



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 116297331 B

(45) 授权公告日 2025. 09. 05

(21) 申请号 202310312288.5

(22) 申请日 2023.03.27

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 116297331 A

(43) 申请公布日 2023.06.23

(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粤海街道高新技术产业园南区粤兴一道18号
香港理工大学产学研大楼205室

(72) 发明人 靳伟 姜寿林 赵双祥 郑凯元

何海律

(74) 专利代理机构 深圳市君胜知识产权代理事

务所(普通合伙) 44268

专利代理师 王娅洁

(51) Int. Cl.

G01N 21/41 (2006.01)

G01N 21/01 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 219871005 U, 2023.10.20

审查员 朱筠清

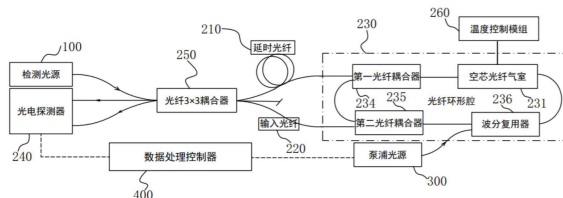
权利要求书2页 说明书8页 附图5页

(54) 发明名称

一种全光纤化的碳同位素检测系统以及检测方法

(57) 摘要

本发明公开一种全光纤化的碳同位素检测系统以及检测方法,包括:检测光源,延时光纤和输入光纤,光纤环形通路包括空芯光纤气室,空芯光纤气室相对立的两端分别连接延时光纤和输入光纤,探测光在光纤环形通路中传播并循环经过空芯光纤气室;空芯光纤气室内填充有待检测的气体;泵浦光源连接光纤环形通路,并用于产生泵浦光并通入到空芯光纤气室,气体通过泵浦光的作用而改变温度和折射率,探测光经过空芯光纤气室的气体而改变相位;光电探测器用于接收延时光纤和输入光纤中所传回的相位改变后的探测光;数据处理控制器分别电连接光电探测器与泵浦光源。解决当下的碳同位素检测装置因光学气室大而导致耗气量大、成本高、体积大的问题。



1. 一种全光纤化的碳同位素检测系统,其特征在于,包括:检测光源,所述检测光源用于发出探测光;

延时光纤和输入光纤,所述延时光纤和所述输入光纤均连接所述检测光源,所述探测光在经过所述延时光纤和所述输入光纤后延时不同;

光纤环形通路,其包括空芯光纤气室,所述空芯光纤气室相对立的两端分别连接所述延时光纤的输出端和所述输入光纤的输出端,所述探测光在所述光纤环形通路中传播并循环经过所述空芯光纤气室;所述空芯光纤气室内填充有待检测的气体;

泵浦光源,所述泵浦光源连接所述光纤环形通路,并用于产生泵浦光并通入到所述空芯光纤气室,所述气体通过所述泵浦光的作用而改变温度和折射率,所述探测光经过所述空芯光纤气室的气体而改变相位;

光电探测器,用于接收所述延时光纤和所述输入光纤中所传回的相位改变后的探测光;

数据处理控制器,所述数据处理控制器分别电连接所述光电探测器与所述泵浦光源。

2. 根据权利要求1所述的全光纤化的碳同位素检测系统,其特征在于,所述检测光源包括:放大自发辐射光纤光源、超辐射发光二极管或超连续谱光源。

3. 根据权利要求2所述的全光纤化的碳同位素检测系统,其特征在于,所述泵浦光源所发出的泵浦光的波长可调谐,所述泵浦光的波长的可调谐范围覆盖不同的碳同位素吸收谱线;

所述泵浦光的波长同时进行高频调制和低频扫描。

4. 根据权利要求3所述的全光纤化的碳同位素检测系统,其特征在于,所述泵浦光源包括:DFB种子激光器,所述DFB种子激光器所发出的泵浦光的波长在预定范围内可调谐;

掺铥光纤放大器,所述掺铥光纤放大器连接所述DFB种子激光器。

5. 根据权利要求1所述的全光纤化的碳同位素检测系统,其特征在于,所述光纤环形通路还包括:第一光纤耦合器,所述第一光纤耦合器具有第一端口、第二端口以及第一公共端口,所述第一端口与所述延时光纤连接,所述第一公共端口与所述空芯光纤气室的一端连接;

第二光纤耦合器,所述第二光纤耦合器具有第三端口、第四端口以及第二公共端口,所述第三端口与所述输入光纤连接,所述第二公共端口与所述空芯光纤气室的另一端连接;

所述第二端口与所述第四端口连接,从而使所述探测光在第一光纤耦合器、第二光纤耦合器与所述空芯光纤气室内传播并多次经过所述空芯光纤气室。

6. 根据权利要求5所述的全光纤化的碳同位素检测系统,其特征在于,所述第二公共端口与所述空芯光纤气室的另一端通过波分复用器连接,所述波分复用器连接所述泵浦光源,且用于所述泵浦光源发出的泵浦光和探测光进行合波。

7. 根据权利要求5所述的全光纤化的碳同位素检测系统,其特征在于,所述第一光纤耦合器的所述第二端口和所述第一端口的分光比不小于7:3;

所述第二光纤耦合器的所述第四端口和所述第三端口的分光比不小于7:3。

8. 根据权利要求1所述的全光纤化的碳同位素检测系统,其特征在于,所述延时光纤和所述输入光纤通过光纤耦合器连接所述检测光源;

所述光纤耦合器至少包括三个输入端口和二一个输出端口;

所述光纤耦合器的一个输入端口与所述检测光源连接,另外两个输入端口分别连接所述光电探测器;

所述光纤耦合器的一个输出端口与所述延时光纤连接,另一个输出端口与所述输入光纤连接;

所述碳同位素检测装置还包括温度控制模组,所述温度控制模组用于对所述空芯光纤气室进行制冷和加热。

9.一种全光纤化的碳同位素检测方法,其特征在于,用于如权利要求1-8任一所述的全光纤化的碳同位素检测系统,所述方法包括以下步骤:

通过泵浦光源产生泵浦光,并使所述泵浦光进入到空芯光纤气室内,所述空芯光纤气室内填充待检测的气体,其中所述泵浦光与气体分子发生相互作用而释放热量,改变气体的温度和折射率;

通过检测光源发出探测光,使所述探测光分别通过延时光纤和输入光纤进入到光纤环形通路中,且分别从相对立的两端进入到所述空芯光纤气室;其中,所述探测光经过改变温度和折射率的气体后的相位发生变化;

通过光电探测器接收相位发生变化后的所述探测光,并对所述探测光进行相位检测,获得气体与泵浦光作用后的折射率变化量;

