



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104596996 B

(45)授权公告日 2017.05.03

(21)申请号 201510005210.4

审查员 李重阳

(22)申请日 2015.01.06

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 104596996 A

(43)申请公布日 2015.05.06

(73)专利权人 香港理工大学深圳研究院

地址 518000 广东省深圳市南山区高新园
南区粤兴一道18号香港理工大学产
研大楼205室

(72)发明人 靳伟 曹迎春 杨帆 何海律

(74)专利代理机构 深圳中一专利商标事务所

44237

代理人 张全文

(51)Int.Cl.

G01N 21/63(2006.01)

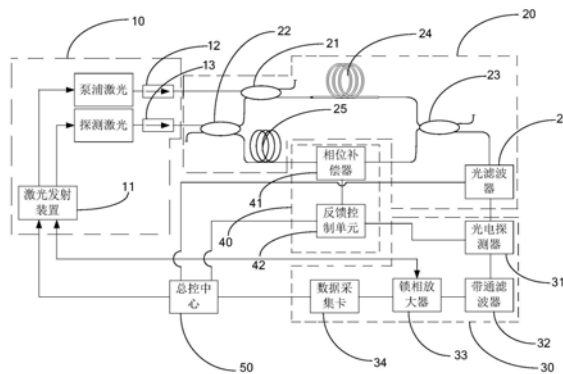
权利要求书2页 说明书8页 附图3页

(54)发明名称

基于空芯光纤光热效应的气体检测方法和系统

(57)摘要

本发明提供了一种基于空芯光纤光热效应的气体检测方法,包括:将待测气体填充至空芯光纤的纤芯内;将探测激光和周期性调制后的泵浦激光输入空芯光纤中;待测气体吸收泵浦激光后产生光热激发效应导致探测激光相位的周期性调制;解调探测激光的相位调制信息,得到待测气体浓度;其中周期性调制为泵浦激光的波长及/或强度的调制。本发明采用泵浦和探测双激光方案进行检测,方法简单而实用,可以实现极小的光斑面积,大大提高了光功率密度,从而使光热信号强度得到增强;本发明可实现有选择性的ppb量级的气体浓度测量,对在近红外波段具有吸收的气体具有普适性。



1. 一种基于空芯光纤光热效应的气体检测方法,其特征在于,包括如下步骤:
将待测气体填充至空芯光纤的纤芯内;
将探测激光和周期性调制后的泵浦激光输入空芯光纤中;
待测气体吸收泵浦激光后产生光热激发效应导致探测激光相位的周期性调制;
解调探测激光的相位调制信息,得到待测气体浓度;
其中,所述周期性调制为泵浦激光的波长及/或强度的调制。
2. 如权利要求1所述的基于空芯光纤光热效应的气体检测方法,其特征在于,所述探测激光为脉冲光;所述得到待测气体浓度为沿着空芯光纤长度的分布式浓度;
解调所述探测激光的相位调制信息为解调脉冲探测激光在空芯光纤中的后向散射光的相位调制信息。
3. 如权利要求2所述的基于空芯光纤光热效应的气体检测方法,其特征在于,解调脉冲探测激光在空芯光纤中的后向散射光的相位调制信息,步骤包括:
将相位调制后的后向散射光与相位未调制的探测激光干涉,得到干涉光;
通过解调干涉光拍频产生的信号,获取沿着光纤长度分布的后向散射光相位变化,进而得到待测气体沿着光纤长度分布的分布式浓度信息。
4. 如权利要求3所述的基于空芯光纤光热效应的气体检测方法,其特征在于,所述探测激光包括两部分;其中,
第一部分为经过声光调制器产生频移的所述脉冲光;
第二部分作为相位未调制的探测激光用于与相位调制后的后向散射光干涉。
5. 如权利要求1至4任一所述的基于空芯光纤光热效应的气体检测方法,其特征在于,所述将待测气体填充至空芯光纤的纤芯内的步骤包括:
用飞秒激光束聚焦至空芯光纤表面对空芯光纤进行烧蚀处理,形成从空芯光纤表面贯穿至纤芯内的微通道;
通过该微通道将待测气体填充至空芯光纤的纤芯内。
6. 一种基于空芯光纤光热效应的气体检测系统,其特征在于,包括:光源组件、光纤激发探测组件、用于对光纤激发探测组件输出的干涉光进行解调的信号检测组件;其中,
所述光源组件包括激光发射装置,该激光发射装置具有发射泵浦激光的泵浦发射端和发射探测激光的探测发射端;
所述光纤激发探测组件包括第一耦合器、第二耦合器、第三耦合器、空芯光纤、参考光纤、光滤波器;其中,
所述第一耦合器的光输入端与泵浦发射端连接,其耦合输出端经空芯光纤连接至第三耦合器的光输入端;
所述第二耦合器的光输入端与探测发射端连接,其耦合输出端分为两路;其中第一路经参考光纤与第三耦合器的输入端连接,第二路连接至第一耦合器的输入端;
所述第三耦合器的耦合输出端与光滤波器的输入端连接;所述光滤波器的输出端与信号检测组件的输入端连接。
7. 如权利要求6所述的基于空芯光纤光热效应的气体检测系统,其特征在于,所述信号检测组件包括用于光电转换的光电探测器、用于低频滤除的带通滤波器、用于谐波检测的锁相放大器、和用于数据存储的数据采集卡;

