



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110967329 B

(45) 授权公告日 2022. 12. 16

(21) 申请号 201811146965.6

(22) 申请日 2018.09.29

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 110967329 A

(43) 申请公布日 2020.04.07

(73) 专利权人 香港理工大学深圳研究院
地址 518057 广东省深圳市南山区高新园
南区粤兴一道18号香港理工大学学
研大楼205室

(72) 发明人 靳伟 齐云 赵焱 鲍海泓
何海律

(74) 专利代理机构 深圳中一专利商标事务所
44237
专利代理师 官建红

(51) Int. Cl.
G01N 21/65 (2006.01)

(56) 对比文件

WO 2017148858 A1, 2017.09.08

CN 105247350 A, 2016.01.13

WO 2019229620 A1, 2019.12.05

CN 113029957 A, 2021.06.25

Fan Yang, et al.. All-fiber hydrogen sensor based on stimulated Raman gain spectroscopy with a 1550 nm hollow-core fiber. 《Proc. of SPIE》. 2017, 第10323卷第103233C-1-103233C-4页.

Liye Shan, et al.. Stimulated Raman scattering in the evanescent field of liquid immersed tapered nanofibers. 《APPLIED PHYSICS LETTERS》. 2013, 第102卷

Liye Shan, et al.. Design of nanofibres for efficient stimulated Raman scattering in the evanescent field. 《J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public.》. 2013, 第8卷

审查员 李婷

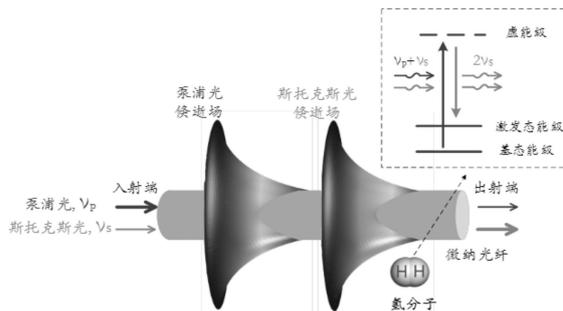
权利要求书2页 说明书6页 附图4页

(54) 发明名称

一种检测系统和氢气检测方法

(57) 摘要

本发明属于气体痕量检测技术领域,具体涉及一种氢气检测方法和检测系统。本发明所提供的氢气检测方法,基于微纳光纤,微纳光纤包括输入端和输出端,包括:以泵浦光和斯托克斯光作为入射光源,将泵浦光和斯托克斯光从微纳光纤的输入端射入,泵浦光和斯托克斯光产生的倏逝场相互重合,重合的倏逝场与待测样品中的氢气相互作用,发生以氢气分子的转动拉曼跃迁为媒介的受激拉曼散射过程,部分泵浦光转化为斯托克斯光;检测从微纳光纤的输出端输出的斯托克斯光的增益信号,并根据斯托克斯光的增益与氢气浓度之间的关系换算得到待测样本中的氢气的浓度;其中,泵浦光与斯托克斯光的频率差等于氢气的转动拉曼跃迁频率。检测灵敏度高,信号响应快。



CN 110967329 B

1. 一种氢气检测方法,其特征在于,基于微纳光纤,所述微纳光纤包括输入端和输出端,包括:

以泵浦光和斯托克斯光作为入射光源,将所述泵浦光和所述斯托克斯光从所述微纳光纤的输入端射入,所述泵浦光和所述斯托克斯光产生的倏逝场相互重合,重合的倏逝场与待测样本中的氢气相互作用,发生以氢气分子的转动拉曼跃迁为媒介的受激拉曼散射过程,部分所述泵浦光转化为斯托克斯光;

检测从所述微纳光纤的输出端输出的所述斯托克斯光的增益信号,并根据所述斯托克斯光的增益与氢气浓度之间的关系换算得到所述待测样本中的氢气的浓度;

其中,所述泵浦光与所述斯托克斯光的频率差为10.6THz,对应于氢气分子的S0(0)转动拉曼跃迁频率;含氢气的待测样本设置为环绕微纳光纤的形式存在,将含氢气的待测样本收集于待测样本收集室中,并将微纳光纤贯穿设置于待测样本收集室中;设置于待测样本收集室内的微纳光纤的直径为0.7 μm ,长度为48 mm;微纳光纤的腰区直径为700nm,腰区长度为48mm;在测量过程中待测样本收集室的气压保持为一个大气压;

入射至所述微纳光纤的所述泵浦光的频率为195.6THz、功率为300mW,且入射至所述微纳光纤的斯托克斯光的频率为185.0THz、功率为400 μW 。

2. 一种氢气检测系统,应用所述氢气检测系统执行如权利要求1所述的氢气检测方法,其特征在于,包括:泵浦光发射器,斯托克斯光发射器,用于合并光束的波分复用器,微纳光纤,光探测器,以及用于控制光束入射参数及记录所述光探测器检测数据的控制模块;