基于带碳同位素的气体分子的浓度与折射率的变化量关系,获取碳同位素浓度信息。

10.根据权利要求9所述的全光纤化的碳同位素检测方法,其特征在于,所述通过泵浦光源产生泵浦光,并使所述泵浦光进入到空芯光纤气室内,所述空芯光纤气室内填充待检测的气体的步骤中:

通过泵浦光源产生不同波长的泵浦光,并使不同波长的所述泵浦光分别进入到空芯光纤气室内进行扫描,其中所述空芯光纤气室内填充带有不同的碳同位素的气体,带有不同的碳同位素的气体分子具有不同的吸收波长;

所述通过光电探测器接收相位发生变化后的所述探测光,并对所述探测光进行相位检测,获得气体与泵浦光作用后的折射率变化量的步骤中:探测光的相位变化与不同波长的泵浦光的吸收量成正比;

所述基于带碳同位素的气体分子的浓度与折射率的变化量关系,获取碳同位素浓度信息的步骤中:基于带不同碳同位素的气体分子的浓度与折射率的变化量关系,获取不同的碳同位素浓度信息。

一种全光纤化的碳同位素检测系统以及检测方法

技术领域

[0001] 本发明涉及气体浓度检测技术领域,尤其涉及的是一种全光纤化的碳同位素检测系统以及检测方法。

背景技术

[0002] 碳同位素检测在大气科学、能源勘探、医疗检测等领域具有重要作用。在大气科学领域,碳同位素检测是理解全球碳循环、明确碳源汇变化的重要方法;在能源勘探领域,碳同位素检测是推演油气煤藏特征、识别定位矿源的重要手段;在医疗领域,人体呼出气中碳同位素检测已经成为幽门螺旋杆菌感染无创诊断的金标准。

[0003] 自然界中碳同位素含量变化极小,通常以相对于参考基准的偏离来表征同位素丰度比值的相对变化,样品相对参考物质的碳同位素比值变化可以表示为:

$$[0004] \quad \delta_{13}C = \left[\frac{(^{13}C/^{12}C)_{\text{Sample}}}{(^{13}C/^{12}C)_{\text{Reference}}} - 1 \right] \times 1000\text{‰}$$

[0005] 其中 $(^{13}C/^{12}C)_{\text{Sample}}$ 和 $(^{13}C/^{12}C)_{\text{Reference}}$ 分别为待测样本和参考标准物质的碳同位素比值。同位素比值质谱仪(Isotope Ratio Mass Spectroscopy, IRMS)是最为常用的碳同位素检测仪器,其典型检测精度可以达到0.01-0.1‰,但是体积大、操作复杂、价格昂贵、检测速度慢,需要复杂的样气预处理,不适合原位检测应用。另外例如CN113109292公开了一种基于可调谐激光吸收光谱(TDLAS)的碳同位素检测系统及方法,通过优化的算法该系统能够在常压下工作,但长光程空间光学气室导致耗气量大,且难以用于高浓度气体环境下的检测。

[0006] 目前已有的碳同位素检测装置和普遍存在空间光学谐振腔中的光学气室过大而导致耗气量大、成本高、体积大的问题。因此,现有技术还有待于改进和发展。

发明内容

[0007] 鉴于上述现有技术的不足,本发明的目的在于提供一种全光纤化的碳同位素检测系统以及检测方法,解决当下的碳同位素检测装置因光学气室过大而导致耗气量大、成本高、体积大的问题。

[0008] 本发明的技术方案如下:

[0009] 一方面,本申请提出一种全光纤化的碳同位素检测系统,包括:检测光源,检测光源用于发出探测光;

[0010] 延时光纤和输入光纤,延时光纤和输入光纤均连接检测光源,探测光在经过延时光纤和输入光纤后延时不同;

[0011] 光纤环形通路,其包括空芯光纤气室,空芯光纤气室相对立的两端分别连接延时光纤的输出端和输入光纤的输出端,探测光在光纤环形通路中传播并循环经过空芯光纤气室;空芯光纤气室内填充有待检测的气体;

[0012] 泵浦光源,泵浦光源连接光纤环形通路,并用于产生泵浦光并通入到空芯光纤气

室,气体通过泵浦光的作用而改变温度和折射率,探测光经过空芯光纤气室的气体而改变相位;

[0013] 光电探测器,用于接收延时光纤和输入光纤中所传回的相位改变后的探测光;

[0014] 数据处理控制器,数据处理控制器分别电连接光电探测器与泵浦光源。

[0015] 可选地,检测光源包括:放大自发辐射光纤光源、超辐射发光二极管或超连续谱光源;其中,检测光源所发出的探测光的3-dB光谱宽度不小于1nm。

[0016] 可选地,泵浦光源所发出的泵浦光的波长可调谐,泵浦光的波长的可调谐范围不小于0.5nm,以覆盖不同的碳同位素吸收谱线;

[0017] 泵浦光的波长同时进行高频调制和低频扫描,调制频率介于1kHz-100kHz之间,扫描频率介于1mHz-1 Hz之间,泵浦光的光功率不小于1mW。

[0018] 可选地,泵浦光源包括:DFB种子激光器,DFB种子激光器所发出的泵浦光的波长在预定范围内可调谐;

[0019] 掺铥光纤放大器,掺铥光纤放大器连接DFB种子激光器。

[0020] 可选地,光纤环形通路还包括:第一光纤耦合器,第一光纤耦合器具有第一端口、第二端口以及第一公共端口,第一端口与延时光纤连接,第一公共端口与空芯光纤气室的一端连接;

[0021] 第二光纤耦合器,第二光纤耦合器具有第三端口、第四端口以及第二公共端口,第三端口与输入光纤连接,第二公共端口与空芯光纤气室的另一端连接;

[0022] 第二端口与第四端口连接,从而使探测光在第一光纤耦合器、第二光纤耦合器与空芯光纤气室内传播并多次经过空芯光纤气室。

[0023] 可选地,第二公共端口与空芯光纤气室的另一端通过波分复用器连接,波分复用器连接泵浦光源,且用于泵浦光源发出的泵浦光和探测光进行合波。

[0024] 可选地,第一光纤耦合器的第二端口和第一端口的分光比不小于7:3;

[0025] 第二光纤耦合器的第四端口和第三端口的分光比不小于7:3。

[0026] 可选地,延时光纤和输入光纤通过光纤耦合器连接检测光源;

[0027] 光纤耦合器至少包括三个输入端口和二一个输出端口;

[0028] 光纤耦合器的一个输入端口与检测光源连接,另外两个输入端口分别连接光电探测器;

