



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112924386 B

(45) 授权公告日 2024.05.07

(21) 申请号 201911243218.9

(22) 申请日 2019.12.06

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 112924386 A

(43) 申请公布日 2021.06.08

(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号香港理工大学产学研
大楼205室

(72) 发明人 靳伟 赵鹏程 何海律

(74) 专利代理机构 深圳中一专利商标事务所
44237

专利代理人 冷仔

(51) Int.Cl.

G01N 21/17(2006.01)

G01N 21/45(2006.01)

G01N 21/01(2006.01)

(56) 对比文件

CN 102262062 A, 2011.11.30

CN 104596996 A, 2015.05.06

CN 107817221 A, 2018.03.20

CN 110274884 A, 2019.09.24

CN 207675632 U, 2018.07.31

US 2017299508 A1, 2017.10.19

US 2019195781 A1, 2019.06.27

Pengcheng Zhao等.Mode-phase-difference photothermal spectroscopy for gas detection with an anti-resonant hollow-core optical fiber.《NATURE COMMUNICATIONS》.2020, 第11卷(第1期), 全文.
 苗银萍;靳伟;杨帆;林粤川;谭艳珍;何海律.光纤光热干涉气体检测技术研究进展.物理学报.2017, (第07期), 全文.

审查员 尤丰光

权利要求书2页 说明书13页 附图10页

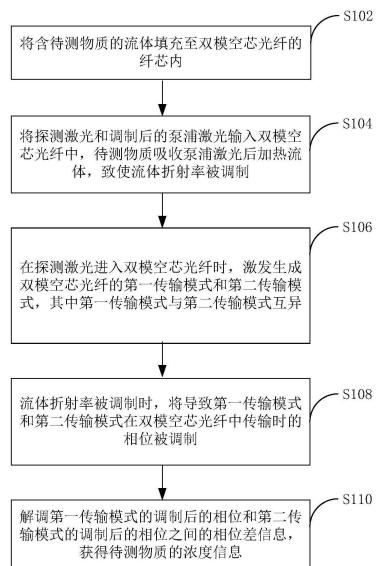
(54) 发明名称

一种流体浓度检测方法及系统

(57) 摘要

本申请适用于流体测量技术领域, 提提供了一种流体浓度检测方法, 包括: 将含待测物质的流体填充至双模空芯光纤的纤芯内; 将探测激光和调制后的泵浦激光输入双模空芯光纤中; 在探测激光进入双模空芯光纤时, 激发生成双模空芯光纤的第一传输模式和第二传输模式; 待测物质与泵浦激光作用产生光热效应时, 将导致第一传输模式和第二传输模式在双模空芯光纤中传输时的相位被调制; 解调第一传输模式和第二传输模式之间的相位调制差, 获得待测物质的浓度信息。本申请可以有效抵消外界环境对测量系统的干扰, 降低了系统噪声, 实现高信噪比, 提高了流体浓度传感器的探测灵敏度和动态范围。

CN 112924386 B



1. 一种流体浓度检测方法,其特征在于,包括:

将含待测物质的流体填充至双模空芯光纤的纤芯内;

将探测激光和调制后的泵浦激光输入所述双模空芯光纤中,所述待测物质吸收所述泵浦激光后加热所述流体,致使所述流体折射率被调制;

在所述探测激光进入所述双模空芯光纤时,激发生所述双模空芯光纤中的第一传输模式和第二传输模式,其中,所述第一传输模式与所述第二传输模式互异;

所述流体折射率被调制时,将导致所述第一传输模式和所述第二传输模式在所述双模空芯光纤中传输时的相位被调制;

解调所述第一传输模式的调制后的相位和所述第二传输模式的调制后的相位之间的相位差信息,获得所述待测物质的浓度信息。

2. 如权利要求1所述的流体浓度检测方法,其特征在于,所述泵浦激光为连续激光或脉冲激光:

若所述泵浦激光为所述连续激光,则所述泵浦激光在输入所述双模空芯光纤之前经过周期性调制,其中,所述周期性调制为强度调制,和/或波长调制;