所述泵浦光发射器和所述斯托克斯光发射器分别连接所述波分复用器的输入端,所述波分复用器的输出端连接所述微纳光纤的输入端,所述微纳光纤的输出端连接所述光探测器的输入端,所述光探测器的输出端和所述泵浦光发射器的控制端分别与所述控制模块电气连接;

所述微纳光纤置于待测样本收集室内;含氢气的待测样本设置为环绕微纳光纤的形式存在,将含氢气的待测样本收集于待测样本收集室中,并将微纳光纤贯穿设置于待测样本收集室中;设置于待测样本收集室内的微纳光纤的直径为0.7 μm ,长度为48 mm;微纳光纤的腰区直径为700nm,腰区长度为48mm;在测量过程中待测样本收集室的气压保持为一个大气压;

所述微纳光纤和所述光探测器之间设置有第二滤波器;

所述泵浦光与所述斯托克斯光的频率差为10.6THz,对应于氢气分子的S0(0)转动拉曼跃迁频率;

入射至所述微纳光纤的所述泵浦光的频率为195.6THz、功率为300mW,且入射至所述微纳光纤的斯托克斯光的频率为185.0THz、功率为400 μW 。

3. 根据权利要求2所述的氢气检测系统,其特征在于,所述控制模块包括:信号放大器、数据收集装置和激光驱动装置;

所述信号放大器电气连接所述光探测器的输出端和所述数据收集装置的输入端;

所述激光驱动装置电气连接所述泵浦光发射器的控制端和所述信号放大器。

4. 根据权利要求2所述的氢气检测系统,其特征在于,所述泵浦光发射器和所述波分复用器之间依次设置有光纤放大器、第一滤波器和第一偏振控制器;和/或

所述斯托克斯光发射器和所述波分复用器之间设置有第二偏振控制器。

5. 根据权利要求2所述的氢气检测系统,其特征在于,所述待测样本收集室包括进气阀门和排气阀门,所述进气阀门通过管道连接空气过滤器和流量控制器。

一种检测系统和氢气检测方法

技术领域

[0001] 本发明属于气体痕量检测技术领域,具体涉及一种检测系统和氢气检测方法。

背景技术

[0002] 氢气是重要的化工原料,也是重要的清洁能源,在一系列工业领域中得到了广泛应用。氢气分子非常小,在存储与运输过程中容易发生泄漏,当空气中氢气含量达到4%以上时,极可能发生强烈爆炸,故痕量氢检测至关重要。

[0003] 目前,基于光纤的痕量氢检测的方法主要采用表面镀有特定金属(如钯和铂等)的光纤,光纤表面镀有的金属接触氢气后会发物理或者化学变化,进而对探测光的吸收度或者反射率发生变化,抑或由于反应引起的发热或者体积变化进而使通过光纤的光程发生变化,然后通过检测探测光的强度或者相位变化来测量氢气浓度。但是,这类检测方法探测灵敏度低,可重复性差,选择性较低,信号响应慢。

发明内容

[0004] 本发明的主要目的在于提供一种检测系统,旨在解决现有技术中所存在的检测灵敏度低、选择性差和信号响应慢等技术问题。

[0005] 为了解决上述技术问题,一方面,本发明提供了一种氢气检测方法,基于微纳光纤,所述微纳光纤包括输入端和输出端,包括:

[0006] 以泵浦光和斯托克斯光作为入射光源,将所述泵浦光和所述斯托克斯光从所述微纳光纤的输入端射入,所述泵浦光和所述斯托克斯光产生的倏逝场相互重合,重合的倏逝场中与待测样品中的氢气相互作用,发生以氢气分子的转动拉曼跃迁为媒介的受激拉曼散射过程,使得部分所述泵浦光转化为斯托克斯光;

[0007] 检测从所述微纳光纤的输出端输出的所述斯托克斯光的增益信号,并根据所述斯托克斯光的增益信号与氢气浓度之间的关系换算得到所述待测样本中的氢气的浓度;

[0008] 其中,所述泵浦光与所述斯托克斯光的频率差等于氢气的转动拉曼跃迁频率。

[0009] 与现有技术相比,本发明氢气检测方法基于微纳光纤,以泵浦光和斯托克斯光作为入射光源,将泵浦光和斯托克斯光从微纳光纤的输入端射入微纳光纤,所述泵浦光和所述斯托克斯光产生的倏逝场相互重合,重合的倏逝场中填充有含氢气的待测样品;当泵浦光和斯托克斯光的频率差等于氢气的转动拉曼跃迁频率时,在重合的倏逝场作用下,发生以氢气分子的转动拉曼跃迁为媒介的受激拉曼散射过程,部分泵浦光转化为斯托克斯光,使得斯托克斯光的功率增加,斯托克斯光的功率增加程度与氢气分子的浓度呈正比。因而,通过检测从微纳光纤输出端射出的斯托克斯光的增益信号,可换算得到待测样本中的氢气的浓度。

[0010] 微纳光纤具有强倏逝场,可增强从微纳光纤输入端射入的泵浦光和斯托克斯光与氢气之间的受激拉曼相互作用强度,进而提升了泵浦光向斯托克斯光以氢气分子为媒介的受激拉曼转化效率,从而提高氢气检测的灵敏度。