[0029] 光纤耦合器的一个输出端口与延时光纤连接,另一个输出端口与输入光纤连接。

[0030] 可选地,碳同位素检测装置还包括温度控制模组,温度控制模组用于对空芯光纤气室进行制冷和加热。

[0031] 另一方面,本申请还提出一种全光纤化的碳同位素检测方法,用于如上所述的全光纤化的碳同位素检测系统,方法包括以下步骤:

[0032] 通过泵浦光源产生泵浦光,并使泵浦光进入到空芯光纤气室内,空芯光纤气室内填充待检测的气体,其中泵浦光与气体分子发生相互作用而释放热量,改变气体的温度和折射率;

[0033] 通过检测光源发出探测光,使探测光分别通过延时光纤和输入光纤进入到光纤环形通路中,且分别从相对立的两端进入到空芯光纤气室;其中,探测光经过改变温度和折射率的气体后的相位发生变化;

[0034] 通过光电探测器接收相位发生变化后的探测光,并对探测光进行相位检测,获得气体与泵浦光作用后的折射率变化量;

[0035] 基于带碳同位素的气体分子的浓度与折射率的变化量关系,获取碳同位素浓度信息。

[0036] 可选地,通过泵浦光源产生泵浦光,并使泵浦光进入到空芯光纤气室内,空芯光纤气室内填充待检测的气体的步骤中:

[0037] 通过泵浦光源产生不同波长的泵浦光,并使不同波长的泵浦光分别进入到空芯光纤气室内进行扫描,其中空芯光纤气室内填充带有不同的碳同位素的气体,带有不同的碳同位素的气体分子具有不同的吸收波长;

[0038] 通过光电探测器接收相位发生变化后的探测光,并对探测光进行相位检测,获得气体与泵浦光作用后的折射率变化量的步骤中:探测光的相位变化与不同波长的泵浦光的吸收量成正比;

[0039] 基于带碳同位素的气体分子的浓度与折射率的变化量关系,获取碳同位素浓度信息的步骤中:基于带不同碳同位素的气体分子的浓度与折射率的变化量关系,获取不同的碳同位素浓度信息。

[0040] 有益效果:与现有技术相比,本发明提出的一种全光纤化的碳同位素检测系统以及检测方法,其中碳同位素检测系统采用光纤环形通路的方式,使探测光可以循环进入到空芯光纤气室,从而能够实现对探测光的相位信号的有效放大,在满足检测精度的同时可以减小气室体积,而环形通光的方式优化结构,使校准和检测所用的耗气量小,可以适用于呼气检测、深海溶解气检测等样气量少的应用场景中,并且小气室能够在保证温控精度的同时显著降低温控系统功耗;而且采用全光纤结构,可以使本检测装置的结构更紧凑、无需复杂的空间光路对准且使用维护方便;另外,充分利用空芯光纤中光功率密度高的特点,进一步可以缩短有效光程,即便在高的气体浓度下仍能够正常工作,可以检测的气体浓度范围更大。

附图说明

[0041] 图1为本发明一种全光纤化的碳同位素检测系统的结构原理框图;

[0042] 图2为本发明一种全光纤化的碳同位素检测系统的空芯光纤气室的结构原理框图;

[0043] 图3为本发明一种全光纤化的碳同位素检测系统的空芯反谐振光纤的截面示意图;

[0044] 图4为本发明一种全光纤化的碳同位素检测系统所采用泵浦光的波长可调范围内的二氧化碳同位素吸收谱线;

[0045] 图5为本发明一种全光纤化的碳同位素检测系统在实际应用时所测自然同位素丰度5%浓度CO₂的二次谐波信号;

[0046] 图6为本发明一种全光纤化的碳同位素检测系统在实际应用时所测6小时内碳同位素吸收峰值变化图;

[0047] 图7为本发明一种全光纤化的碳同位素检测系统在实际应用时所测6小时内碳同位素比值相对变化图;

[0048] 图8为本发明一种全光纤化的碳同位素检测系统在实际应用时在不同CO₂浓度下碳同位素检测精确度图；

[0049] 图9为本发明一种全光纤化的碳同位素检测方法的流程框图。

[0050] 图中各标号：100、检测光源；210、延时光纤；220、输入光纤；230、光纤环形通路；231、空芯光纤气室；232、空芯光纤本体；233、实芯单模光纤尾纤；234、第一光纤耦合器；235、第二光纤耦合器；236、波分复用器；240、光电探测器；250、光纤耦合器；260、温度控制模组；300、泵浦光源；400、数据处理控制器。

具体实施方式

[0051] 本发明提供了一种全光纤化的碳同位素检测系统，为使本发明的目的、技术方案及效果更加清楚、明确，以下参照附图并举实例对本发明可选地详细说明。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。

[0052] 实施例一

[0053] 如图1所示，本实施例提出一种全光纤化的碳同位素检测系统，可以用于对气体中的不同碳同位素的浓度进行检测。本方案的全光纤化的碳同位素检测系统主要包括：检测光源100、延时光纤210和输入光纤220、光纤环形通路230、泵浦光源300、光电探测器240以及数据处理控制器400。延时光纤210和输入光纤220均用于连接检测光源100，检测光源100所发出的探测光分别通过延时光纤210和输入光纤220进行传输，使探测光分成两路，探测光在经过延时光纤210和输入光纤220后延时不同，即探测光在延时光纤210和输入光纤220中具有不同的传输时间，由于延时光纤210的另一端和输入光纤220的另一端分别连接到光纤环形通路230中，因此两路探测光所到达光纤环形通路230的时间不同，这样的差异性可以在后续检测过程中方便对不同的探测光进行处理，可以得到探测光的相位变化。光纤环形通路230包括有空芯光纤气室231，空芯光纤气室231相对立的两端分别连接延时光纤210的输出端和输入光纤220的输出端，空芯光纤气室231内填充有待检测的带有碳同位素的气体，两路探测光分别在空芯光纤气室231按照相对的方向穿过待检测的气体，从而使两路探测光中的一路按顺时针方向在光纤环形通路230中传播，另一路按逆时针方向在光纤环形通路230中传播，在循环传播过程中多次经过空芯光纤气室231。泵浦光源300连接光纤环形通路230，并用于产生泵浦光并通入到空芯光纤气室231，气体通过泵浦光作用而对探测光进行相位改变；具体地，泵浦光进入空芯光纤气室231内，与空芯光纤气室231内的气体相互作用而释放热量，引起气体温度和折射率的变化，温度和折射率变化后的气体引起同一路径上探测光的相位变化。相位发生变化后的探测光分别经过输入光纤220和延时光纤210分别进入到光电探测器240，光电探测器240用于接收延时光纤210和输入光纤220中所传回的相位改变后的探测光，并将接收到的光信号转换为电信号，便于信号处理。通过对接收的探测光进行相位变化分析，从而可以检测出折射率的变化，而气体分子中碳同位素的浓度越高，对应的折射率变化越大，因此通过折射率的变化，就能检测出气体分子中碳同位素的浓度。数据处理控制器400分别电连接光电探测器240与泵浦光源300，从而可以对泵浦光源300进行控制，使泵浦光源300所发出的泵浦光满足要求，而且数据处理控制器400可以接收到光电探测器240所接收到的探测光信号，并对信号进行分析处理，从而得到某一种碳同位素的浓度信息或者不同碳同位素的浓度信息。