所述光电探测器的输入端与光滤波器的输出端连接；

所述低通滤波器的输入端与光电探测器的输出端连接,输出端与锁相放大器的输入端连接；

所述锁相放大器的输出端与数据采集卡连接。

8.如权利要求7所述的基于空芯光纤光热效应的气体检测系统,其特征在于,所述基于空芯光纤光热效应的气体检测系统还包括相位平衡稳定装置,该相位平衡稳定装置包括相位补偿器和根据光纤激发探测组件输出的干涉光强度对相位补偿器补偿幅度进行调节反馈控制单元,所述相位补偿器具有接收端,反馈控制单元具有接收端和控制端;其中,

所述相位补偿器用于保持和稳定探测光纤和参考光纤的相位差接收端与反馈控制单元连接；

所述反馈控制单元的接收端与光电探测器的输出端连接、控制端与相位补偿器的接收端连接；

所述反馈控制单元包括根据光纤激发探测组件输出的干涉光强度计算所需补偿相位的代数运算器、将代数运算器计算的补偿相位信息转换为相位误差值信息的低通滤波器、根据相位误差值信息对相位补偿器发出反馈电压信号的比例积分微分电路、将反馈电压信号与预设的交流信号叠加后发送至相位补偿器的信号叠加器；

所述代数运算器的输入端与光电探测器的输出端连接、输出端与低通滤波器的输入端连接；所述低通滤波器的输出端与比例积分微分电路的输入端连接；所述比例积分微分电路的输出端与信号叠加器的输入端连接；所述信号叠加器的输出端与相位补偿器的接收端连接。

基于空芯光纤光热效应的气体检测方法和系统

技术领域

[0001] 本发明属于气体测量技术领域,具体涉及一种基于空芯光纤光热效应的气体浓度探测方法和系统。

背景技术

[0002] 现有对于气体浓度检测方法中,最主要的是基于光吸收的光谱检测技术。该方法中最简单的是采用直接吸收光谱法(DAS),根据朗伯比尔定律,特定波长的光通过待测气体时一部分光能量被待测气体吸收,从而使得透射光功率降低,来分析被测气体浓度。该方法虽然简单有效,但是在实际检测的过程中受到光吸收长度(气室长度)和各种噪声的干扰,造成检测的结果中常常因为干扰因素导致结果不准,使得该方法灵敏度较低。

[0003] 另外一种常用的方法就是可调二极管激光吸收光谱法(TDLAS),其利用激光波长扫过气体吸收线时的吸收强度变化来检测目标气体浓度,结合强度调制(AM)和波长调制(WM)等技术,该方法可通过调制激光的强度/波长有效地降低激光器噪声和其他背景噪声的影响,从而实现较高的气体测量灵敏度。但是该方法依然受到吸收长度的限制,各种增加吸收长度的方法使得系统变得复杂、庞大和对光路精密性要求的提高。

[0004] 空芯光纤可以将光学模式和气体同时束缚在纤芯中,而其具有长距离传输、损耗小、轻便等优点,在光纤中传输的基模光场与气体相互作用,其吸收光谱或激光功率衰减与气体浓度成比例关系,从而可以确定气体浓度的大小。应用光纤作为气室,很容易实现较长的吸收长度,可以提高检测灵敏度;光纤可以弯曲至很小的直径,可实现较小的气室。因此,近来越来越倾向于应用空芯光纤来进行气体浓度的检测。然而,目前的空芯光纤除了支持基模外还支持一些高阶模式,光纤模式之间的干涉噪声影响测量的灵敏度。

[0005] 另外一种基于光谱吸收的气体探测方法就是光热/光声(PTS/PAS)方法。区别于上述直接吸收测量方法,光热/光声法间接测量气体吸收光后产生的温度变化或声波变化,从而得出气体的浓度信息。相对于直接吸收法,该方法产生的信号直接正比于吸收的大小,不受背景光噪声的影响。检测中应用高功率激光器和高灵敏度声波或温度探测器结合,可实现极高的气体浓度探测极限(ppb甚至ppt)。但是使用该方法测量需要与电探测器结合,且只能实现单点测量,无法满足在测量过程中的各种多点和远程测量的需求。

发明内容

[0006] 本发明实施的目的在于克服现有技术的上述不足,提供一种能够实现高灵敏度、大动态范围的一种基于空芯光纤光热效应的气体探测方法及系统。

[0007] 为了实现上述发明目的,本发明实施例的技术方案如下:

[0008] 一种基于空芯光纤光热效应的气体检测方法,包括如下步骤:

[0009] 将待测气体填充至空芯光纤的纤芯内;

[0010] 将探测激光和周期性调制后的泵浦激光输入空芯光纤中;

[0011] 待测气体吸收泵浦激光后产生光热激发效应导致探测激光相位的周期性调制;

[0012] 解调探测激光的相位调制信息,得到待测气体浓度;

[0013] 其中,所述周期性调制为泵浦激光的波长及/或强度的调制。

[0014] 本发明的检测方法测量步骤采用泵浦激光激发光热效应产生相位调制,应用探测激光进行相位探测。当气体与特定波长光束发生相互作用时,部分光能量被吸收,气体被激发到高能级态,进而通过分子碰撞等非辐射过程回到基态并产生局域热沉积,从而引起介质温度的变化;周期性的光吸收产生周期性的温度变化,从而周期性的改变了探测光在光纤中传播的有效折射率以及光纤长度,进而周期性的改变了探测光的相位。该相位变化可以通过马赫-泽德,法布里-珀罗,萨格纳克或其他光干涉仪解调,其输出和气体浓度成正比的电信号,即可获得待测气体浓度结果。

[0015] 本发明进一步还提出一种基于空芯光纤,进行分布式气体浓度检测的方法,包括如下步骤:

[0016] 将待测气体填充至空芯光纤的纤芯内;

[0017] 将泵浦激光耦合入空芯光纤中对待测气体进行光热激发;

