扫描函数发生器(8)的信号输出端相连接;所述光声系统模块(3)包含共振光声池(31)和气体控制模块(32),其中共振光声池(31)包括共振声学腔(311)、位于共振声学腔(311)两端的激光入射窗口(312)及激光出射窗口(313)、位于共振光声池(31)一侧壁上的声电换能器件(314)以及位于共振光声池(31)另一侧壁上的气体输入端口(315)和气体输出端口(316);所述声电换能器件(314)为灵敏的驻极体电容麦克风,用来探测共振声学腔(311)中积累的声波能量,所述声电换能器件(314)位于共振光声池(31)对称中心位置,所述气体输入端口(315)和气体输出端口(316)分别位于共振光声池(31)靠近激光入射窗口(312)以及激光出射窗口(313)位置;所述气体控制模块(32)包括一号针阀(321)、气体质量流量计(322)、气体压力计(323)和二号针阀(324),且沿气体流动方向依次设置一号针阀(321)、气体质量流量计(322)、共振光声池(31)、气体压力计(323)、二号针阀(324),其中,气体质量流量计(322)与气体输入端口(315)连接,气体压力计(323)与气体输出端口(316)连接;所述数据采集及处理部分包括光声信号预处理电路模块(4)、锁相放大器(9)、数据采集卡(10)、单片机或微型计算机(11);所述光声信号预处理电路模块(4)的输入端与声电换能器件(314)输出端相连接,光声信号预处理电路模块(4)输出端与锁相放大器(9)的信号输入端相连接,所述锁相放大器(9)的参考信号端与激光波长调制函数发生器(7)同步信号输出端相连接,锁相放大器(9)的信号输出端与数据采集卡(10)相连接,所述数据采集卡(10)与单片机或微型计算机(11)相连接;

所述激光波长扫描函数发生器(8)输出自定义扫描波形,具体为一段上升的斜波和一段水平的波形和一段下降的斜波以及一段水平的波形,一段上升和一段下降的波形均用来扫描目标气体的特征吸收线,在每一段上升斜波后的一段水平波形以及在每一段下降斜波后的一段水平波形均用来等待声波在共振光声池(31)中阻尼振荡的完成,所述自定义扫描波形的频率变化决定着激光器(1)输出激光波长的扫描速率,以确保有效激发拍频信号的产生;

所述检测方法包括以下步骤:

(a)、沿气体流动方向依次安装一号针阀(321)、气体质量流量计(322)、共振光声池(31)、气体压力计(323)、二号针阀(324);将待测气体从气体输入端口(315)充入共振光声池(31)的共振声学腔(311)内,并使其经气体输出端口(316)向外输出;一号针阀(321)、气体质量流量计(322)、气体压力计(323)、二号针阀(324)将协同作用实现对共振声学腔(311)内气体压强及流速的精确控制;

(b)、激光波长扫描函数发生器(8)输出自定义扫描波形,通过加法器(6)传输至激光驱动器(5),然后激光驱动器(5)驱使激光器(1)的工作电流快速扫描通过目标气体的特征吸收线,从而使目标气体短时间内吸收激光能量并基于光声效应释放准脉冲式的声波信号;进行第n次测量时,激光波长调制函数发生器(7)输出频率为f的正弦波形的调制信号,通过

加法器(6)传输至激光驱动器(5),使得激光器(1)以偏离第 $n-1$ 次测量获得的共振光声池(31)共振频率 f_{n-1} 的调制频率 f 进行波长调制;所述的激光器(1)以偏离共振光声池(31)共振频率 f_n 的调制频率 f 进行波长调制;其调制频率 f 与共振光声池(31)的共振频率 f_n 存在10-200Hz的差值,以保证拍频信号的产生;

设定激光波长调制函数发生器(7)的输出频率 f 时用到的共振光声池(31)共振频率 f_n ,在首次测量时为共振光声池的标称共振频率,即出厂测试频率;后续测量过程中,将由单片机或微型计算机(11)软件自动调用上一次的共振频率测量结果,即第 n 次测量时设定激光波长调制函数发生器(7)输出频率为 f 时,用到的共振光声池(31)共振频率为 f_{n-1} ;

(c)、声波信号被共振光声池(31)内安装的声电换能器件(314)探测并转变为电流信号向外输出;

(d)、声电换能器件(314)输出的电流信号被光声信号预处理电路模块(4)放大并转变为电压信号传输至锁相放大器(9);

(e)、锁相放大器(9)以激光波长调制函数发生器(7)输出调制信号的频率 f 对光声信号预处理电路模块(4)输出的电压信号进行解调,从而获得频率为 $|f-f_n|$ 的拍频信号,即 $f_{\text{拍}}=|f-f_n|$;

(f)、由数据采集卡(10)采集锁相放大器(9)解调后的拍频信号,通过单片机或微型计算机(11)中的计算软件分析拍频信号的幅值 P ,并通过公式(1)计算获得目标气体浓度 C :

$$C = \frac{P}{P_0} \cdot C_0 \quad (1)$$

其中, C_0 为已知目标气体浓度, P 为实际测量拍频信号第一个峰值点的幅值, P_0 为 C_0 浓度下的拍频信号第一个峰值点的幅值;

通过单片机或微型计算机(11)中的计算软件分析第 n 次测量获得的拍频信号的频率 $f_{\text{拍}}$,并通过公式 $f_{\text{拍}}=|f-f_n|$,结合已知的调制频率 f 的数值,计算获得本次测量时共振光声池(31)的共振频率 f_n ;