若所述泵浦激光为所述脉冲激光,则所述泵浦激光的脉冲宽度大于所述流体在所述双模空芯光纤中的横向热传导时间。

3. 如权利要求2所述的流体浓度检测方法,其特征在于,所述解调所述第一传输模式的调制后的相位和所述第二传输模式的调制后的相位之间的相位差信息,获得所述待测物质的浓度信息,包括:

获取所述第一传输模式和所述第二传输模式形成的干涉光;

将所述干涉光转化为电信号;

若所述泵浦激光为所述连续激光,则根据所述电信号,解调出谐波信号,其中,所述谐波信号的峰值或峰峰值信息为包含所述相位差信息的光热信号;

若所述泵浦激光为所述脉冲激光,则所述电信号的峰值信息为包含所述相位差信息的光热信号;

根据所述光热信号,确定所述待测物质的浓度信息。

4. 如权利要求1所述的流体浓度检测方法,其特征在于,所述第一传输模式与所述第二传输模式互异,包括:

所述第一传输模式为 LP_{01} ,所述第二传输模式为 LP_{11} 。

5. 如权利要求1所述的流体浓度检测方法,其特征在于,所述泵浦激光的中心波长对准或扫描通过所述待测物质的吸收线对应的波长。

6. 一种流体浓度检测系统,其特征在于,包括用于生成调制后的泵浦激光的泵浦激光组件,用于生成探测激光的探测激光组件,用于使用探测激光激发出双模空芯光纤的第一传输模式和第二传输模式,并提供所述泵浦激光和含待测物质的流体相互作用产生光热效应的场所的双模空芯光纤气室组件,以及用于将所述第一传输模式和所述第二传输模式形成的干涉光转换为电信号,解调所述第一传输模式和所述第二传输模式之间的相位差,并获得所述待测物质的浓度信息的分析组件:

所述双模空芯光纤气室组件包括用于填充所述含待测物质的流体的双模空芯光纤,用于传输所述泵浦激光和所述探测激光的第一单模光纤和第二单模光纤,用于分离所述泵浦

激光和所述探测激光的第一波分复用器和第二波分复用器，用于存储所述含待测物质的流体的气室装置，用于输入所述含待测物质的流体的输入装置；

其中，所述泵浦激光组件的输出端与所述第一波分复用器的泵浦激光输入端相连，所述第一波分复用器的泵浦激光输出端与所述第一单模光纤的泵浦激光输入端相连，所述第一单模光纤的泵浦激光输出端与所述双模空芯光纤的泵浦激光输入端相对设置，所述双模空芯光纤的探测激光输入端与所述第二单模光纤的探测激光输出端相对设置，所述第二单模光纤的探测激光输入端与所述第二波分复用器的探测激光输出端相连，所述第二波分复用器的探测光输入端与所述探测激光组件的输出端相连，所述第一波分复用器的探测激光输出端与所述分析组件的输入端相连，所述双模空芯光纤的探测激光输入端和所述第二单模光纤的探测激光输出端设置于所述气室装置中，所述输入装置与所述气室装置相连。

7. 如权利要求6所述的流体浓度检测系统，其特征在于，所述泵浦激光组件包括激光驱动器，可调谐泵浦光源，激光放大器，光隔离器，可调谐光学滤波器；

所述探测激光组件包括探测光源；

所述分析组件包括光探测器，锁相放大器，以及分析终端；

其中，所述激光驱动器的输出端与所述可调谐泵浦光源的输入端相连，所述可调谐泵浦光源的输出端与所述激光放大器的输入端相连，所述激光放大器的输出端与所述光隔离器的输入端相连，所述光隔离器的输出端与所述可调谐光学滤波器的输入端相连，所述可调谐光学滤波器的输出端与所述第一波分复用器的泵浦激光输入端相连；

所述第一波分复用器的探测激光输出端与所述光探测器的输入端相连，所述光探测器的输出端与所述锁相放大器的输入端相连，所述锁相放大器的谐波信号输出端与所述分析终端的输入端相连，所述锁相放大器的调制信号输出端与所述激光驱动器的输入端相连。