[0018] 对泵浦激光的波长及/或强度进行周期性调制;

[0019] 如上所述,周期性调制的泵浦激光对探测激光的相位产生周期性调制,探测光沿着光纤长度的相位调制大小反映着沿着光纤长度分布的气体浓度。本发明利用一种基于外差检测的 ϕ -OTDR 技术测量探测光沿着光纤长度分布的相位调制大小。其结合了传统的光时域反射技术和相干外差检测技术测量光沿着光纤长度分布的相位调制大小。将探测激光分为两部分,一部分探测光经过声光调制器产生脉冲信号并且产生频移,其入射到待测空芯光纤里会发生后向散射,沿着光纤长度分布的后向散射光与另一部分探测光相干检测,通过拍频产生的信号反映着沿着光纤长度分布的相位变化,进而得到沿着光纤长度分布的气体浓度信息。其分布测量的空间分辨率由声光调制器产生的脉冲宽度决定,而浓度的测量下限则由相干检测的相位灵敏度决定。

[0020] 本发明还提出一种实现上述光热气体浓度检测方法的系统,包括:光源组件、光纤激发探测组件、用于对光纤激发探测组件输出的干涉光进行解调的信号检测组件;其中,

[0021] 所述光源组件包括激光发射装置,该激光发射装置具有发射泵浦激光的泵浦发射端和发射探测激光的探测发射端;

[0022] 所述光纤激发探测组件包括第一耦合器、第二耦合器、第三耦合器、空芯光纤、参考光纤、光滤波器;其中,

[0023] 所述第一耦合器的光输入端与泵浦发射端连接、耦合输出端经空芯光纤至连接第三耦合器的光输入端;

[0024] 所述第二耦合器的光输入端与探测发射端连接、耦合输出端分为两路;其中第一路经参考光纤与第三耦合器的输入端连接,第二路连接至第一耦合器的输入端;

[0025] 所述第三耦合器的耦合输出端与光滤波器的输入端连接;所述光滤波器的输出端与信号检测组件的输入端连接。

[0026] 本发明实施例的系统针对上述检测方法步骤,大大提高测量过程中的泵浦光的光功率密度,从而使光热光声信号强度进一步得到提高;还可以有效地降低干扰因素造成的影响,而且对近红外吸收波段的气体具有普适性。

附图说明

- [0027] 下面将结合附图及实施例对本发明作进一步说明,附图中:
- [0028] 图1为本发明实施例空芯光子带隙光纤的结构示意图;
- [0029] 图2为本发明实施例基于空芯光纤进行分布式气体检测的示意图;
- [0030] 图3为本发明实施例光热气体检测系统的示意图;
- [0031] 图4为图3中反馈控制单元的结构示意图;
- [0032] 图5为图3中传感光纤与光路衔接的结构示意图。

具体实施方式

[0033] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合附图及实施例,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。

[0034] 本发明实例采用一种用光热效应检测替代现有直接吸收导致的损耗来进行气体检测。参见图1-3。本发明中采用的空芯光纤的结构如图1所示,该空芯光纤1呈管状,包括环形包层2和位于环形包层2内的纤芯3;其中,纤芯3包括沿光纤轴向贯穿空芯光子带隙光纤1的孔芯部3a,以及分布于孔芯部3a周围的若干轴向方向贯穿空芯光子带隙光纤1的微孔部3b;上述环形包层2和微孔部3b本身材质选用石英。

[0035] 上述空芯光纤1中孔芯部3a的直径为5-20 μm ,并且微孔部3b根据检测的需求,其分布环绕于孔芯部3a周围,也可以呈环形形状分布,且其环形外径为10 μm 级;测量过程中纤芯3用于填充待测气体;环形包层2至少保证整体空芯光纤1的强度和韧性,整体光纤直径约为120 μm 。该空芯光纤的结构设计,使特定波长的光束耦合进入空芯光纤1,并由光子带隙特性束缚在低折射率纤芯中传播,因此绝大部分的光能量位于孔芯部3a和微孔部3b中。相比其他消逝场耦合的光纤类型,该空芯光子带隙光纤能够提供极大的光-气体作用效率,从而提高气体检测的信号大小,提升了气体检测的灵敏度。

[0036] 基于上述空芯光纤1,采用光热效应气体检测方法进行测量时,以该空芯光纤作为传感媒介,代替传统的自由空间气室或者空腔,可以极大提高光热光声的激发效率,并且将空芯光子带隙光纤弯曲到很小的半径(如1厘米)也不会带来明显的损耗,这都可以大大减少现有的气体浓度检测中传感器的体积尺寸和待测气体的消耗量;而且由于光纤本身能够以极小的损耗支持长距离的光传输,可以大大提高光和物质作用的长度,增大传感信号;另外在测量的过程中,激光光束被限制于光纤中进行传输,可以实现极小的光斑面积,大大提高光功率密度,从而使光热光声信号强度进一步得到提高。

[0037] 基于现有的气体测量方法的缺陷和本发明上述空芯光纤的优势,本发明还提出一种基于空芯光纤光热效应的气体检测方法,采用如下过程进行:

[0038] S10,通过自由扩散或者气压差驱动的方式将待测气体填充至空芯光纤的纤芯3中;

[0039] S20,将探测激光和周期性调制后的泵浦激光输入空芯光纤中;

[0040] 在该步骤中,周期性调制后的泵浦激光能对待测气体进行光热激发,因为气体与特定波长光束发生相互作用时,部分光能量被吸收,气体被激发到高能级态,进而通过分子