由数据采集卡(10)采集锁相放大器(9)解调后的第 n 次测量获得的拍频信号;所述拍频信号有多个峰值,对这些信号峰值点进行e指数拟合,可得到第 n 次测量获得的拍频信号的衰荡时间 τ ,依据上述获得的共振光声池(31)的共振频率 f_n ,并依据公式(2)获得共振光声池(31)的品质因数 Q :

$$Q = \pi \cdot f_n \cdot \tau \quad (2)。$$

2.根据权利要求1所述的一种基于光声池声脉冲激励的气体检测装置的气体检测方法,其特征在于:所述激光器(1)为分布式负反馈激光器、带间级联激光器或者量子级联激光器;当需要提升激光器(1)输出激光的光束质量时,在所述激光器(1)的输出光路上增设光束整形器件(2)。

3.根据权利要求2所述的一种基于光声池声脉冲激励的气体检测装置的气体检测方法,其特征在于:所述光束整形器件(2)为光纤FC/APC接口的光纤准直器或者是分离式光学元件组成的光束准直器;所述分离式光学元件为透镜或小孔光阑。

4.根据权利要求1所述的一种基于光声池声脉冲激励的气体检测装置的气体检测方法,其特征在于:所述共振光声池(31)采用不锈钢材质,以屏蔽电磁干扰。

5.根据权利要求1所述的一种基于光声池声脉冲激励的气体检测装置的气体检测方

法,其特征在于:所述激光入射窗口(312)及激光出射窗口(313)与激光器(1)输出激光的光路方向垂直;根据激光器(1)输出的激光波长选用激光入射窗口(312)和激光出射窗口(313)的材料;当激光器(1)的输出激光波长为1-8 μm 波段,激光入射窗口(312)和激光出射窗口(313)选用氟化钙窗口,当激光器(1)的输出激光波长为8 μm 以上波段,激光入射窗口(312)和激光出射窗口(313)选用硒化锌窗口。

6.根据权利要求1所述的一种基于光声池声脉冲激励的气体检测装置的气体检测方法,其特征在于:将所述步骤(b)-(f)循环进行,以实现目标气体的连续免校准在线检测。

7.根据权利要求1所述的一种基于光声池声脉冲激励的气体检测装置的气体检测方法,其特征在于:所述自定义扫描波形中斜波的周期为1ms~50ms之间,此时对应的激光器(1)的扫描速率为30 cm^{-1}/s ~100 cm^{-1}/s 之间,以有效激发脉冲声波信号,使目标气体短时间内吸收激光能量并基于光声效应释放准脉冲式的声波信号。

8.根据权利要求1所述的一种基于光声池声脉冲激励的气体检测装置的气体检测方法,其特征在于:所述步骤(c)中声波被共振光声池(31)内安装的声电换能器件(314)探测并转变为电流信号向外输出;在此过程中,电流信号为阻尼衰减特性的谐波信号,且谐波的频率等于共振光声池(31)的共振频率 f_n 。

9.根据权利要求1所述的一种基于光声池声脉冲激励的气体检测装置的气体检测方法,其特征在于:所述步骤(e)中锁相放大器(9)以激光波长调制函数发生器(7)输出调制信号的频率 f 对光声信号预处理电路模块(4)输出的电压信号进行解调,从而获得频率为 $|f-f_n|$ 的拍频信号;其中,锁相放大器(9)的探测带宽比声电换能器的响应带宽宽2-3倍,以确保锁相放大器(9)的探测带宽足以覆盖整个拍频信号且不会由于探测带宽过宽引入环境噪声。

一种基于光声池声脉冲激励的气体检测装置及方法

技术领域

[0001] 本发明涉及气体传感技术,具体涉及一种基于光声池声脉冲激励的气体检测装置及方法。

背景技术

[0002] 光声光谱技术已经广泛应用于大气环境监测、无创医疗诊断,工业废气测量等领域。相较于基于其他方法的痕量气体检测装置,光声光谱技术有以下几点显著的优势:1背景探测技术:只有当目标气体与激励光源作用后才能产生光声信号;2没有波长选择性:该技术是声学传感器,不受波长限制,可探测从紫外到THz波段所有的激励光源;3线性度好:一个校准点就可以获得传感器的响应信号值和气体浓度的特征函数;4使用寿命长:光声光谱装置简单,无易损部件。该技术目前已被应用于多领域实际工程测量中。

[0003] 虽然传统的基于光声池光声光谱技术已被应用于各个领域,但仍存在一些问题限制其被广泛应用,其中最主要的两点问题为:1由于传统的基于光声池光声光谱技术采用2f波长调制技术,考虑数据处理及仪器响应时间,传统的基于光声光谱技术的气体传感装置的单次采样时间接近甚至超过一分钟。这使得传统的光声光谱技术不能很好的被应用于快速在线痕量气体测量领域;2共振光声池仅能高效响应频率等于共振光声池共振频率的光声信号,因此激励光声信号的光源必须被严格以共振光声池共振频率进行调制。而共振光声池的共振频率与其几何尺寸及制造工艺密切相关,因此,即使是同一批次生产的共振光声池,在投入使用前也需要逐一测定其共振频率。另外,当环境温度以及气体组分或浓度等外界因素发生变化时,共振光声池的共振频率也将产生漂移,若不及时校准共振光声池的共振频率将导致相关装置的测量结果偏离实际值。此外,共振光声池的品质因数也会随外界因素的变化而变化,而品质因数会影响共振光声池的响应时间,当激励光波长扫描时间与共振光声池响应时间相比明显过短时,装置采集到的信号将产生拖尾现象,从而造成探测结果的失真。为避免共振光声池固有电学参数变化对探测结果造成的影响,传统的基于共振光声池的光声光谱装置在实际使用过程中通常需要暂停气体检测,并对共振光声池固有电学参数进行校准,校准所需时间通常>300s,这使得传统的基于共振光声池的光声光谱技术无法实现痕量气体的快速连续在线检测。