[0054] 本方案中,扫描的泵浦光通过波分复用器236进入空芯光纤气室231,并与气体分子发生相互作用释放热量以及气体折射率的改变,当探测光经过空芯光纤气室231后,使探测光的相位变化。基于气体分子中碳同位素的浓度越高,折射率变化越大的原理,因此通过检测到改变相位后的探测光的相位变化量,就能获得折射率的变化量,从而能够反映碳同位素的浓度信息。而且在空芯光纤气室231中采用顺时针和逆时针两路探测光的方式,可以使光纤环形通路230的两路光的光程完全匹配,因此无需任何反馈控制即可实现工作点的自动锁定,这样提高了检测精度。探测光在光纤环形通路230中多次经过空芯光纤气室231,能够实现对光热相位信号的有效放大,从而获得更准确的气体浓度信息,而实现通过光纤环形通路230可多次经过空芯光纤气室231,在有限的区域内实现了对光路的延长,达到了延长光路的要求的同时大大减小了气室结构。

[0055] 除通过折射率的变化来检测气体分子中单一的碳同位素的浓度外,本实施例对气体分子中不同的碳同位素的浓度可进行检测,其工作原理是:由于不同的碳同位素有不同吸收波长线(如图4所示的二氧化碳同位素吸收谱线),当采用不同波长的泵浦光通过扫描的方式分别进入到空芯光纤气室231,并与气体发生相互作用而释放热量,如果当前泵浦光的波长与一个碳同位素的气体的吸收波长对应,那在该波长输入时间段内的气体的热量变化和折射率变化大,当探测光经过空芯光纤气室231后,探测光的相位变化大。因此,通过扫描式输入不同波长的泵浦光,基于相位变化幅度与泵浦光的波长紧密相关,不同的碳同位素有不同吸收波长线,因此通过相位变化幅度能够反映不同吸收波长的碳同位素浓度,从而能够反映不同吸收波长的碳同位素的浓度信息。采用同一套检测光路可以同时扫描碳同位素的不同吸收线,能够有效抑制光源功率漂移、波长漂移、环境慢速扰动等共模噪声的影响,提高系统稳定性和碳同位素检测精度;得益于较短的光程,该方法可以实现大气体浓度范围内的碳同位素检测。

[0056] 进一步地,检测光源100所产生的探测光的3-dB光谱宽度不小于1nm,例如其光谱宽度30nm,光功率10mW。采用该探测光,利于后续对变化相位后的探测光进行获取,提高检测精度。本实施例中的检测光源100包括但不限于:放大自发辐射光纤光源、超辐射发光二极管、超连续谱光源等。

[0057] 如图1所示,进一步地,本实施例中的光纤环形通路230还包括:第一光纤耦合器234以及第二光纤耦合器235。第一光纤耦合器234具有第一端口、第二端口以及第一公共端口,第一端口与延时光纤210连接,第一公共端口与空芯光纤气室231的一端连接。第二光纤耦合器235具有第三端口、第四端口以及第二公共端口,第三端口与输入光纤220连接,第二公共端口与空芯光纤气室231的另一端连接。第二端口与第四端口连接,从而使探测光在第一光纤耦合器234、第二光纤耦合器235与空芯光纤气室231内传播并多次经过空芯光纤气室231。需要说明的是第二端口、第四端口均是分光比较高的端口并直接连接。从延时光纤210中的一路探测光进入到第一端口,再从第一公共端口进入到空芯光纤气室231,探测光经过气体后变相后,进入到第二光纤耦合器235的第二公共端口,后部分经过输入光纤220射出,部分经过第四端口进入到第二端口,形成循环过程;同理第二路的探测光也经过该方式在光纤环形通路230中进行循环,多次经过空芯光纤气室231。这样所形成的环形光路,不仅实现了结构的小型化,而且保证了探测光在空芯光纤气室231内进行较长距离的变相,提高了检测精度。

[0058] 进一步地,第一光纤耦合器234的第二端口和第一端口的分光比不小于7:3;第二光纤耦合器235的第四端口和第三端口的分光比不小于7:3。两个分光比的值较高的端口直接连接,对探测光进行分光时,使较大的探测光的量仍留在光纤环形通路230中,这样可以使大部分的探测光在环形光路中进行循环,从而可以使探测光可以多次经过空芯光纤气室231,以延长探测光的作用距离。

[0059] 进一步地,第一端口的分光比为2%,第二端口的分光比为98%;第三端口的分光比为2%,第四端口的分光比为98%。采用该比例的第一光纤耦合器234和第二光纤耦合器235,使探测光在光纤环形通路230内具有更多的循环次数,从而能够实现后续对探测光的光热相位信号的有效放大,从而获得更准确的气体浓度信息,检测结果更精确。

[0060] 如图1所示,进一步地,本实施例中的第二公共端口与空芯光纤气室231的另一端通过波分复用器236连接,波分复用器236还用于连接泵浦光源300,且用于泵浦光源300发出的泵浦光和探测光进行合波。波分复用器236连接到光纤环形通路230中,可以使泵浦光进入到空芯光纤气室231,从而与空芯光纤气室231内的待检测气体相互作用而改变温度和折射率。