[0011] 另一方面,本发明还提供了一种检测系统,包括:泵浦光发射器,斯托克斯光发射器,用于合并光束的波分复用器,微纳光纤,光探测器,以及用于控制光束入射参数及记录所述光探测器检测数据的控制模块;

[0012] 所述泵浦光发射器和所述斯托克斯光发射器分别连接所述波分复用器的输入端,所述波分复用器的输出端连接所述微纳光纤的输入端,所述微纳光纤的输出端连接所述光探测器的输入端,所述光探测器的输出端和所述泵浦光发射器的控制端分别与所述控制模块电气连接;

[0013] 所述微纳光纤置于待测样品收集室内。

[0014] 本发明检测系统基于上述氢气检测方法,结构简单,操作方便,且检测灵敏度高、信号响应快。经实验检测,本发明检测系统的最小可探测灵敏度低至8.6ppm,反应时间常数仅为10s。

附图说明

[0015] 图1为本发明实施例在微纳光纤上发生的受激拉曼散射过程的示意图;

[0016] 图2为本发明实施例检测系统的结构简图;

[0017] 图3-1为实施例1中采用本发明氢气检测方法所测得的在不同氢气浓度下,经信号放大器解调出的二阶信号曲线;

[0018] 图3-2为实施例1中采用本发明氢气检测方法所测得的在不同氢气浓度下,受激拉曼信号幅值曲线;

[0019] 图4为实施例1中基于本发明氢气检测方法的动态范围测量曲线;

[0020] 图5为实施例1中基于本发明氢气检测方法的阿伦方差测量曲线;

[0021] 图6为实施例1中基于本发明氢气检测方法的响应时间测量曲线。

具体实施方式

[0022] 为了解决现有技术中所存在的探测灵敏度低、选择性差、信号响应慢等技术问题。

[0023] 一方面,本发明实施例所提供的一种氢气检测方法,基于微纳光纤,所述微纳光纤包括输入端和输出端,包括:

[0024] S01、以泵浦光和斯托克斯光作为入射光源,将泵浦光和斯托克斯光从微纳光纤的输入端射入,泵浦光和斯托克斯光产生的倏逝场相互重合,重合的倏逝场与待测样品中的氢气相互作用,发生以氢气分子的转动拉曼跃迁为媒介的受激拉曼散射过程,部分泵浦光转化为斯托克斯光;

[0025] S02、检测从微纳光纤的输出端输出的斯托克斯光的增益信号,并根据斯托克斯光的增益与氢气浓度之间的关系换算得到待测样本中的氢气的浓度;

[0026] 其中,泵浦光与斯托克斯光的频率差等于氢气的转动拉曼跃迁频率。

[0027] 具体的,在步骤S01中,将泵浦光和斯托克斯光从微纳光纤的输入端射入,这一步骤可参考本领域的激光入射光纤的常规方法,本申请不作具体限定。

[0028] 将泵浦光和斯托克斯光从微纳光纤的输入端射入,这一步骤的目的在于将泵浦光和斯托克斯光同向射入微纳光纤,且使得泵浦光和斯托克斯光能分别在微纳光纤中产生倏逝场并相互重合,使得重合的倏逝场与氢气相互作用。也就是说,当满足重合的倏逝场中含

氢气,且泵浦光与斯托克斯光的频率差等于氢气的转动拉曼跃迁频率这两个条件时,可发生以氢气分子的转动拉曼跃迁为媒介的受激拉曼散射过程,使得部分泵浦光转化为斯托克斯光,从而在微纳光纤的输出端能检测到斯托克斯光的增益信号,进而通过斯托克斯光的增益信号与氢气浓度之间的关系换算得到待测样本中的氢气的浓度,该过程如图1所示。因而,本发明实施例所提供的方法只对氢气敏感,对其他诸如水分子、氮气、氧气和二氧化碳等均表现为惰性,具有高度的选择性。

[0029] 泵浦光与斯托克斯光的频率差等于氢气的转动拉曼跃迁频率。作为范例,当泵浦光和斯托克斯光的频率差为10.6THz时,发生氢气分子的S0(0)转动拉曼跃迁;当泵浦光和斯托克斯光的频率差为17.6THz时,发生氢气分子的S0(1)转动拉曼跃迁。

[0030] 值得注意的是,泵浦光与斯托克斯光的频率差必须与某一个氢气转动拉曼跃迁线相同,否则受激拉曼散射过程无法发生,泵浦光无法转化为斯托克斯光。作为范例,当泵浦光和斯托克斯光的频率差大于10.6THz且小于17.6THz时,受激拉曼散射过程无法发生。

[0031] 调节泵浦光与斯托克斯光的频率差这一步骤可通过分别调节和控制射入微纳光纤的泵浦光与斯托克斯光的扫描波长来实现,本发明实施例对其具体实施过程不作具体限定。