[0004] 本发明通过采用一种基于光声池声脉冲激励的气体检测方法,可实现共振光声池固有电学参数与气体浓度的同步测量,即在实现装置固有参数自校准的同时,实现对目标气体浓度的快速连续在线监测。

发明内容

[0005] 针对现有技术中基于光声池的传统激光检测技术响应时间较长、以及无法实时校准共振光声池共振频率和品质因数的问题,本发明提供一种基于光声池声脉冲激励的气体检测装置及方法,该方法不仅能够实现气体浓度的快速检测,而且能够同时实现对共振光声池共振频率和品质因数的测量。

[0006] 为实现上述目的,本发明采用了以下技术方案:

[0007] 一种基于光声池声脉冲激励的气体检测装置及方法,包括脉冲光声信号的激励光源部分、光声系统模块和数据采集及处理部分;所述脉冲光声信号的激励光源部分包括激光器、激光驱动器、加法器、激光波长调制函数发生器、激光波长扫描函数发生器;所述激光驱动器的输入端与加法器输出端相连接,所述激光驱动器的输出端与激光器输入端相连接,所述加法器的第一输入端、第二输入端分别与激光波长调制函数发生器、激光波长扫描函数发生器的信号输出端相连接;所述激光驱动器是用来控制激光器的工作温度和工作电流,从而使激光器输出特定波长的激光;所述的激光波长调制函数发生器被设定输出正弦波形的调制信号,调制信号的频率为偏离共振光声池共振频率10-200Hz的频率 f ;激光波长扫描函数发生器被设定输出自定义扫描波形,此处的自定义扫描波形包含一段上升或下降的斜波和一段水平的波形,一段上升或下降的斜波被用来控制激光驱动器,使其驱动激光器输出的光波长能够快速扫描通过目标气体的特征吸收线,因此一段上升或下降的斜波幅值范围对应激光器完整扫描目标气体的特征吸收线的工作电流范围,一段水平的波形被用来等待脉冲声波在共振光声池内完全耗散,水平的波形幅值为上升或下降的斜波的结束值,通过控制自定义扫描波形的频率来改变激光器的扫描速率为 $30\text{cm}^{-1}/\text{s} \sim 100\text{cm}^{-1}/\text{s}$ 之间,从而使得目标气体能够短时间内吸收激光能量并基于光声效应释放准脉冲式的声波信号。加法器将两个输入端的信号相加,输出端与激光驱动器的输入端相连以控制激光驱动器,进而控制激光器的输出参数。

[0008] 所述光声系统模块包含共振光声池和气体控制模块,其中共振光声池包括共振声学腔、位于共振声学腔两端的激光入射窗口及激光出射窗口、位于共振光声池侧壁上的声电换能器件以及气体输入端口和气体输出端口。所述声电换能器件位于共振光声池对称中心位置,所述气体输入端口和气体输出端口分别位于共振光声池侧壁靠近激光入射窗口以及激光出射窗口位置;所述气体控制模块包括一号针阀、气体质量流量计、气体压力计和二号针阀,且沿气体流动方向依次设置一号针阀、气体质量流量计、共振光声池、气体压力计、二号针阀,其中,气体质量流量计与气体输入端口连接,气体压力计与气体输出端口连接;在共振光声池侧壁上安装气体的输入端口和气体输出端口以满足共振声学腔中充放目标气体的需要。所述的气体控制模块主要是用来精确控制共振光声池内气体的压力和流速。

[0009] 所述数据采集及处理部分包括光声信号预处理电路模块、锁相放大器、数据采集卡、单片机或微型计算机;所述光声信号预处理电路模块的输入端与声电换能器件输出端相连接,光声信号预处理电路模块输出端与锁相放大器的信号输入端相连接,所述锁相放大器的参考信号端与激光波长调制函数发生器同步信号输出端相连接,锁相放大器的信号输出端与数据采集卡相连接,所述数据采集卡与单片机或微型计算机相连接。

[0010] 进一步地,所述激光器为分布式负反馈激光器、带间级联激光器或者量子级联激光器;当需要提升激光器的输出激光光束质量时,在所述激光器的输出光路上增设光束整形器件。光束整形器件被用来对激光器输出的激光光束进行整形使其更容易完成光路校准,对于光纤式分布式负反馈激光器通常采用光纤FC/APC接口的光纤准直器对激光进行整形,而对于带间级联激光器或者量子级联激光器,通常采用透镜或小孔光阑分离式光学元件对激光进行整形,对于一些本身输出光束质量较好的激光器,则不需增设光束整形器件。

[0011] 更进一步地,所述共振光声池采用不锈钢材质,以屏蔽电磁干扰;所述声电换能器

件为灵敏的驻极体电容麦克风,用来探测共振声学腔中积累的声波能量。

[0012] 更进一步地,所述激光入射窗口及激光出射窗口与激光器输出激光的光路方向垂直;根据激光器的输出激光波长选用激光入射窗口和激光出射窗口的材料;当激光器的输出激光波长为1-8 μm 波段,激光入射窗口和激光出射窗口选用氟化钙窗口,当激光器的输出激光波长为8 μm 以上波段,激光入射窗口和激光出射窗口选用硒化锌窗口。

[0013] 利用上述基于光声池声脉冲激励的气体检测装置的气体检测方法,包括以下步骤:

[0014] (a)沿气体流动方向依次安装一号针阀、气体质量流量计、共振光声池、气体压力计、二号针阀;将待测气体从气体输入端口充入共振光声池腔内,并使其经气体输出端口向外输出;一号针阀、气体质量流量计、气体压力计、二号针阀将协同作用实现对共振光声池内气体压力及流速的精确控制;