[0061] 本方案中为实现对不同碳同位素的浓度的检测,使泵浦光源300所发出的泵浦光的波长可调谐范围能够覆盖不同的碳同位素吸收谱线,可调谐范围不小于0.5nm,例如泵浦光的波长可调节范围为:1991-1995nm。在1991-1995nm波段,12CO₂和13CO₂具有强度较大、频率相近地吸收线,能够通过同一台泵浦光源扫描波长获得两种不同地碳同位素浓度信息。另外泵浦光的波长同时进行高频调制和低频扫描,调制频率不小1kHz,可以介于1kHz-100kHz之间;调制频率过低,则系统容易受到环境低频噪声的干扰,导致噪声过大。调制频率过高,那么由于光与气体相互作用引起折射率变化这一过程需要一定时间(典型值us量级),这会导致折射率变化无法跟上调制的速率,从而导致信号降低,也不利于获得最佳的信噪比。因此优选地调制频率介于1kHz-100kHz之间,例如可以采用25kHz。扫描频率不小于1mHz,介于1mHz-1Hz之间,扫描频率主要决定了单次测量的时间。扫描频率低,则单次测量时间长,测量速度慢。另一方面,扫描是通过温度调谐实现的,扫描频率过高,则温度调节跟不上扫描速度,会引起信号失真。因此,优选地扫描频率介于1mHz-1Hz之间。光功率不小于1mW。通过上述参数,可以使检测到的探测光变化相位后的信号更清晰,大大提高了不同碳同位素的浓度的检测精确度。

[0062] 本实施例中的泵浦光源300包括:DFB种子激光器以及掺铒光纤放大器,掺铒光纤放大器连接DFB种子激光器。DFB种子激光器的波长调谐范围为1991-1995nm;掺铒光纤放大器的输出光功率可以是200mW;通过该规格的DFB种子激光器以及掺铒光纤放大器所组成的泵浦光源300的电流调制频率可以达到25kHz,温度扫描频率可以是100mHz。采用该规格的泵浦光源300,可以发出不同波长的泵浦光,不同波长的泵浦光基本可以适用于不同的碳同位素分子的检测。

[0063] 通过波分复用器236将中心波长为1550nm的白光探测光与中心波长为1993nm泵浦光进行合波,其中用于通1550nm波长的端口与第二光纤耦合器235连接,用于通1993nm波长的端口与泵浦光源300连接。

[0064] 进一步地,延时光纤210和输入光纤220通过光纤耦合器250连接检测光源100,光纤耦合器250可以采用光纤3X3耦合器,光纤3X3耦合器具有三个输入端口和三个输出端口;

光纤耦合器250的一个输入端口与检测光源100连接,另外两个输入端口分别连接光电探测器240;光纤耦合器250的一个输出端口与延时光纤210连接,一个输出端口闲置并切斜角以抑制反射,第三个输出端口与输入光纤220连接。通过光纤耦合器250,可以实现探测光的发射以及变相后的探测光的接收,通过一个耦合器即可实现发射和接收,简化了结构,利用装置小型化。其中光纤3x 3耦合器理想的分光比为1:1:1,分光比相对误差不超过20%,这样可以提高检测精度。

[0065] 进一步地,延时光纤210为通信用单模光纤,采用的长度为1km。这样在长度有限的前提下,有效实现延时效果,便于后续对探测光的接收检测。

[0066] 如图2所示,进一步地,空芯光纤气室231包括空芯光纤本体232和实芯单模光纤尾纤233,实芯单模光纤尾纤233分别固定在空芯光纤本体232的两端。实芯单模光纤尾纤233的端面均为8°斜角,实芯单模光纤尾纤233与空芯光纤本体232中间对准后通过机械固定方式或者通过熔接方式连接。空芯光纤本体232的长度不小于1厘米,不长于10米。

[0067] 进一步地,空芯光纤本体232包括但不限于空芯光子带隙光纤、空芯反谐振光纤、空芯波导的其中一种或多种。如图3所示,本实施例中的空芯光纤本体232可以为空芯反谐振光纤,空芯光纤本体232的长度可以采用15cm。

[0068] 进一步地,碳同位素检测装置还包括温度控制模组260,温度控制模组260用于对空芯光纤气室231进行制冷和加热。通过在空芯光纤气室231上装有温度控制模组260,通过温度控制模组260对空芯光纤气室231进行温度控制,从而实现对空芯光纤本体232的管芯温度的精确控制,利于实现激光稳频。

[0069] 温度控制模组260可以采用半导体制冷片进行加热或制冷,通过PID控制通过半导体制冷片的电流大小和电流方向,从而控制半导体制冷片控温,温控精度优于0.01℃。

[0070] 进一步地,光电探测器240为具有两个光学输入端口的平衡光电探测器240,两个光学输入端口分别连接到光纤耦合器250的两个输入端口,平衡光电探测器240的共模噪声抑制比不小于20dB,响应带宽1MHz。

[0071] 进一步地,数据处理控制器400的采样率不小于1MB/s,采样位数不小于12位,信号发生模块能够产生任意波型信号,最大输出频率不小10kHz。本实施例中的数据处理控制器400基于FPGA平台开发,能够提供正弦调制和三角波扫描信号,能够实现光电探测器240输出信号的采集和处理。

[0072] 采用本方案中的全光纤化的碳同位素检测系统的检查结果如下:

[0073] 如图5所示,采用在5%CO₂浓度下,通过不同的波长的泵浦光进行扫描可以测出与图吸收谱线所对应的二次谐波信号,其中12CO₂ R(68)和13CO₂ R(38)信号清晰可见。

[0074] 如图6所示,通过连续测量6个小时并提取两个谱线对应位置的峰值;如图7所示,进一步根据方程计算碳同位素比值相对偏差,60分钟滑动平均下,碳同位素检测精度可达0.19‰。

[0075] 如图8所示,进一步对不同浓度的CO₂进行了检测,在1%-100%浓度范围内,检测精度优于0.3‰,即使在1000ppm的CO₂浓度下,仍能保证约3‰的检测精度。通过增加空芯光纤长度或者泵浦光源300光功率,检测精度可以进一步提高。

[0076] 实施例二

[0077] 如图9所示,本实施例提出一种全光纤化的碳同位素检测方法,用于如实施例一中

所述的全光纤化的碳同位素检测系统,方法包括以下步骤:

[0078] 步骤S100、通过泵浦光源产生泵浦光,并使泵浦光进入到空芯光纤气室内,空芯光纤气室内填充待检测的气体,其中泵浦光与气体分子发生相互作用而释放热量,改变气体的温度和折射率。

[0079] 步骤S200、通过检测光源发出探测光,使探测光分别通过延时光纤和输入光纤进入到光纤环形通路中,且分别从相对立的两端进入到空芯光纤气室;其中,探测光经过改变温度和折射率的气体后的相位发生变化。

[0080] 步骤S300、通过光电探测器接收相位发生变化后的探测光,并对探测光进行相位检测,获得气体与泵浦光作用后的折射率变化量;