8. 如权利要求6所述的流体浓度检测系统，其特征在于，所述双模空芯光纤包括反谐振光纤、光子带隙光子晶体光纤、以及Kagome光纤中的任意一种。

9. 如权利要求6所述的流体浓度检测系统，其特征在于，所述双模空芯光纤的探测激光输入端与所述第二单模光纤的探测激光输出端相对设置，包括：

所述双模空芯光纤的探测激光输入端与所述第二单模光纤的探测激光输出端不完全对准，使得所述探测激光激发生成所述双模空芯光纤的所述第一传输模式和所述第二传输模式，所述第一传输模式和所述第二传输模式同时在所述双模空芯光纤中传播，并在输出端发生干涉。

10. 如权利要求6所述的流体浓度检测系统，其特征在于，所述双模空芯光纤的探测激光输入端与所述第二单模光纤的探测激光输出端相对设置，包括：

所述双模空芯光纤的探测激光输入端与所述第二单模光纤的探测激光输出端完全对准，使得所述探测激光只激发所述双模空芯光纤的所述第一传输模式，其中，在所述双模空芯光纤的探测激光输入端写入长周期光栅，所述长周期光栅使得所述第一传输模式的部分能量耦合到所述第二传输模式，使得所述探测激光生成的所述第一传输模式和所述第二传输模式同时在所述双模空芯光纤中传播，并在输出端发生干涉。

一种流体浓度检测方法及系统

技术领域

[0001] 本申请属于流体测量技术领域,尤其涉及一种流体浓度检测方法及系统。

背景技术

[0002] 流体浓度传感器作为健康、安全和工业系统的一部分,在环境和空气污染、医药、石油化工和燃烧过程监测等领域有重要应用。

[0003] 传统的流体浓度传感器是基于非光学技术的检测,包括半导体传感器、电化学传感器等。传统的流体浓度传感器容易受环境流体的影响,造成选择性弱、稳定性差的问题。

[0004] 新式的流体浓度传感器是基于光学技术的光谱检测,其主要分为激光吸收光谱法、激光光热光谱法、激光光声光谱法等。基于激光吸收光谱法的流体浓度传感器的灵敏度取决于吸收路径长度和吸收谱线强度,因此通常采用高Q值光学腔或光学多通池以增加吸收路径长度,或选择吸收强度大的中红外谱线,但这也大大增加了系统的复杂性。

[0005] 相对于激光吸收光谱法,激光光热光谱法和激光光声光谱法并不直接测量透射光谱的变化,而是间接测量流体吸收激光后产生的部分物理性质的变化,并根据部分物理性质的变化检测出被测流体的状态信息。目前基于激光光热光谱法的流体浓度传感器容易受到外界环境扰动的影响,例如温度和压力的影响。但是为了屏蔽外界环境扰动的影响,又需要增加伺服反馈控制部分,导致了其流体浓度传感器的系统复杂,并且探测灵敏度不高,动态范围受限的问题。

发明内容

[0006] 本申请实施例提供了一种流体浓度检测方法及系统,可以解决现有技术中基于激光光热光谱的流体浓度传感器容易受到外界环境扰动的影响,使得流体浓度传感器的系统复杂,并且探测灵敏度不高,动态范围受限的问题。

[0007] 第一方面,本申请实施例提供了一种流体浓度检测方法,包括:

[0008] 将含待测物质的流体填充至双模空芯光纤的纤芯内;

[0009] 将探测激光和调制后的泵浦激光输入双模空芯光纤中,待测物质吸收泵浦激光后加热流体,致使流体折射率被调制;

[0010] 在探测激光进入双模空芯光纤时,激发生长双模空芯光纤中的第一传输模式和第二传输模式,其中,第一传输模式与第二传输模式互异;

[0011] 流体折射率被调制时,将导致第一传输模式和第二传输模式在双模空芯光纤中传输时的相位被调制;

[0012] 解调第一传输模式的调制后的相位和第二传输模式的调制后的相位之间的相位差信息,获得待测物质的浓度信息。

[0013] 可选的,泵浦激光为连续激光或脉冲激光;