[0032] 作为优选,泵浦光的频率为150~600THz(相当于泵浦光的波长为0.5~2 μ m),且斯托克斯光的频率小于泵浦光的频率。

[0033] 当泵浦光的频率低于150THz时,光纤的红外吸收增大;当泵浦光的频率高于600THz时,光纤的紫外吸收增大。因而,无论泵浦光的频率小于150THz还是大于600THz时,都将造成光传输损害增加,并且在高能量泵浦注入下,可能损害微纳光纤。

[0034] 作为优选,入射至微纳光纤的泵浦光的平均功率为1mW~10W,且入射至微纳光纤的斯托克斯光的平均功率为1 μ W~10mW。

[0035] 对于泵浦光,其功率越高,受激拉曼散射效率越高,灵敏度越好。但是,泵浦光的功率过高可能损坏微纳光纤,并且考虑到实际的商用激光器,高功率的窄线宽激光器成本过高。斯托克斯光的功率大小与受激拉曼散射效率没有直接关系,但是其功率过高可能造成探测器饱和,功率过低又会造成信噪比下降,继而灵敏度下降。

[0036] 重合的倏逝场与待测样品中的氢气相互作用,这一目的的实现,可通过将待测样品分布于重合的倏逝场周围,使得泵浦光、斯托克斯光和氢气能够同时存在,促进受激拉曼散射过程的发生。

[0037] 作为优选,含氢气的待测样本可设置为环绕微纳光纤的形式存在。具体的,将含氢气的待测样本收集于待测样品收集室中,并将微纳光纤设置于待测样品收集室中。

[0038] 在本发明的优选实施例中,微纳光纤贯穿设置于待测样品收集室中,其周围均与待测样品收集室的内壁存在一定距离,且其输入端和输出端均位于待测样品收集室的外侧。

[0039] 进一步的,本发明实施例的待测样品收集室为40cm \times 2cm \times 1cm的铝制气室,在测量过程中气压保持为一个大气压。

[0040] 为了提升泵浦光向斯托克斯光以氢气分子为媒介的受激拉曼转化效率,需要进一步加大泵浦光的功率密度(即光强),并且从微纳光纤同向入射的泵浦光和斯托克斯光的光斑也应尽量重叠传播较长的距离。

[0041] 微纳光纤是指光纤直径达到微米、纳米级的普通光纤,具有较小的模场面积,泵浦光的光强大,并且泵浦光和斯托克斯光的光斑可以在微纳光纤腰区很好地重合并同向传播较长距离。能够同时满足上述条件,增强受激拉曼散射效率。

[0042] 本发明实施例对微纳光纤的制备不作具体限定,其可通过直接拉制于普通单模光纤获得,亦可直接从市场上购买获得。

[0043] 作为优选,微纳光纤的直径为泵浦光波长的0.3~0.9倍。

[0044] 当微纳光纤的直径大于泵浦光波长0.9倍,倏逝场的比例减小,受激拉曼散射效率下降,灵敏度下降;当微纳光纤的直径小于泵浦光波长0.3倍,倏逝场的强度减小,受激拉曼散射效率下降,灵敏度下降。

[0045] 作为优选,微纳光纤的长度为1~100mm。

[0046] 理论上,微纳光纤越长,灵敏度越高,但是过长的微纳光纤制作难度增加,且不利于封装;微纳光纤过短,受激拉曼散射效率下降,灵敏度下降。

[0047] 在步骤S02中,检测从微纳光纤的输出端输出的斯托克斯光的增益信号,根据所述斯托克斯光的增益信号与氢气浓度之间的关系换算得到所述待测样本中的氢气的浓度。这一过程的具体过程为:固定斯托克斯光的波长不变,对泵浦光的光源进行频率为1f的波长调制,同时将泵浦光的中心波长扫描过氢气分子的某一转动受激拉曼增益线,并对从微纳光纤的输出端收集到的斯托克斯光的功率进行频率为2f的二次谐波检测,测得的二次谐波曲线的峰-峰值即为氢气的受激拉曼信号,该受激拉曼信号与待测样品中的氢气浓度成正比。

[0048] 作为优选,斯托克斯光的增益与氢气浓度之间的关系可表示为:

$$[0049] \quad g_{\text{Stokes}} = A \left[\int I_{\text{Pump-ev}} \cdot I_{\text{Stokes-ev}} ds \right] \cdot c \cdot l;$$

[0050] 其中, g_{Stokes} 为斯托克斯光功率的增益; A 为增益常数,对固定的泵浦光与斯托克斯光的偏振态,其为定值; $I_{\text{Pump-eva}}$ 为泵浦光的倏逝场的光强; $I_{\text{Stokes-eva}}$ 为斯托克斯光的倏逝场的光强; c 为氢气浓度; l 为微纳光纤的长度。

[0051] 基于上述氢气检测方法,本发明实施例提供了一种检测系统,其结构如图2所示,包括:泵浦光发射器、斯托克斯光发射器、波分复用器、微纳光纤、光探测器和控制模块;

[0052] 泵浦光发射器和斯托克斯光发射器分别连接波分复用器的输入端,波分复用器的输出端连接微纳光纤的输入端,微纳光纤的输出端连接光探测器的输入端,光探测器的输出端和泵浦光发射器的控制端分别与控制模块电气连接;