[0081] 步骤S400、基于带碳同位素的气体分子的浓度与折射率的变化量关系,获取碳同位素浓度信息。

[0082] 通过上述步骤,可以采用固定波长的泵浦光对检测气体分子中单一的碳同位素的浓度。如果需要对气体分子中不同的碳同位素的浓度可进行检测,则需要输入不同波长的泵浦光,具体方案如下:

[0083] 在步骤S100中,通过泵浦光源产生不同波长的泵浦光,并使不同波长的泵浦光分别进入到空芯光纤气室内进行扫描,其中空芯光纤气室内填充带有不同的碳同位素的气体,带有不同的碳同位素的气体分子具有不同的吸收波长。

[0084] 在执行上述步骤S200后,由于探测光的相位变化与不同波长的泵浦光的吸收量成正比,因此通过光电探测器接收相位发生变化后的探测光,并对探测光进行相位检测,获得气体与泵浦光作用后的折射率变化量。

[0085] 因此,基于带不同碳同位素的气体分子的浓度与折射率的变化量关系,获取不同的碳同位素浓度信息。由于相位变化幅度与泵浦光的波长紧密相关,因此能够反映不同吸收波长的碳同位素浓度。

[0086] 综上所述,本发明提出的一种全光纤化的碳同位素检测系统以及检测方法,其中采用光纤环形通路的方式,使探测光可以循环进入到空芯光纤气室,从而能够实现对探测光的相位信号的有效放大,在满足检测精度的同时可以减小气室体积,而环形通光的方式优化结构,使校准和检测所用的耗气量小,可以适用于呼气检测、深海溶解气检测等样气量少的应用场景中,并且小气室能够在保证温控精度的同时显著降低温控系统功耗;而且采用全光纤结构,可以使本检测装置的结构更紧凑、无需复杂的空间光路对准且使用维护方便;另外,充分利用空芯光纤中光功率密度高的特点,进一步可以缩短有效光程,即便在高的气体浓度下仍能够正常工作,可以检测的气体浓度范围更大。本系统具有结构简单、测量速度快、耗气量小、稳定性高的特点,在幽门螺旋杆菌呼气检测、深海可燃冰探测、油气勘探等领域具有独特优势和良好的应用的前景。

[0087] 应当理解的是,本发明的应用不限于上述的举例,对本领域普通技术人员来说,可以根据上述说明加以改进或变换,所有这些改进和变换都应属于本发明所附权利要求的保护范围。