[0015] (b)激光波长扫描函数发生器输出自定义扫描波形,通过加法器传输至激光驱动器,然后激光驱动器驱使激光器的工作电流快速扫描通过目标气体的特征吸收线,从而使目标气体短时间内吸收激光能量并基于光声效应释放准脉冲式的声波信号;进行第n次测量时,激光波长调制函数发生器输出频率为f的正弦波形的调制信号,通过加法器传输至激光驱动器,使得激光器以偏离共振光声池共振频率 f_n 的调制频率f进行波长调制;

[0016] 设定激光波长调制函数发生器(7)的输出频率f时用到的共振光声池(31)共振频率 f_n ,在首次测量时为共振光声池的标称共振频率,即出厂测试频率;后续测量过程中,将由单片机或微型计算机(11)软件自动调用上一次(第n-1次)的共振频率测量结果,即第n次测量时设定激光波长调制函数发生器(7)输出频率为f时,用到的共振光声池(31)共振频率为 f_{n-1} 。

[0017] (c)声波被共振光声池内安装的声电换能器件探测并转变为电流信号向外输出;由于光声效应持续的时间较短,因此共振光声池内声波能量将在气体发生光声效应的瞬间达到幅值,而后在光声效应消失后(即激光输出光波长扫过目标气体吸收线后)逐渐衰减至零;

[0018] (d)声电换能器件输出的电流信号被光声信号预处理电路模块放大并转变为电压信号传输至锁相放大器;

[0019] (e)锁相放大器以激光波长调制函数发生器输出调制信号的频率f对光声信号预处理电路模块输出的电压信号进行解调,从而获得频率为 $|f-f_n|$ 的拍频信号,即 $f_{\text{拍}}=|f-f_n|$;

[0020] (f)数据采集卡采集锁相放大器解调后的拍频信号,并通过单片机或微型计算机中的计算软件分析拍频信号的幅值P,并通过公式(1)计算获得目标气体浓度C:

$$[0021] \quad C = \frac{P}{P_0} \cdot C_0 \quad (1)$$

[0022] 其中, C_0 为已知目标气体浓度,P为实际测量拍频信号第一个峰值点的幅值, P_0 为 C_0 浓度下的拍频信号幅值;

[0023] 通过单片机或微型计算机中的计算软件分析第n次测量获得的拍频信号的频率 $f_{\text{拍}}$,并通过公式 $f_{\text{拍}}=|f-f_n|$,结合已知的调制频率f的数值,计算获得本次测量时共振光声池的共振频率 f_n ;

[0024] 所述由数据采集卡采集锁相放大器解调后的第 n 次测量获得的拍频信号;所述拍频信号有多个峰值,对这些信号峰值点进行 e 指数拟合,可得到第 n 次测量获得的拍频信号的衰荡时间 τ ,依据上述获得的共振光声池的共振频率 f_n ,并依据公式(2)获得共振光声池的品质因数 Q :

$$[0025] \quad Q = \pi \cdot f_n \cdot \tau \quad (2)。$$

[0026] 进一步的,将所述步骤(b)-(f)循环进行,以实现目标气体的连续免校准在线检测。

[0027] 再进一步的,所述步骤(b)中的激光波长扫描函数发生器输出自定义波形;所述自定义波形包含一段上升或下降的斜波和一段水平的波形,自定义波形中斜波的周期通常为 $1\text{ms} \sim 50\text{ms}$ 之间,此时对应的激光器的扫描速率为 $30\text{cm}^{-1}/\text{s} \sim 100\text{cm}^{-1}/\text{s}$ 之间。如此快速的扫描速率不仅可极大的缩短单次测量时间,而且可以有效激发脉冲声波信号,使目标气体短时间内吸收激光能量并基于光声效应释放准脉冲式的声波信号;

[0028] 所述的激光器以偏离共振光声池共振频率 f_n 的调制频率 f 进行波长调制;其调制频率 f 与共振光声池的共振频率 f_n 存在 $10\text{-}200\text{Hz}$ 的差值,以保证拍频信号的产生。

[0029] 更进一步的,所述步骤(c)中声波被共振光声池内安装的声电换能器件探测并转变为电流信号向外输出;在此过程中,电流信号为阻尼衰减特性的谐波信号,且谐波的频率等于共振光声池的共振频率 f_n 。

[0030] 更进一步的,所述步骤(e)锁相放大器以激光波长调制函数发生器输出调制信号的频率 f 对光声信号预处理电路模块输出的电压信号进行解调,从而获得频率为 $|f - f_n|$ 的拍频信号;其中,锁相放大器的探测带宽应比声电换能器件的响应带宽宽 $2\text{-}3$ 倍,以确保锁相放大器的探测带宽足以覆盖整个拍频信号且不会由于探测带宽过宽引入环境噪声。

[0031] 本发明区别于传统的基于光声池光声光谱技术的气体检测方法,其原理是以偏离光声池共振频率的频率对激励光源进行调制,并以极快的扫描速率($30\text{cm}^{-1}/\text{s} \sim 100\text{cm}^{-1}/\text{s}$)扫描激光器输出的光波长,从而使目标气体短时间内吸收激光能量并基于光声效应释放准脉冲式的声波信号。脉冲声波会在共振光声池内往返振荡并不断损耗直至完全耗散,因此声电换能器件探测到的信号为强度以 e 指数形式衰减的声波信号。声电换能器件探测到的阻尼衰减特性的谐波信号频率等于共振光声池的共振频率,因此当锁相放大器以失谐于共振光声池共振频率的调制频率对声电换能器件输出的电压信号进行解调时,将产生频率等于共振频率 f_n 和调制频率 f 之差的拍频信号 $f_{\text{拍}}$,且拍频信号的第一个信号峰值正比于目标气体浓度。根据已知参数 $f_{\text{拍}}$ 、 Δt ,其中 Δt 为拍频信号两个波峰之间的时间差,并结合拍频