碰撞等非辐射过程回到基态并产生局域热沉积,从而引起介质温度的变化;探测激光经过被光热激发的待测气体,产生相位调制。

[0041] S30,解调探测激光的相位调制信息,即可得到待测气体浓度;

[0042] 本发明上述方法步骤S10中,将气体通过自由扩散和气压差驱动填充至充当气体测量吸收腔的空芯光子带隙光纤1的纤芯3中,将纤芯3中的空间作为气体检测的吸收腔。当进一步上述步骤S10中将气体填充至吸收腔之后,步骤S20中将泵浦激光耦合至光纤中对气体进行激发,当泵浦激光耦合进入空芯光纤,气体与特定波长光束发生相互作用时,部分光能量被吸收,气体分子被激发到高能态,进而通过分子之间碰撞等非辐射过程回到基态并产生局域热沉积,从而引起介质温度的变化。

[0043] 在基模传输情况下,泵浦激光光强沿空芯光纤横截面方向上会近似呈高斯分布:

$I_{\text{泵浦}}(r) = \frac{2P_{\text{泵浦}}}{\pi w^2} e^{-2r^2/w^2}$;其中, $P_{\text{泵浦}}$ 为泵浦激光总功率, w 为泵浦激光光束半径。假定完全能量

转化即吸收的光功率全部转化为热量,由于光吸收产生的局部热量产生率可以用下式表示

$H(r, z) = A\bar{\chi}(\lambda_{\text{泵浦}})I(r, z)$; $\bar{\chi}(\lambda_{\text{泵浦}})$ 为峰值归一化的吸收线型函数, $A = \alpha C$ 是峰值吸收系数,

C 是相对气体浓度, α 是100%气体浓度时候的峰值吸收系数。由于热沉积,光纤纤芯中的气体会被加热,从而引起气体温度、密度、压强的重新分布,这使得基模的有效折射率和光纤长度被改变。采用一阶近似,基模的有效折射率改变率 $\eta = \Delta n_{\text{eff}}/n_{\text{eff}}$ 和光纤的长度改变率 $\varepsilon = \Delta l/l$ 之和为:

$\eta(z) + \varepsilon(z) = kA\bar{\chi}(\lambda_{\text{泵浦}})I_0(z)$,其中 k 是比例系数,由此推出探测光经过长度

为 L 的光纤后,基模的相位变化为 $\Delta\phi = \left(\frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda_{\text{探测}}} \cdot \frac{2k}{\pi w^2} \right) A\bar{\chi}(\lambda_{\text{泵浦}}) \cdot \int_{z=0}^{z=L} P_{\text{泵浦}}(z) dz = k^* A\bar{\chi}(\lambda_{\text{泵浦}}) \bar{P}_{\text{泵浦}} L$,

其中 $\lambda_{\text{探测}}$ 是探测光波长, n_{eff} 是光纤中基模的有效折射率, L 为空芯光纤长度, $\bar{P}_{\text{泵浦}}$ 为泵浦光沿着光纤长度的平均功率, k^* 为比例系数。该相位变化量可以由高灵敏度光纤干涉仪测量得到。因此在这时通过对探测光相位改变进行测量,便可以测出气体的浓度。同时,在这一步骤中参见图1所示,在空芯光纤中,探测激光和泵浦激光可同向亦可反向传播,因为基于各自的机理和用途在光纤内传播,不会引起相互的干扰,但是波长应相互避开,否则在探测光的接收时,导致与泵浦激光无法区分。

[0044] 步骤S30对探测激光的探测结果进行分析之后输出,其中对探测激光进行解调,得出探测激光的相位调制之后,便可以分析出待测气体浓度信息。当然,在本发明的上述实施例中,可以采用马赫-泽德干涉仪或其他干涉仪对相位调制后的探测激光进行分析,测量探测激光的相位改变量。

[0045] 其中,基于不同的待测气体浓度检测的内容,所解调探测激光也可以相应进行选择,如:探测激光在光纤中沿光纤分布的后向散射激光的相位能体现光纤长度分布的气体浓度信息;而探测激光的经过光纤后的正向传输光的相位变化体现了整体光纤内气体的平均浓度。通过干涉对相位调制后的正向传输光或者后向散射激光的相位变化信息进行检测,即可按照上述公式分析计算得到所要待测的气体浓度。

[0046] 采用本发明的光热效应气体测量方法,大大提高了气体检测的适用性。除了能实现单点气体测量的通用功能之外,还可以用于分布式气体测量。其中,分布式检测中,探测

激光为频移的脉冲光,其由声光调制器产生。图2为本发明实施例基于空芯光纤进行分布式气体检测的示意图;具体地操作过程中光热信息激发部分与前述类似,强度及/或波长调制的泵浦激光通过光纤耦合器进入空芯光纤,与填充在纤芯中的待测气体发生相互作用产生沿光纤长度分布的光热相位调制信号。不同的是,可以采用探测激光通过基于外差检测的 ϕ -OTDR技术实现对空芯光纤中的相位变化进行分布式检测。具体过程为:将探测激光经过光隔离器400和光纤耦合器后分成两束,其中第一束光经过声光调制器、掺铒光纤放大器100、可调波长滤波器200、光环形器300和光纤耦合器进入空芯光纤1与待测气体发生作用。气体吸收产生的光热效应调制后向散射光的相位,将该后向散射光按照图2所示的光路方向经过光纤耦合器、光环形器300和可调波长滤波器输出;第二束光经过单模光纤做成的参考光纤后与输出的后向散射光相干检测。其中声光调制器通过信号发生器和外部驱动电路控制产生频移和光脉冲信号,掺铒光纤放大器100和波长滤波器200结合用于放大进入空芯光纤的探测光功率并降低光纤放大器的ASE噪声。探测激光经过待测气体时,除了被相位调制后继续沿光纤方向传播,并且后向散射光的相位也被调制。后向散射光和经过参考光纤的探测激光通过光纤耦合器混合后由平衡探测器利用外差法检测出信号大小,由于分布式探测的空间分辨率由声光调制器输出的脉冲宽度决定,通过对外差信号的分析处理可获悉气体浓度沿光纤的分布情况。从上述步骤可以看出上述气体浓度沿光纤长度的分布情况是从后向散射光相位调制信息沿着光纤长度分布得到的,其分布式测量的空间分辨率由声光调制器产生的脉冲宽度决定,而浓度的测量下限由相干检测的相位灵敏度决定。