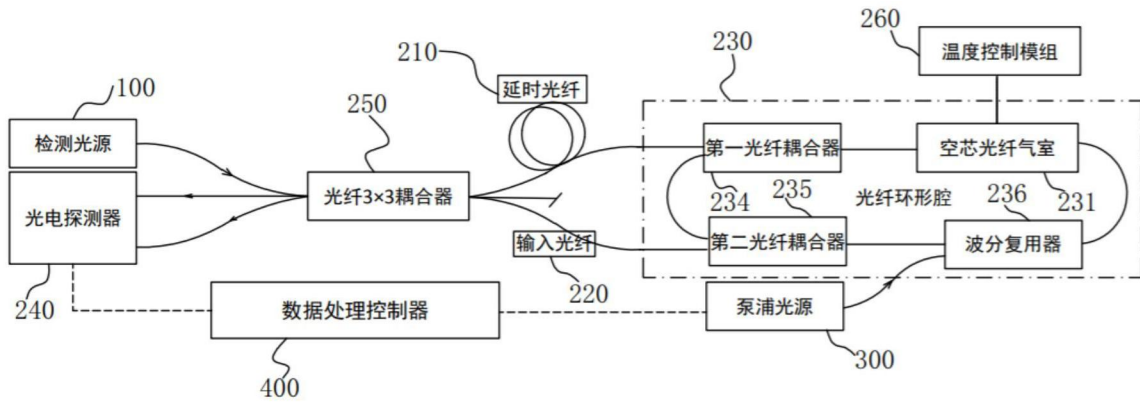


图1

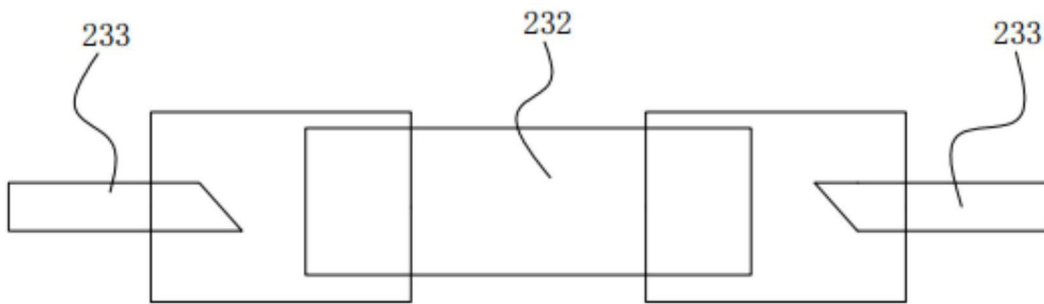


图2

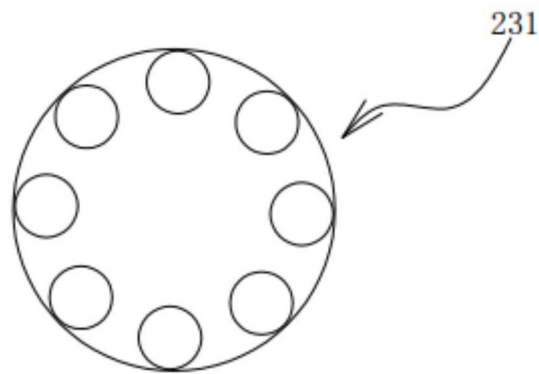


图3

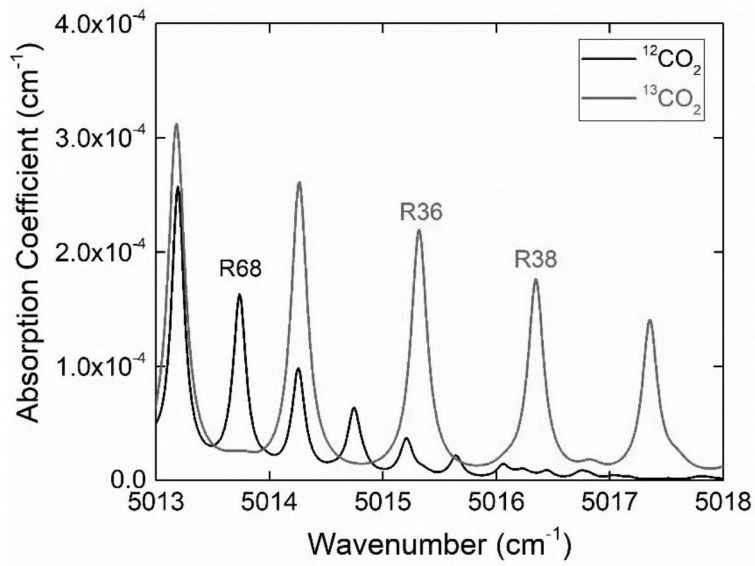


图4

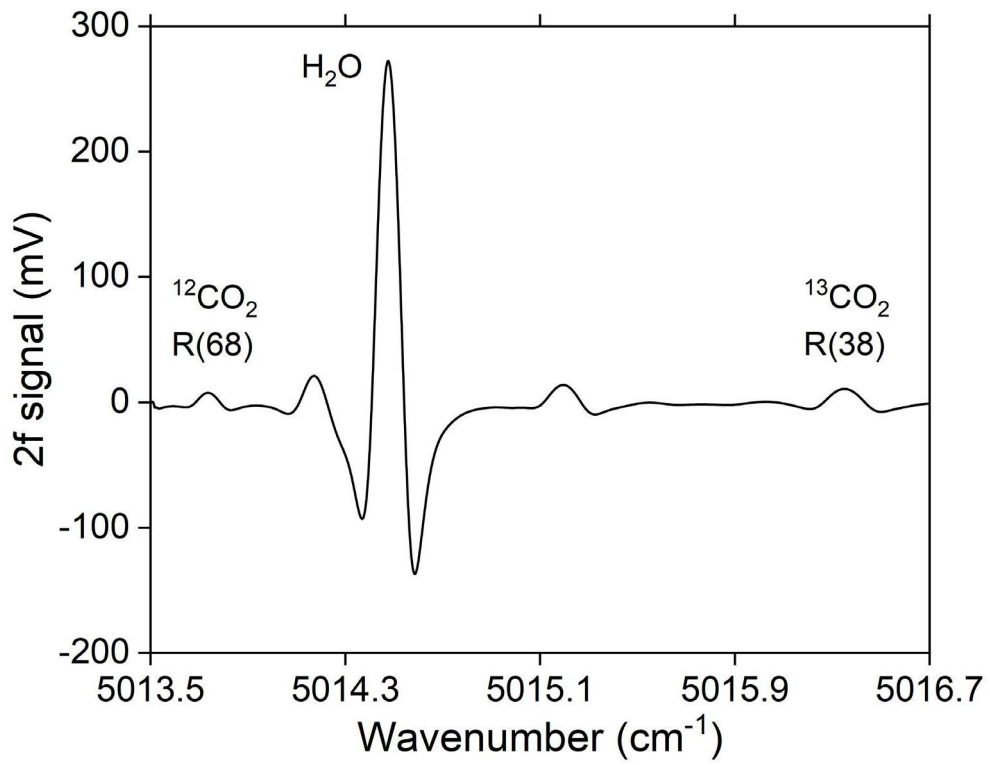