原理的物理公式 $f_{\text{拍}} = \frac{1}{\Delta t} = |f - f_n|$ 可计算出共振光声池的共振频率 f_n 。由于共振光声池内的

脉冲声信号强度以 e 指数形式衰减,因此可以通过拟合拍频信号的衰荡时间获得共振光声池的响应时间,而光声光谱技术中共振光声池的响应时间 τ 与品质因数 Q 的关系为 $Q = \pi \cdot f_n \cdot \tau$,据此可以得到共振光声池的品质因数 Q 。因此,本发明的一种基于光声池声脉冲激励的气体检测装置及方法不仅可以大大地提高痕量气体的检测时间,而且可以实现共振光声池共振频率和品质因数的自校准。

[0032] 与现有技术相比,本发明具有以下有益效果:

[0033] 1、本发明通过快速扫描目标气体的特征吸收线,使目标气体短时间内吸收激光能

量并基于光声效应释放准脉冲式的声波信号,这一脉冲声信号在共振光声池中不断损耗直至散尽(即阻尼振荡过程),整个阻尼振荡完成的时间即为本发明装置的检测时间。阻尼振荡完成的时间与共振光声池的品质因数正相关,而共振光声池的品质因数往往较低,从而极大地压缩了装置的检测时间,具体为从20s的完整周期时间压缩到100ms的完整周期时间,装置检测时间的优化能够实现痕量气体浓度的实时在线快速检测。

[0034] 2、共振光声池的共振频率是基于共振光声池搭建的光声光谱气体传感器的核心参数,但是在实际测量的条件中,共振光声池周围环境以及内部气体组分和浓度变化时往往会引起其共振频率发生漂移,对于传统的基于共振光声池搭建的光声光谱气体传感装置,共振光声池共振频率的测量往往采用声激励的方法,这种方法操作繁琐且耗时>300s,这大大限制了基于光声池光声光谱技术的痕量气体检测装置在实际应用中在线实时快速测量的需求。本发明通过对单次扫描采集到的拍频光声信号进行处理即可以得到共振光声池的共振频率,这就实现了共振光声池在实际应用中频率自校准的需求。

[0035] 3、共振光声池的另一个核心参数是其品质因数,在实际测量的条件中,共振光声池的品质因数也会随外界因素的改变而变化,而品质因数会影响基于共振光声池搭建的光声光谱气体传感器的检测时间。不仅如此,共振光声池内产生的光声信号与共振光声池的品质因数正相关,即品质因数越高,光声信号越高,因此对品质因数的测量也是十分必要的。本发明中脉冲光声信号在光声池内的衰减过程满足阻尼衰减特性,即衰减时间与共振光声池的品质因数直接相关,因此通过探测解调光声信号获取的拍频信号的幅值衰减过程也符合阻尼衰减特性。基于上述事实,可以通过拟合拍频信号的衰荡时间反演出共振光声池的品质因数,这就满足了共振光声池在实际应用中品质因数自校准的需求。

附图说明

[0036] 图1是基于传统方法测量获得的共振光声池共振频率的响应曲线;

[0037] 图2是本发明基于光声池声脉冲激励的气体检测装置的结构示意图;

[0038] 图3是本发明中激光波长扫描函数发生器输出的自定义扫描波形;

[0039] 图4是本发明的气体检测方法与传统光声光谱方法测量结果对比图。

[0040] 其中,1-激光器,2-光束整形器件,3-光声系统模块,4-光声信号预处理电路模块,5-激光驱动器,6-加法器,7-激光波长调制函数发生器,8-激光波长扫描函数发生器,9-锁相放大器,10-数据采集卡,11-单片机或微型计算机;31-共振光声池,311-共振声学腔,312-激光入射窗口,313-激光出射窗口,314-声电换能器件,315-气体输入端口,316-气体输出端口;32-气体控制模块,321-一号针阀,322-气体质量流量计,323-气体压力计,324-二号针阀。

具体实施方式

[0041] 下面结合附图并通过具体实施例来进一步说明本发明的技术方案。本领域技术人员应该明了,所述具体实施方式仅仅是帮助理解本发明,不应视为对本发明的具体限制。

[0042] 如图1所示为采用传统声激励方法测量的共振光声池31的频率响应曲线结果。传统的声激励方法是采用一个1.38 μm 的分布式负反馈激光器作为激励光源,激励光源被准直通过共振光声池31的共振声学腔311与气体分子相互作用产生光声信号。将激光器1输出的

激光波长设置为气体特征吸收线的中心波长,对应的激光功率为22mW,与此同时对激光器1进行调制。此时通过对激光器1的调制频率以一定的步进进行扫描即可得到共振光声池31

的共振频率 f_0 为1783.6Hz,通过品质因数的公式 $Q = \frac{f_0}{f_{FWHM}}$ 即可得到共振光声池31的品质

因数为44,其中 f_{FWHM} 为频率扫描曲线的半高全宽。

[0043] 如图2所示,一种基于光声池声脉冲激励的气体检测装置,包括脉冲光声信号的激励光源部分、光声系统模块3和数据采集及处理部分;所述脉冲光声信号的激励光源部分包括激光器1、沿着激光器1出射光路上的光束整形器件2、激光驱动器5、加法器6、激光波长调制函数发生器7、激光波长扫描函数发生器8;所述光声系统模块3包含共振光声池31和气体控制模块32,其中共振光声池31包括:共振声学腔311被用来使气体分子与激励光源相互作用产生声驻波;位于共振声学腔311两端的激光入射窗口312及激光出射窗口313被用来完成激光光路校准的同时对共振光声池31进行密封;一个灵敏的驻极体电容式麦克风被作为声电换能器件314安装在共振声学腔311对称中心位置的侧壁上,其是用来探测共振声学腔311中产生的声波信号;气体输入端口315和气体输出端口316被分别安装在靠近激光入射窗口312和激光出射窗口313的共振光声池31侧壁位置上以满足共振声学腔311中充放目标气体的需要。气体控制模块32被用来控制共振光声池31中共振声学腔311内气体的压力和流速,包括沿气体流动方向的一号针阀321,气体质量流量计322,气体压力计323,二号针阀324。所述数据采集及处理部分包括光声信号预处理电路模块4、锁相放大器9、数据采集卡10、单片机或微型计算机11。