[0047] 在上述的分布式气体测量过程中,考虑到分布式检测的需求,为实现气体能够沿光纤任意位置快速进入空芯带隙光纤的纤芯,产生感应信号,我们采用光纤侧向刻蚀微通道的方法。合适功率的飞秒激光经过反射镜和聚焦透镜后,聚焦到空芯光纤表面,使得沿激光束的石英材料被烧蚀,直至从光纤表面贯穿到空气纤芯。这样就制作了一个沿光纤侧向的空气微通道,以便于待测气体快速进入光纤。用同样的方法,可以沿光纤轴向刻蚀多个微通道。该飞秒激光制作的微通道,其引起的平均插入损耗可低至每通道0.03dB。

[0048] 在本发明的空芯光纤气体检测技术中,所述的泵浦激光为窄线宽激光器,波长对准待测气体的吸收线,其激光强度/波长作周期性变化。探测激光为窄线宽波长可调谐激光器,其输出波长应避开吸收线和泵浦激光波长。

[0049] 针对上述测量方法,为配合上述检测方法的实施,本发明提出一种包括实施上述方法的单点光热气体检测系统,进一步参见图3。其中包括:光源组件10、光纤激发探测组件20、用于对光纤激发探测组件20输出的干涉光进行检测的信号检测组件30;其中,

[0050] 光源组件10包括激光发射装置11,该激光发射装置11具有发射泵浦激光的泵浦发射端和发射探测激光的探测发射端;

[0051] 光纤激发探测组件20包括第一耦合器21、第二耦合器22、第三耦合器23、传感光纤24、参考光纤25、光滤波器26;其中,

[0052] 第一耦合器21的光输入端与泵浦激光发射端连接、耦合输出端经空芯光子带隙光纤至连接第三耦合器23的光输入端;

[0053] 第二耦合器22的光输入端与探测激光发射端连接、耦合输出端分为两路;其中第一路经参考光纤25与第三耦合器23的输入端连接,第二路连接至第一耦合器的输入端;

[0054] 第三耦合器23的耦合输出端与光滤波器26的输入端连接;光滤波器26的输出端与

信号检测组件30的输入端连接。

[0055] 信号检测组件30包括用于光电转换的光电探测器31、用于低频滤除的带通滤波器32、用于谐波检测的锁相放大器33、和用于数据存储的数据采集卡34；光电探测器31的输入端与光滤波器的输出端连接；带通滤波器32的输入端与光电探测器31的输出端连接；带通滤波器32的输出端与锁相放大器33的输入端连接；锁相放大器33的输出端与数据采集器34连接。

[0056] 在上述光源组件10、光纤激发探测组件20、信号检测组件30之外，上述系统还包括相位平衡稳定组件40，该相位平衡稳定组件40包括相位补偿器41和根据光纤激发探测组件20输出的干涉光强度对相位补偿器41补偿幅度进行调节的反馈控制单元42，相位补偿器41具有接收端，反馈控制单元42具有接收端和控制端；其中，相位补偿器41的接收端与反馈控制单元42连接；反馈控制单元42的接收端与光电探测器31的输出端连接、控制端控制相位补偿器41。相位补偿器41在本发明可以采用压电陶瓷实现，具体使用中参考光纤缠绕在压电陶瓷上，用于调节和稳定探测光纤和参考光纤的相位差。

[0057] 并且，为了保证相位补偿准确的进行，进一步反馈控制单元42包括根据光纤激发探测组件20输出的干涉光强度进行所需补偿相位计算的代数运算器421、根据代数运算器421的相位补偿信息进行相位误差值信息转换的低通滤波器422、根据相位误差值信息对相位补偿器41发出反馈电压信号的比例积分微分电路423、将反馈电压信号与预设的交流信号叠加后发送至相位补偿器的信号叠加器424；进一步参见图4，图4为图3中反馈控制单元的结构示意图；代数运算器421的输入端与光电探测器31的输出端连接、输出端与低通滤波器422的输入端连接；低通滤波器422的输出端与比例积分微分电路423的输入端连接；比例积分微分电路423的输出端与信号叠加器424的输入端连接；信号叠加器424的输出端与相位补偿器41的接收端连接。