[0053] 微纳光纤置于待测样品收集室内;

[0054] 微纳光纤和光探测器之间设置有第二滤波器;

[0055] 控制模块控制泵浦光发射器的发射参数,并根据光探测器输出的增益信号,计算氢气的浓度。

[0056] 微纳光纤和光探测器之间设置有第二滤波器,从微纳光纤射出的泵浦光与斯托克斯光经过第二滤波器后滤除泵浦光,剩下的斯托克斯光被光探测器测得。

[0057] 作为优选,微纳光纤的直径为所述泵浦光波长的0.3~0.9倍。

[0058] 作为优选,泵浦光发射器和波分复用器之间依次设置有光纤放大器、第一滤波器和第一偏振控制器。

[0059] 泵浦光发射器发射泵浦光,发射的泵浦光的功率经过光纤放大器放大,然后经过

第一滤波器滤除光纤放大器的自发辐射激光,之后通过第一偏振控制器调节泵浦光的偏振,并保持固定偏振不变,接着进入波分复用器与斯托克斯光合成同一光束射入微纳光纤。

[0060] 进一步的,本发明实施例的泵浦光发射器选为半导体分布式反馈激光器(DFB)。使用时,通过调节注入的电流大小进行波长调制。

[0061] 进一步的,本发明实施例的光纤放大器为掺铒光纤放大器。

[0062] 作为优选,斯托克斯光发射器和波分复用器之间设置有第二偏振控制器。

[0063] 斯托克斯光发射器发射斯托克斯光,发射的斯托克斯光通过第二偏振控制器调节斯托克斯光的偏振,然后进入波分复用器与泵浦光耦合成同一光束射入微纳光纤。

[0064] 进一步的,本发明实施例的斯托克斯光发射器选为外腔二极管激光器(ECDL)。

[0065] 作为优选,控制模块包括:信号放大器、数据收集装置和激光驱动装置,信号放大器电气连接光探测器的输出端,数据收集装置电气连接信号放大器的输出端,激光驱动装置电气连接泵浦光发射器的控制端。

[0066] 光探测器的信号输出至信号放大器进行二阶信号解调,然后经过解调的信号传递并被数据收集装置记录,同时经过解调的信号传递至激光驱动装置驱动泵浦光发射器工作。

[0067] 进一步的,本发明实施例中的信号放大器选为锁相放大器。

[0068] 作为优选,待测样品收集室包括进气阀门和排气阀门,进气阀门通过管道连接用于过滤气体中灰尘的空气过滤器和用于调节气体流量的流量控制器。

[0069] 具体的,使用上述检测系统进行氢气检测,包括:

[0070] S03、保持进气阀门和排气阀门打开,待测气体依次经过流量控制器和空气过滤器进入待测样品收集室内;

[0071] S04、通过控制模块的激光驱动装置将泵浦光和斯托克斯光从微纳光纤的输入端射入,并通过控制模块的激光驱动装置调节射入微纳光纤的泵浦光与斯托克斯光的频率,使其频率差等于氢气的转动拉曼跃迁频率;

[0072] S04、将信号放大器连接微纳光纤的输出端,检测并采用数据收集装置记录斯托克斯光的增益信号,根据斯托克斯光的增益信号与氢气浓度之间的关系换算得到待测样本中的氢气的浓度。

[0073] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合具体实施例,对本发明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。

[0074] 实施例1

[0075] 本实施例提供了一种氢气检测方法,其实施基于上述如图2所示的检测系统,具体操作步骤如下:

[0076] 1、保持进气阀门和排气阀门打开,待测气体依次经过流量控制器和空气过滤器进入待测样品收集室内;

[0077] 其中,设置于待测样品收集室内的微纳光纤的直径为 $0.7\mu\text{m}$,长度为48mm;微纳光纤的腰区直径为700nm,腰区长度为48mm。

[0078] 2、通过控制模块的激光驱动装置将泵浦光和斯托克斯光从微纳光纤的输入端射入,并通过控制模块的激光驱动装置调节射入微纳光纤的泵浦光的频率为195.6THz、功率

为300mW,斯托克斯光的频率为185.0THz、功率为400 μ W,使得这两束光的频率差为10.6THz,对应于氢气分子的S0(0)转动拉曼跃迁频率。

[0079] 3、将信号放大器连接微纳光纤的输出端,检测并采用数据收集装置记录斯托克斯光的增益信号,根据斯托克斯光的增益信号与氢气浓度之间的关系换算得到待测样本中的氢气的浓度。

[0080] 在本实施例中,由于沿着微纳光纤传输的泵浦光同时满足倏逝场比例大(>50%),模场面积小(<2 μ m²),故本实施例氢气检测方法的受激拉曼效率高,斯托克斯光的增益大,因而即使采用48mm长的微纳光纤,也可以获得很高的氢气探测灵敏度。