[0044] 装置的搭建包含光路准直,气路连接以及电路连接三部分。其中光路准直部分为激光器1输出的激光经过光束整形器件2整形为一定光斑大小的准直光束,该准直光束经过光声系统模块3中共振光声池31与气体分子相互作用,具体为准直光束依次通过共振光声池31的激光入射窗口312、共振声学腔311、激光出射窗口313;气路连接部分主要为光声系统模块3中的气路控制模块32,具体为沿着气流方向在共振光声池31前端安装一号针阀321和气体质量流量计322,在共振光声池31后端安装气体压力计323以及二号针阀324,上述设备将协同作用实现对共振光声池31内气体压强及流速的精确控制;电路连接部分具体为激光驱动器5的输出引脚与激光器1的输入引脚通过自制通讯线连接。加法器6的两个输入端口通过同轴电缆通讯线分别与激光波长调制函数发生器7的信号输出端、激光波长扫描函数发生器8的信号输出端连接,加法器6的输出端口通过同轴电缆通讯线与激光驱动器5的信号输入端连接。激光波长调制函数发生器7的同步信号输出端口与锁相放大器9的参考输入接口用同轴电缆通讯线相连接。作为声电换能器件314的高灵敏驻极体电容式麦克风的输出端与光声信号预处理电路模块4的输入端口相连,光声信号预处理电路模块4的输出端口通过同轴电缆通讯线与锁相放大器9的信号输入接口相连。锁相放大器9的输出接口通过同轴电缆通讯线与数据采集卡10的数据采集接口相连。数据采集卡10通过串口数据线与单片机或微型计算机11相连。

[0045] 所述的激光器1具体为分布式负反馈激光器或者带间级联激光器或者量子级联激光器。

[0046] 所述的光束整形器件2具体为光纤FC/APC接口的光纤准直器或者是分离式光学元件(透镜、小孔光阑)组成的光束准直器。对于一些输出激光光束质量较好的激光器不需要

光束整形器件2。

[0047] 所述的光声系统模块3中的共振光声池31采用不锈钢材质用来屏蔽电磁干扰,其共振频率 f_0 为1783.6Hz,品质因数 Q 为44。共振光声池31的激光入射窗口312和激光出射窗口313与激光器1输出的激光光束在光路方向上垂直。激光入射窗口312和激光出射窗口313材料的选用由激光器1输出的激光波长决定,通常对于1-8 μm 波段的激光采用氟化钙窗口,8 μm 以上波段的激光采用硒化锌窗口。为了更方便的校准光路,共振光声池31常被安装在一个升降台和一个俯仰台上用来调节共振光声池31的高度和倾斜角度。激光入射窗口312以及激光出射窗口313分别装配在共振声学腔311的两端,主要目的为:(1)允许激光器1输出激光完全通过共振光声池31,使得激光与气体分子最大限度的相互作用,从而产生强烈的光声信号;(2)由于共振光声池31的共振频率较低,易受到环境噪声的影响,如此窗口片的安装能够有效的避免环境噪声。在共振声学腔311中产生的脉冲声信号被一个声电换能器件314(商用灵敏的驻极体电容式麦克风)探测。共振光声池31中的待测气体通过气体控制模块32控制其压力和流量。

[0048] 所述的光声信号预处理电路模块4为商用的跨阻抗放大器,其功能为放大采集到的电流信号并将采集到的电流信号转化为电压信号,采用9V电源供电。

[0049] 所述的激光驱动器5具体为具有控制激光器1工作温度和工作电流功能的商用器件,通常根据激光器1的具体型号选定具体的激光驱动器5的型号。激光驱动器5控制激光器1的工作温度和工作电流,从而输出特定波长的激光(本实施例中激光器1输出的激光中心波长为1368nm,峰值功率为22mW)。

[0050] 所述的激光波长调制函数发生器7输出正弦波形信号作为调制信号,其频率设置为与共振光声池31共振频率1783.6Hz偏离 Δf (70Hz)的频率1713.6Hz,即激光波长调制函数发生器7输出正弦波形信号的频率为 $1783.6\text{Hz}-70\text{Hz}=1713.6\text{Hz}$,其幅度为调制深度,需在实验中具体优化。

[0051] 所述的激光波长扫描函数发生器8输出为如图3所示的自定义扫描波形,具体为一段上升或下降的斜波以及一段水平的波形,一段上升或下降的斜波用来扫描目标气体的特征吸收线,一段水平的波形用来等待声波在共振光声池31中阻尼振荡的完成,其自定义扫描波形的频率变化决定着激光器1输出激光波长的扫描速率,本发明设置的自定义扫描波形的扫描周期为200ms,包括扫描部分和等待部分,此时对应的激光器扫描速率为 $50\text{cm}^{-1}/\text{s}$,以确保有效激发拍频光声信号的产生。

[0052] 所述的加法器6为商用的有源加法器,具体功能为输出两个电信号相加后总信号,其采用15V电源供电。加法器6将激光波长调制函数发生器7输出的正弦波形信号与激光波长扫描函数发生器8输出的自定义扫描波形信号相加输入到激光驱动器5中,从而驱动激光器1的电流以1713.6Hz的频率进行调制并快速扫描通过目标气体的特征吸收线。