[0058] 为了保证激光发射装置11发出的泵浦激光和探测激光的单向性，因此可以分别在泵浦发射端与第一耦合器21的光输入端之间设置第一光隔离器12、探测发射端与第二耦合器22的光输入端之间设置第二光隔离器13。在实际检测中，激光发射装置11可以选用DFB激光发生器进行。以乙炔气体为例，泵浦激光波长可选为 $1.53\mu\text{m}$ ，对应乙炔气体 $\nu_1+\nu_3$ 泛频吸收带的P(9)吸收线，同时激光电流作周期性调制。周期性调制的泵浦激光，通过第一光隔离器12之后，用3dB第一光纤耦合器21耦合入传感光纤24，并与填充在传感光纤24中的待测气体发生相互作用，产生光热效应。探测激光由另一波长可调外腔激光器发出，同样通过第二光隔离器13和3dB第二光纤耦合器22进入传感光纤24，用来检测空芯光子带隙光纤中的相位变化。在检测的过程中泵浦激光的强度/波长通过锁相放大器33内置的信号发生器进行周期性调制，而探测激光波长则固定在 $1.55\mu\text{m}$ 。进一步地，为了监测探测激光在传感光纤24中产生的相位变化，因此采用参考光纤25与传感光纤24组成马赫-泽德干涉仪进行检测；具体为，采用将传感光纤24作为传感光纤，与另一根普通单模光纤即参考光纤25组成马赫-泽德干涉仪，然后使探测激光从第二耦合器22的耦合输出端分别进入传感光纤24和参考光纤25中。那么再将从传感光纤24中传输出的相位改变后的探测激光和参考光纤25中输出的没有相位改变的探测激光于第三耦合器23中耦合形成干涉光。能够将干涉光的相位调制信息转化为强度变化信息，该强度变化可以用光电探测器31测得。

[0059] 同时，在上述组成的马赫-泽德干涉仪中，为了保证最大化的将光热效应产生的相

位调制信号转换成强度调制信号,需要将相位直流分量通过参考光纤25之后连接相位平衡稳定装置40稳定在正交工作点 $\pm 90^\circ$ 相位点。因此为实现相位稳定,在本发明中采用上述相位平衡稳定组件40,对相位进行稳定控制,具体地,干涉仪的输出干涉光的相位 ϕ 、强度信号经过代数处理得到其 $\cos(\phi)$ 的值,设定要稳定到的相位值 ϕ_0 (这里设为 90°),然后代数运算器421对该 ϕ_0 进行所需补偿相位计算得到 $\sin(\phi_0 - \phi) = \sin(\phi_0)\cos(\phi) - \cos(\phi_0)\sin(\phi)$,当实际相位和设定相位接近时,可近似认为 $\sin(\phi_0 - \phi) \approx \phi_0 - \phi$,该运算的结构用于表示需要进行补偿相位的值的信息,经过低通滤波器422进行转换便可以得到相位的误差值信息。然后通过比例微分积分电路423根据相位的误差值生成反馈电压信号去控制相位补偿器41进行相位补偿。但是在将反馈电压信号发送至相位补偿器41时需要通过信号叠加器将反馈电压信号和预设的小交流信号叠加后发送至相位补偿器41上控制相位补偿器41产生补偿相位。在实施中,相位补偿器41用柱状压电陶瓷PZT来实现。当电压信号施加到PZT电极上时,PZT产生形变,从而改变缠绕在上面的光纤长度,进一步改变沿光纤的相位信息。也可以采用其他的相位稳定或解调方法来实现探测激光相位变化的测量。而且在干涉之前,从传感光纤24中输出的光束中除了被改变相位后的探测激光,还存在泵浦激光,可采用光滤波器26滤除泵浦激光,使干涉光的分析不受干扰;之后再干涉光进入光电探测器31转换成电压信号。光电探测器31输出电压信号依次通过带通滤波器32滤除其他频率噪声、谐波检测的锁相放大器33、数据采集卡34。当然,为了保证本系统之间能够形成全自动控制,在上述组件之外,本系统还具有总控中心50,其可以采用芯片、单片机等实现,可以对数据采集卡34的数据进行存储和分析,并通过数据内容对上述光源组件10、光纤激发探测组件20、信号检测组件30的工作进行统筹控制。

[0060] 当然,在上述整体的系统光路传输中,除了用作待测气体的吸收腔传感光纤24采用本发明上述空芯光纤之外,其余所有光路均可以采用普通的单模光纤完成,在光路连接时传感光纤24的两端可通过机械连接或熔融焊接等方式与光路中的单模光纤连接,图5为图3中传感光纤与光路衔接的结构示意图;其有两种实现方式,一种为在传感光纤24与光路中的单模光纤连接处留有一个微小的空隙241,将该空隙241控制 $20\mu\text{m}$,并将连接处封闭于两个微型的气室242中,气室242有进气口/出气口与外界连通,待测气体便可以通过该气室242的进气口进入传感光纤24中。除了上述这一方式之外,也可以将传感光纤24与光路中的单模光纤衔接处熔接,然后采用空芯光纤侧向激光打孔的方法让待测气体进入至传感光纤24中。

[0061] 为使上述装置测量中的效果进行理解,本发明在此以乙炔气体的检测为例进行举例:为检测乙炔气体的测量,首先将10ppm(ppm=百万分之一)体积浓度的标准乙炔气体通过气压差的方式填充到传感光纤24中;泵浦激光波长选择乙炔气体的P(9)吸收线,其波长为 1530.37nm ,在此波长处乙炔分子的吸收谱线强度为 $1.211 \times 10^{-20}\text{cm}^{-1}/(\text{molecule cm}^{-2})$,其对应于气体在室温时谱线强度 $0.3\text{cm}^{-2}/\text{atm}$;泵浦激光采用波长/强度调制的方式,调制频率为50kHz,锁相放大器探测波长/强度调制产生的二次谐波信号。测量二次谐波信号随着波长变化的光热信号谱时,将锁相放大器时间常数设置为0.1s,滤波器斜率设为18dB/Oct,通过扫描泵浦光波长得到乙炔分子在P(9)吸收线附近的吸收光谱。将泵浦激光波长调整至远离气体吸收峰,将锁相放大器时间常数设置为1s,保持滤波器斜率不变,通过测量二次谐波信号随着时间变化得到噪声值。远离吸收线时的背景信号(基底信号)可能是由残余泵浦