图5

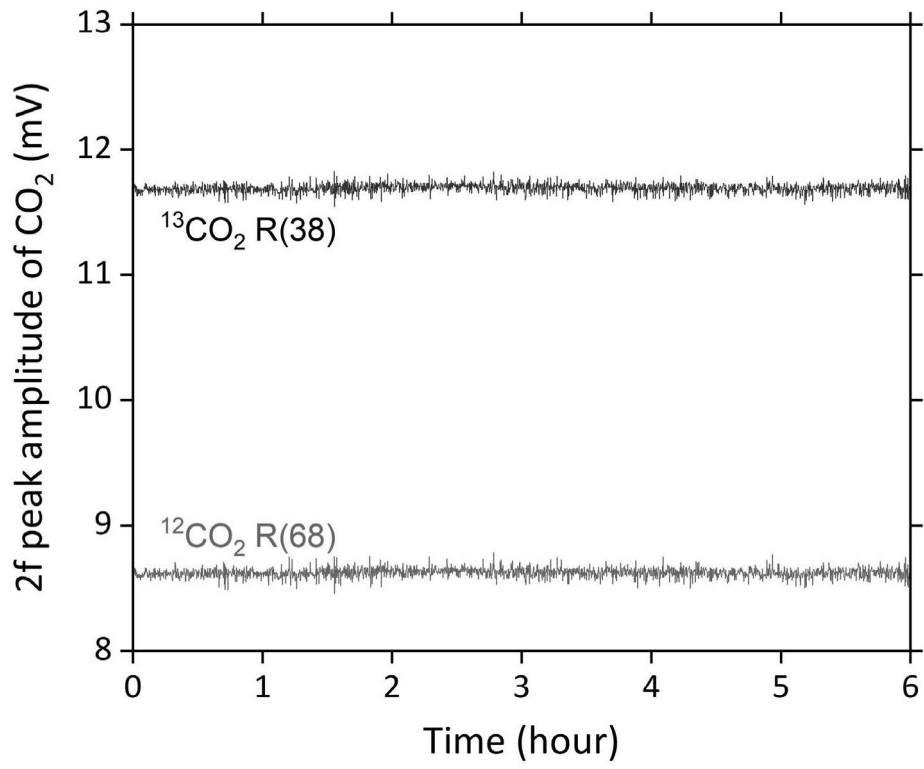


图6

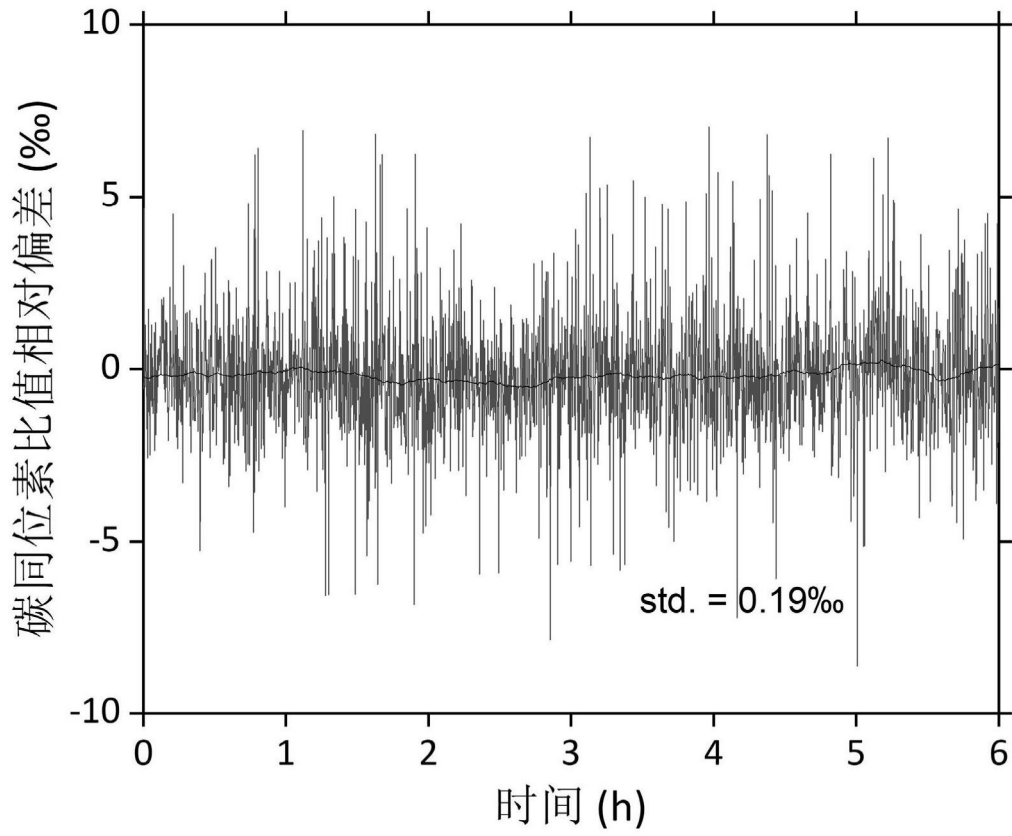


图7

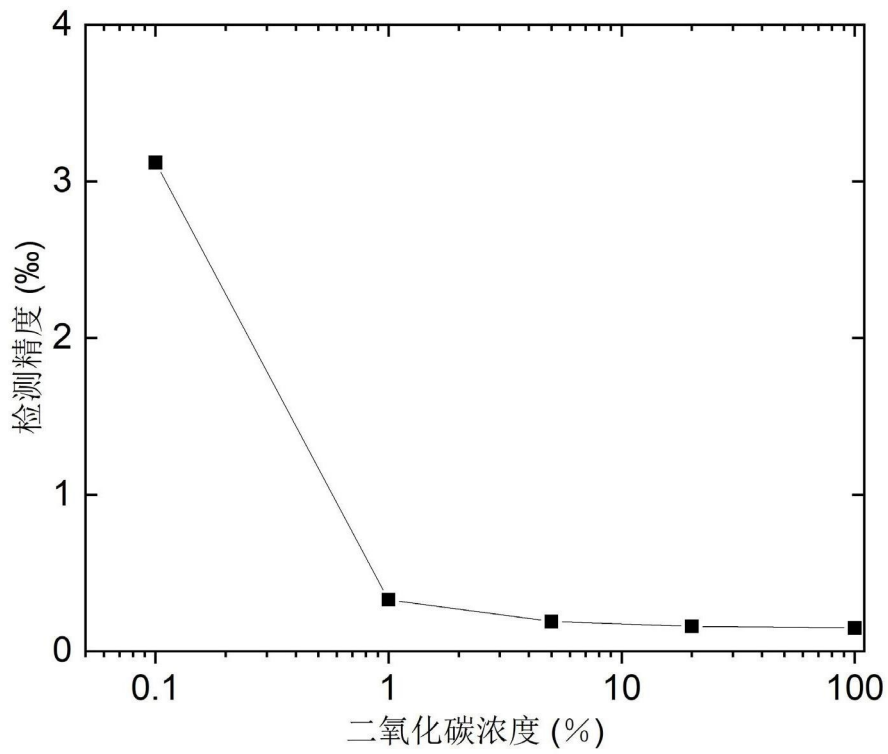


图8

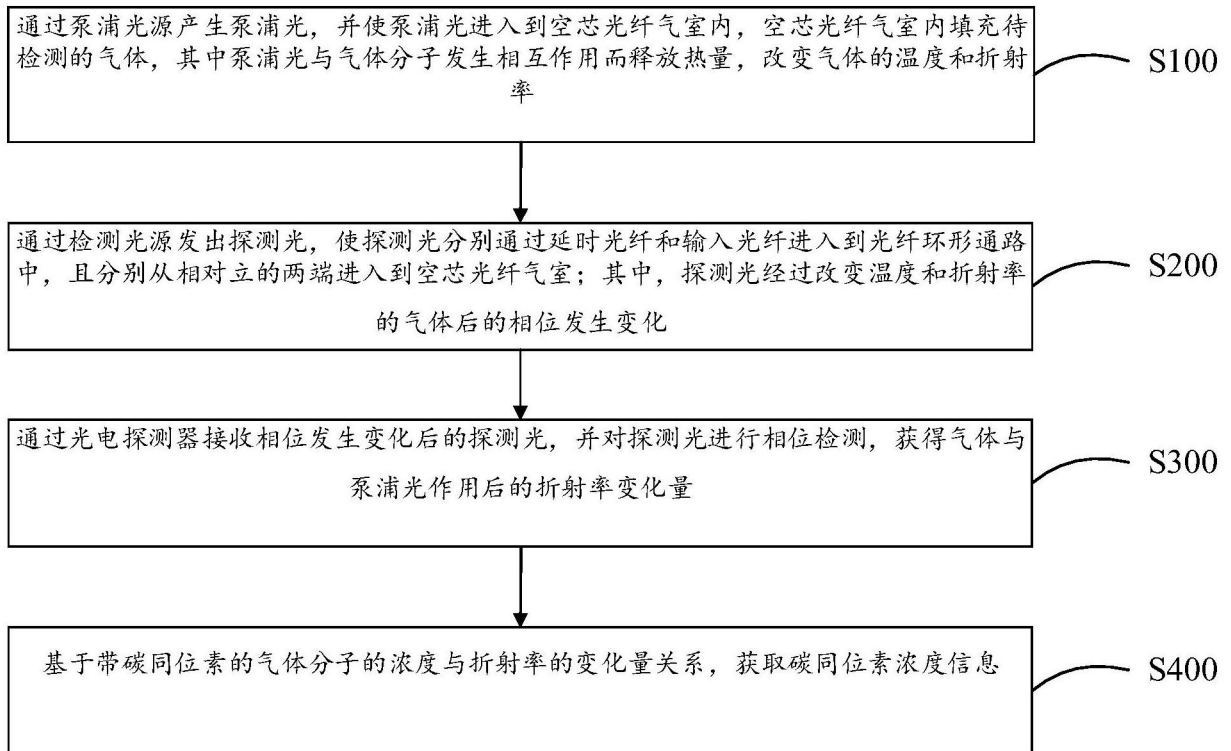


图9