[0081] 图3-1为基于本实施例所测得的在不同氢气浓度下,经信号放大器解调出的二阶信号曲线。随着泵浦光的中心波长扫描过氢气分子的S0(0)转动拉曼受激跃迁增益线,斯托克斯光的增益不断改变,经光探测器测量,并由信号放大器进行二次谐波解调后,可以得到如图3-1所示的二阶波信号曲线,该二阶信号曲线的峰-峰值即为气室中氢气分子的受激拉曼信号。当待测样品收集室内的氢气浓度为零时,信号放大器输出的二阶信号的均方差为系统噪声,如图3-1中的曲线0.0%所示;图3-2为基于本实施例所测得的在不同氢气浓度下,受激拉曼信号幅值曲线。本实施例氢检测系统的信号反应时间常数为10秒时,氢气的最小可探测灵敏度为8.6ppm(百万分之一)。

[0082] 图4为基于微纳光纤的受激拉曼光谱学氢气检测的动态范围测量曲线,当氢气浓度小于20%时,其S0(0)转动受激拉曼信号幅值与氢气浓度成正比;当浓度大于20%时,出现非线性,但一直到100%氢气,仍然可以进行有效测量。结合实验中所得的氢气的最小可探测灵敏度为8.6ppm,本系统的动态范围有接近5个量级之高。

[0083] 图5为基于微纳光纤的受激拉曼光谱学氢气检测的阿伦方差测量曲线。该测量结果指出,通过将信号放大器的时间常数增加至250s,本系统的氢气最小可探测灵敏度可以提高到2.5ppm。

[0084] 图6为基于微纳光纤的受激拉曼光谱学氢气检测的响应时间测量曲线。随着2%,4%浓度的氢气以及纯氮气被依次充入气室,受激拉曼信号随之改变,可见该氢气传感器的响应时间小于10s,且恢复时无残余信号,数次重复该测量过程,信号曲线吻合,具有很好的可重复性。