强度调制引起的。当泵浦光进入10m长的空芯光纤的入射光功率为15.3mW时,通过计算二阶信号的峰峰值和远离吸收峰的信号噪声计算信噪比为5270,对应最小乙炔可探测浓度为2ppb (ppb=十亿分之一)。该实验用10m长的空芯光纤作为传感光纤,实现了ppb量级乙炔气体探测。上述测试弥补了现有的光纤气体传感中容易受干扰和灵敏度不高的问题。

[0062] 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,均应包括在本发明的保护范围之内。



图1

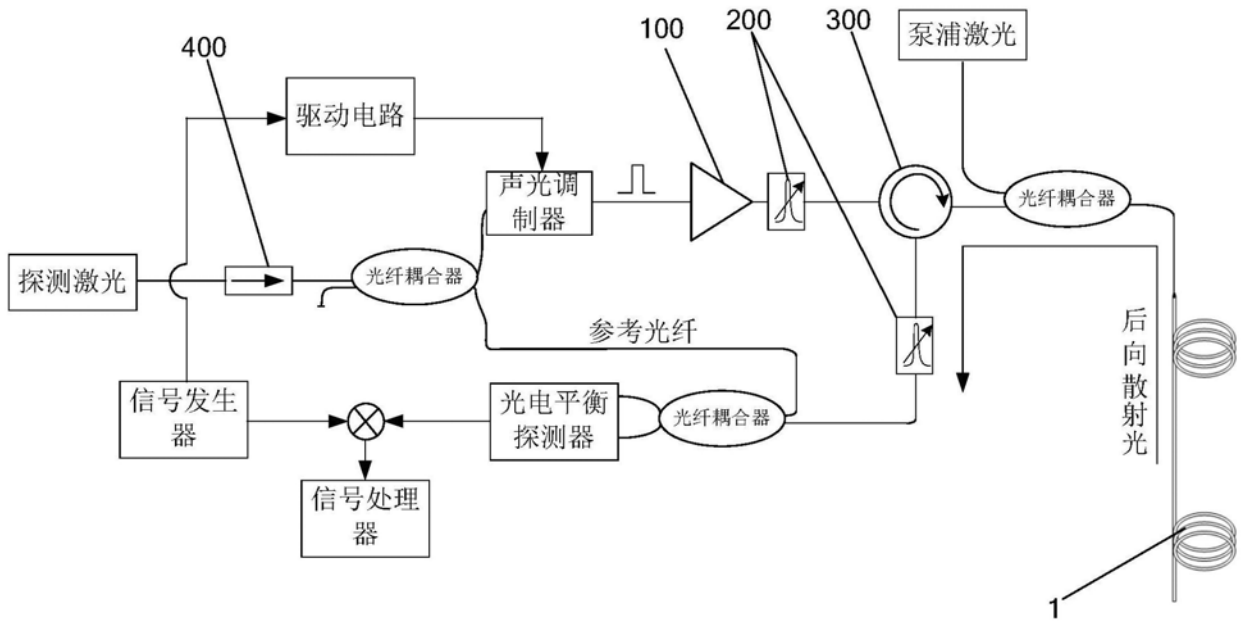


图2

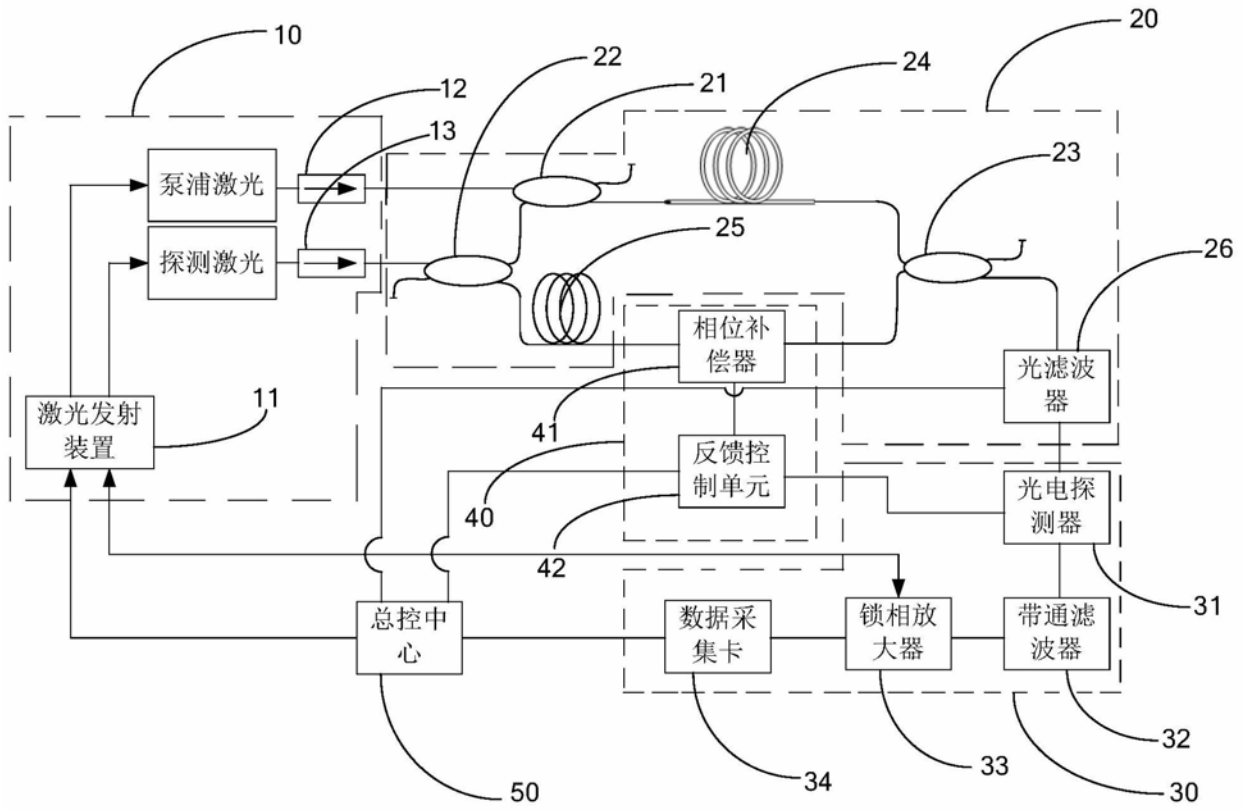


图3

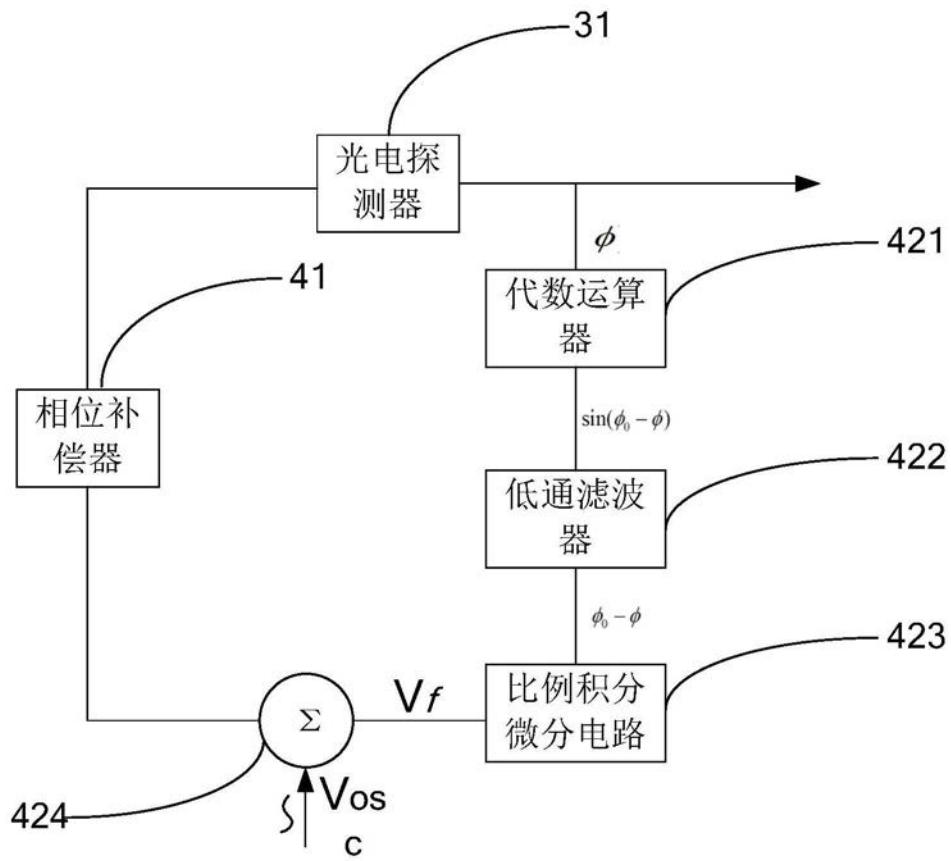


图4

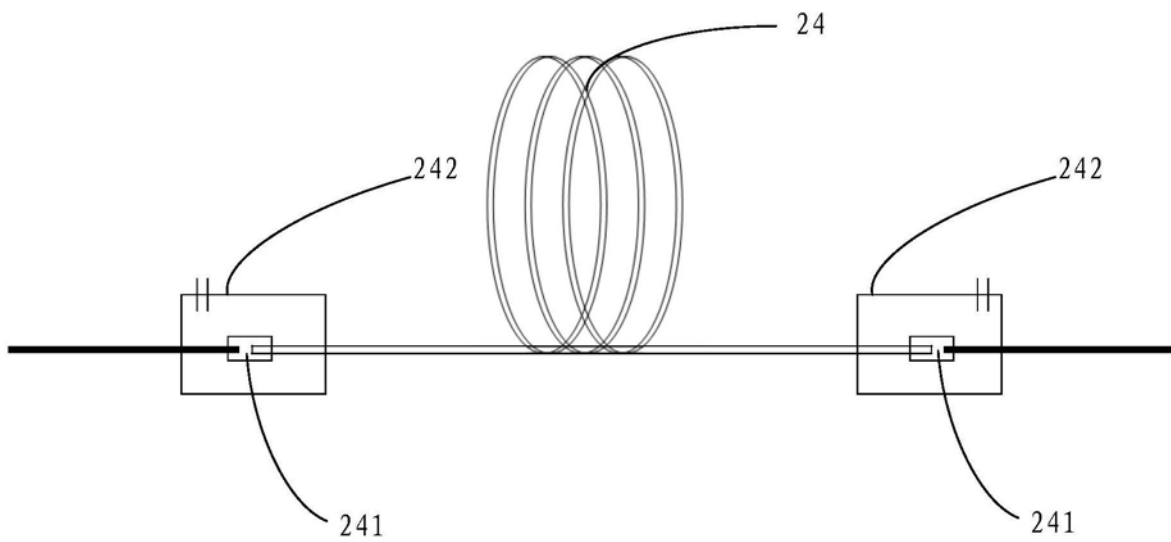


图5