[0053] 就本发明而言,只有当激光器1输出的激光波长被快速扫描通过目标气体的特征吸收线时,才能够产生一个脉冲式声信号,这一脉冲式的声信号在共振光声池31内往返振荡并在极短的时间内不断损耗直至耗散。脉冲式的声信号被一个声电换能器件314(商用灵敏的驻极体电容式麦克风)探测并转化为电流信号,然后通过光声信号预处理电路模块4放大并转化为电压信号传送到锁相放大器9中。由于声电换能器件314采集到的阻尼衰减信号频率等于共振光声池31的共振频率,因此当锁相放大器9以失谐于共振光声池31共振频率

的调制频率1713.6Hz对声电换能器件314输出信号进行解调时,将产生频率为1783.6Hz-1713.6Hz=70Hz的拍频信号,且拍频信号的第一个信号峰值正比于目标气体浓度。为了能够探测这一信号,锁相放大器9采用极短的积分时间(1ms)采集信号。为了确保数据点被完全采集,数据采集卡10被使用采集锁相放大器9解调的信号,并将采集到的信号输送到单片机或微型计算机11中进行数据处理。

[0054] 如图4所示为基于本发明获得的拍频光声信号与基于传统光声光谱技术采集到的光声信号的对比图。横坐标为采集时间,纵坐标为归一化的光声信号。图4上部分为本发明所述装置所获得的拍频光声信号,图4下部分为基于传统光声光谱装置获得的光声信号。就采集时间而言,本发明完整信号的采集时间为100ms,而传统方法完整信号的采集时间为20s。其次,根据拍频信号的原理,拍频信号的频率为产生拍频信号两频率的差值,因此可以

根据公式 $f_{\text{拍}} = \frac{1}{\Delta t} = |f - f_n|$ 计算出共振光声池31的共振频率 f_n 。首次测量时,共振光声池的

共振频率 f_n 被默认为光声池的标称共振频率,即出厂测试频率 $f_0=1783.6\text{Hz}$ 。由于共振光声池31内脉冲拍频光声信号强度以e指数形式衰减,因此可以通过拟合拍频信号的衰荡时间获得共振光声池31的响应时间,根据光声光谱中共振光声池的响应时间 τ 与品质因数Q的关系公式 $Q = \pi \cdot f_n \cdot \tau$ 可以计算出共振光声池31的品质因数。就上述实例采集到的拍频信号而言,拟合计算可得到的共振光声池31的共振频率为1783.9Hz,品质因数为48.45,与采用传统声激励扫描方法获得的结果(共振频率为1783.6Hz和品质因数44)基本一致。同时,拍

频信号的第一个峰值点被作为目标气体的浓度表征,根据公式 $C = \frac{P}{P_0} \cdot C_0$ 可获得实际测量的

目标气体的浓度,其中P为实际测量拍频信号第一个峰值点的幅值, C_0 为已知目标气体浓度, P_0 为 C_0 浓度下的拍频信号幅值。

[0055] 上述实施例中激光波长调制函数发生器7输出正弦波形信号作为调制信号,其频率设置为与共振光声池31共振频率1783.6Hz偏离 Δf (70Hz)的频率1713.6Hz,即激光波长调制函数发生器7输出正弦波形信号的频率为1783.6Hz-70Hz=1713.6Hz,其幅度为调制深度,需在实验中具体优化。其中的偏离 Δf 还可以AA是与光声池共振频率正偏离10Hz、200Hz、或10-200Hz之间的任意数值,或与光声池共振频率负偏离10Hz、200Hz、或10-200Hz之间的任意数值。