[0085] 以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

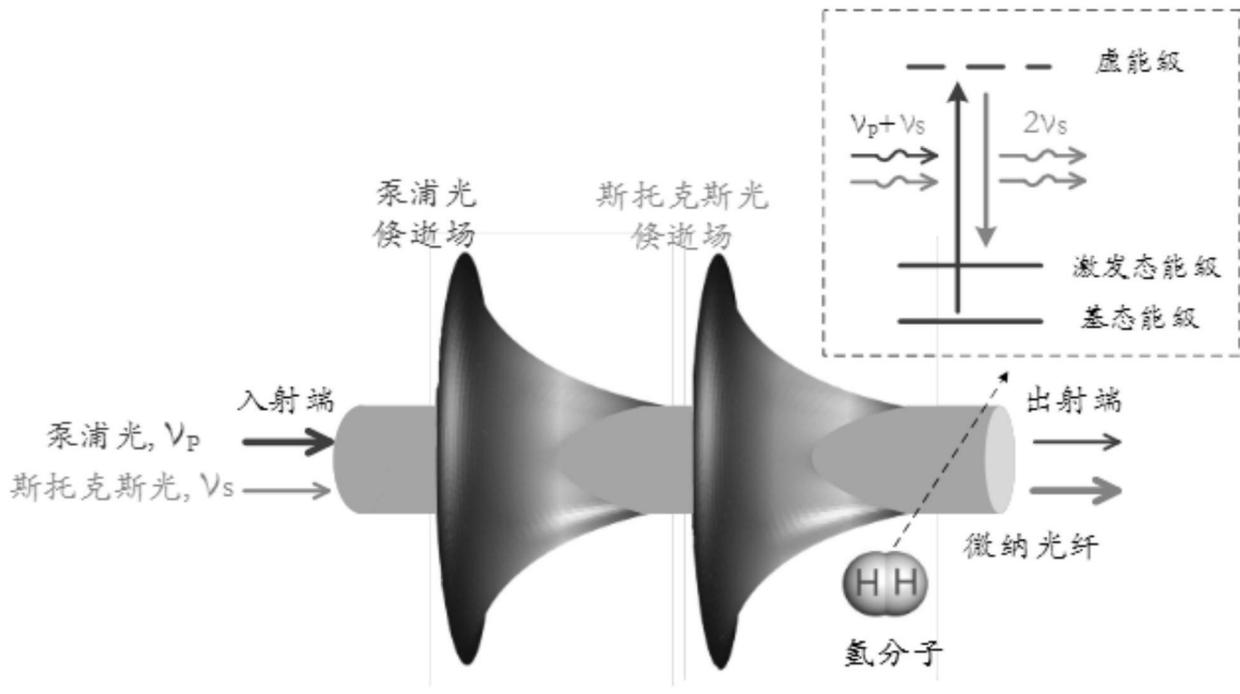


图1

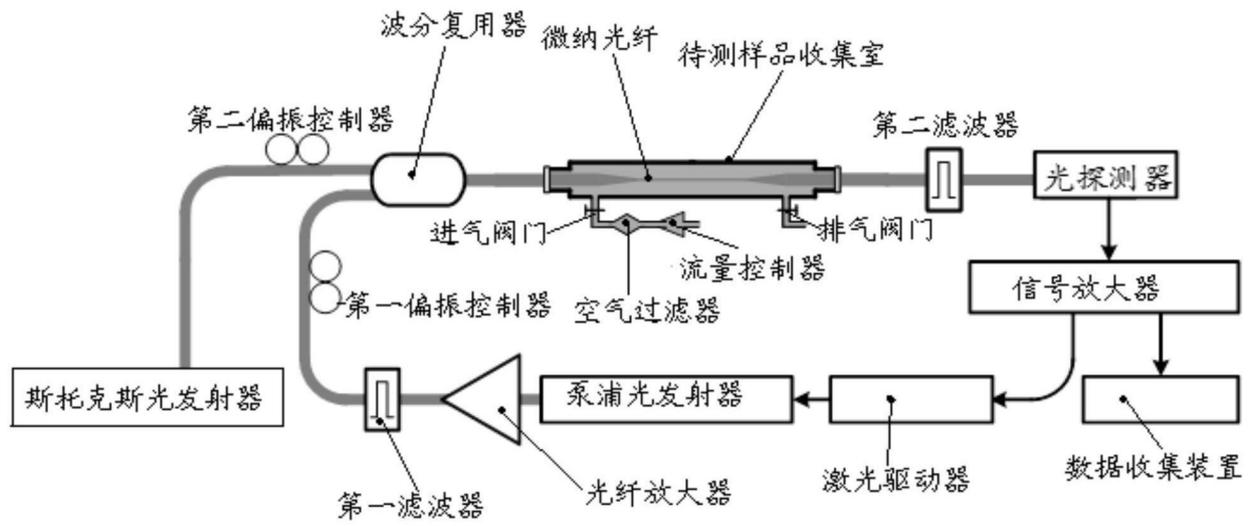


图2

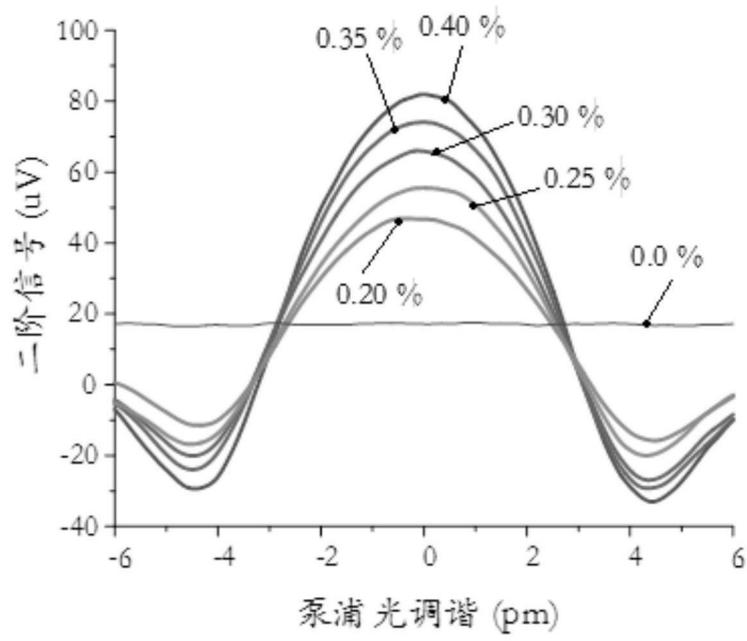


图3-1

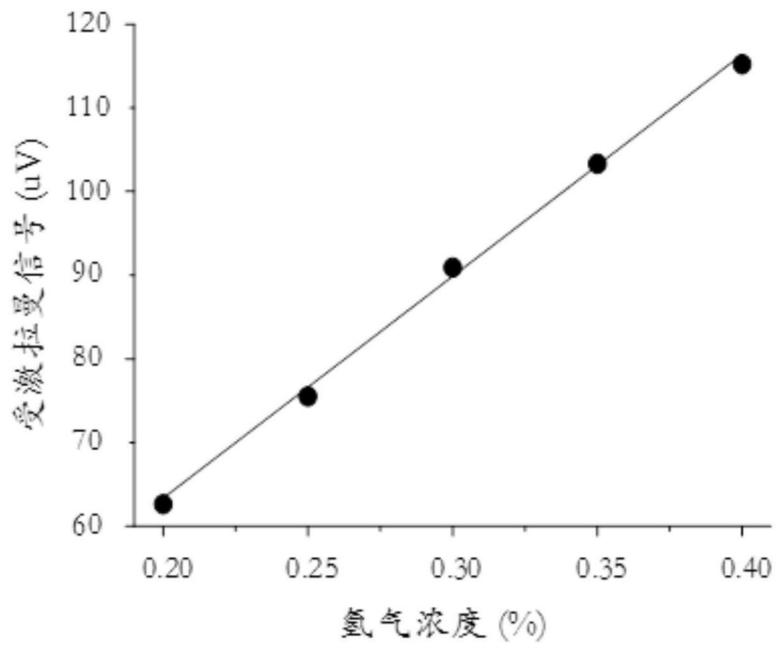


图3-2

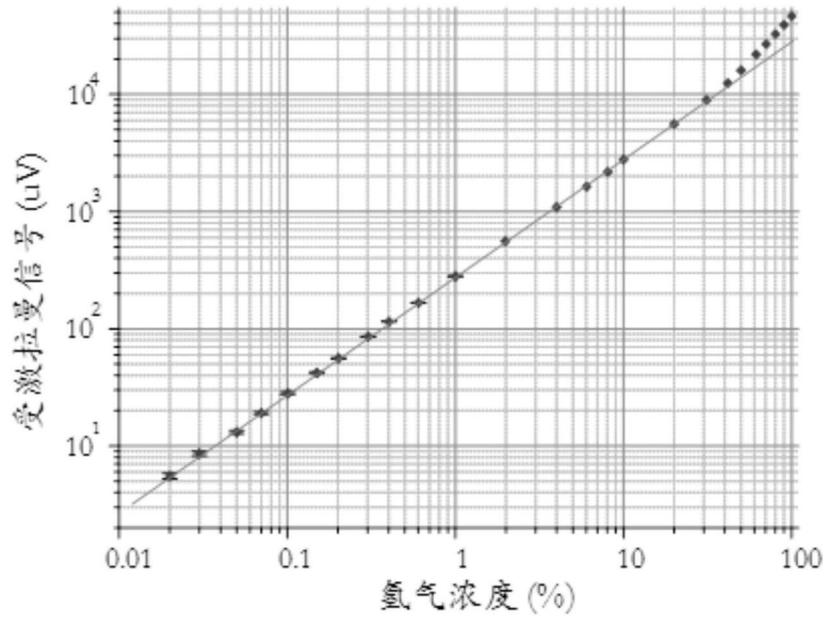


图4

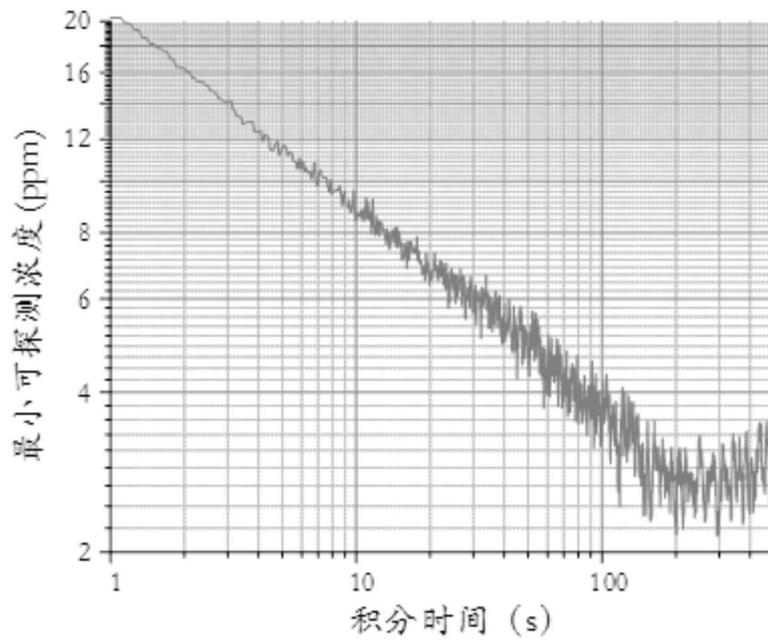


图5

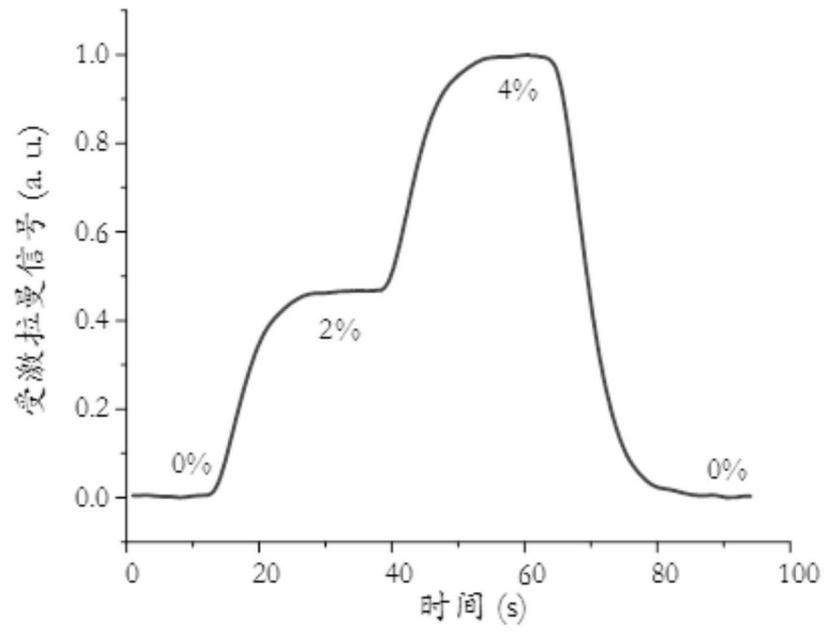


图6