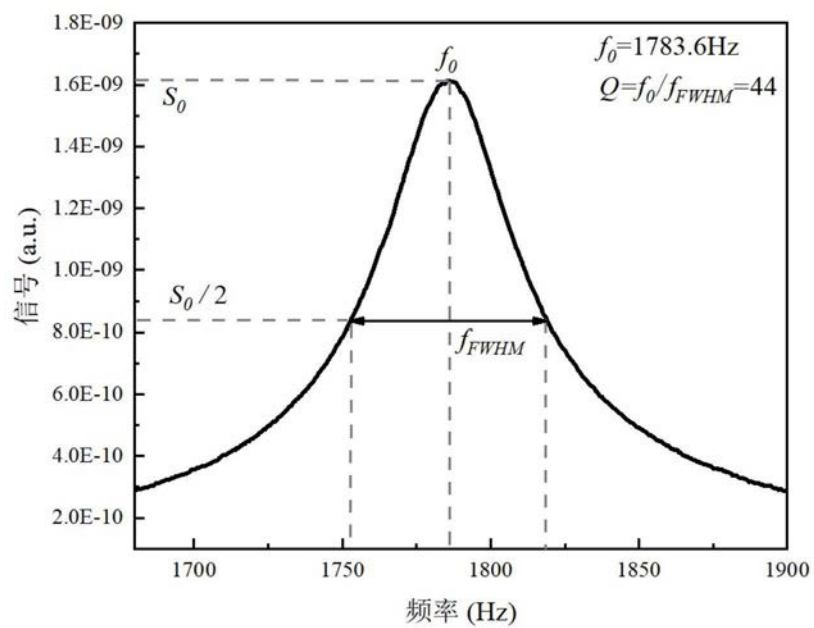


图1

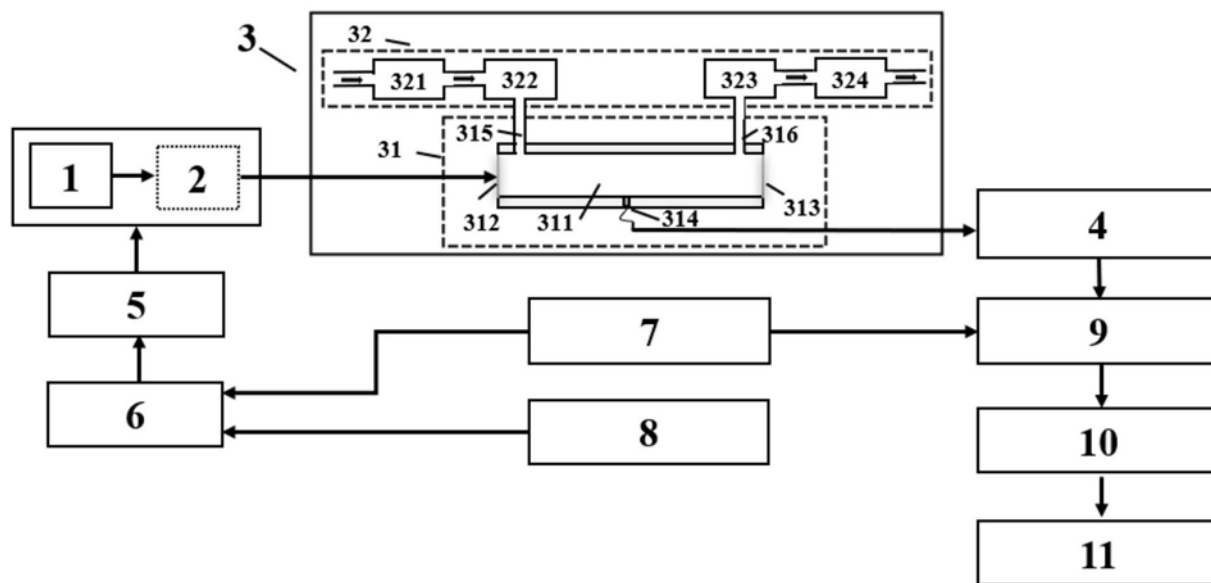


图2

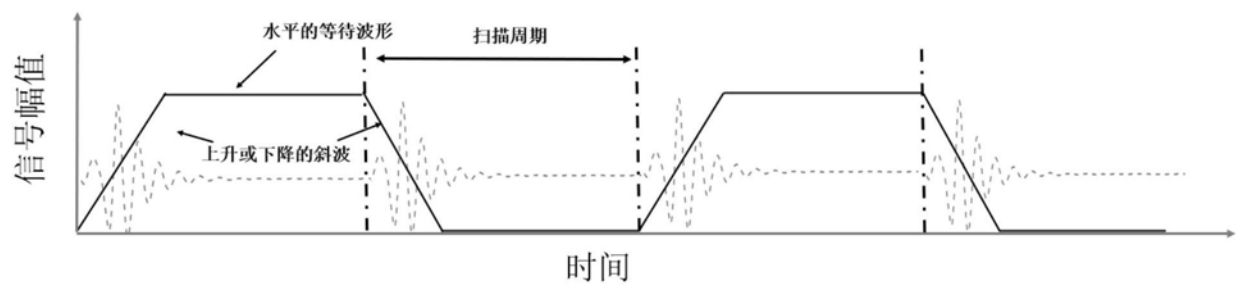


图3

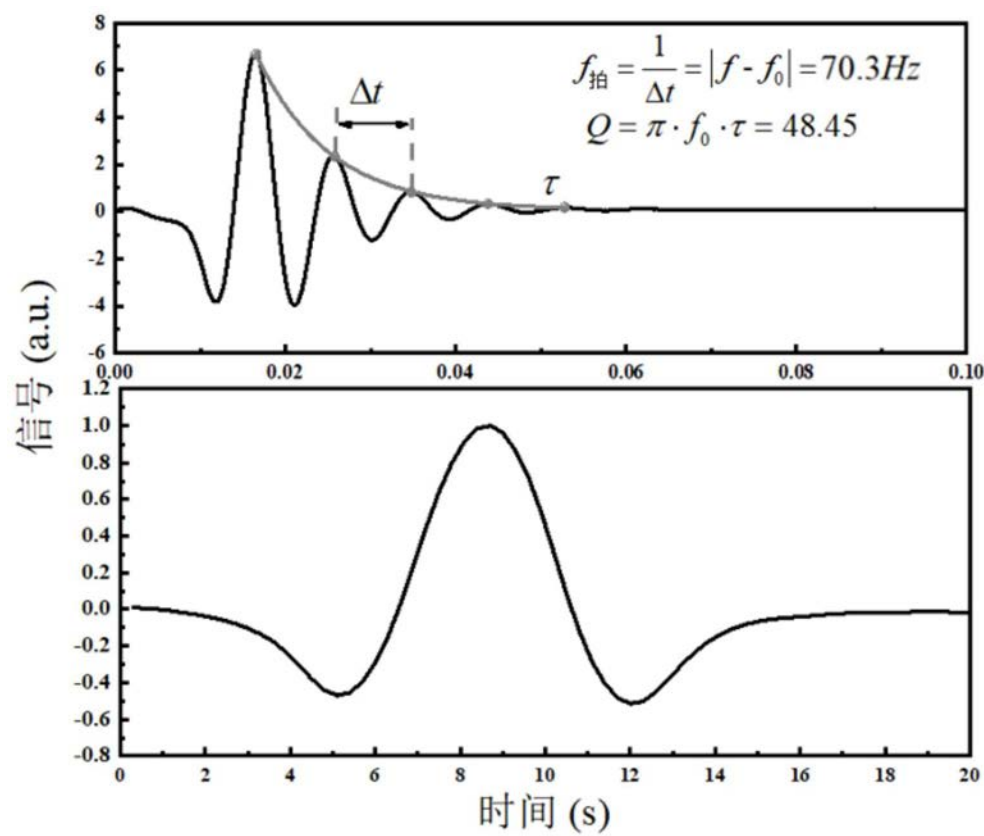


图4