[0014] 若泵浦激光为连续激光,则泵浦激光在输入双模空芯光纤之前经过周期性调制,其中,周期性调制为强度调制,和/或波长调制;

[0015] 若泵浦激光为脉冲激光，则泵浦激光的脉冲宽度大于流体在双模空芯光纤中的横向热传导时间。

[0016] 可选的，解调第一传输模式的调制后的相位和第二传输模式的调制后的相位之间的相位差信息，获得待测物质的浓度信息，包括：

[0017] 获取第一传输模式和第二传输模式形成的干涉光；

[0018] 将干涉光转化为电信号；

[0019] 若泵浦激光为连续激光，则根据电信号，解调出谐波信号，其中，谐波信号的峰值或峰峰值信息为包含相位差信息的光热信号；

[0020] 若泵浦激光为脉冲激光，则电信号的峰值信息为包含相位差信息的光热信号；

[0021] 根据光热信号，确定待测物质的浓度信息。

[0022] 可选的，第一传输模式与第二传输模式互异，包括：

[0023] 第一传输模式为LP₀₁，第二传输模式为LP₁₁。

[0024] 可选的，泵浦激光的中心波长对准或扫描通过待测物质的吸收线对应的波长。

[0025] 第二方面，本申请实施例提供了一种流体浓度检测系统，包括用于生成调制后的泵浦激光的泵浦激光组件，用于生成探测激光的探测激光组件，用于使用探测激光激发出双模空芯光纤的第一传输模式和第二传输模式，并提供泵浦激光和含待测物质的流体相互作用产生光热效应的场所的双模空芯光纤气室组件，以及用于将第一传输模式和第二传输模式形成的干涉光转换为电信号，解调第一传输模式和第二传输模式之间的相位差，并获得待测物质的浓度信息的分析组件：

[0026] 双模空芯光纤气室组件包括用于填充含待测物质的流体的双模空芯光纤，用于传输泵浦激光和探测激光的第一单模光纤和第二单模光纤，用于分离泵浦激光和探测激光的第一波分复用器和第二波分复用器，用于存储含待测物质的流体的气室装置，用于输入含待测物质的流体的输入装置；

[0027] 其中，泵浦激光组件的输出端与第一波分复用器的泵浦激光输入端相连，第一波分复用器的泵浦激光输出端与第一单模光纤的泵浦激光输入端相连，第一单模光纤的泵浦激光输出端与双模空芯光纤的泵浦激光输入端相对设置，双模空芯光纤的探测激光输入端与第二单模光纤的探测激光输出端相对设置，第二单模光纤的探测激光输入端与第二波分复用器的探测激光输出端相连，第二波分复用器的探测光输入端与探测激光组件的输出端相连，第一波分复用器的探测激光输出端与分析组件的输入端相连，双模空芯光纤的探测激光输入端和第二单模光纤的探测激光输出端设置于气室装置中，输入装置与气室装置相连。

[0028] 可选的，泵浦激光组件包括激光驱动器，可调谐泵浦光源，激光放大器，光隔离器，可调谐光学滤波器；

[0029] 探测激光组件包括探测光源；

[0030] 分析组件包括光探测器，锁相放大器，以及分析终端；

[0031] 其中，激光驱动器的输出端与可调谐泵浦光源的输入端相连，可调谐泵浦光源的输出端与激光放大器的输入端相连，激光放大器的输出端与光隔离器的输入端相连，光隔离器的输出端与可调谐光学滤波器的输入端相连，可调谐光学滤波器的输出端与第一波分复用器的泵浦激光输入端相连；

[0032] 第一波分复用器的探测激光输出端与光探测器的输入端相连,光探测器的输出端与锁相放大器的输入端相连,锁相放大器的谐波信号输出端与分析终端的输入端相连,锁相放大器的调制信号输出端与激光驱动器的输入端相连。

[0033] 可选的,双模空芯光纤包括反谐振光纤、光子带隙光子晶体光纤、以及Kagome光纤中的任意一种。

[0034] 可选的,双模空芯光纤的探测激光输入端与第二单模光纤的探测激光输出端相对设置,包括:

[0035] 双模空芯光纤的探测激光输入端与第二单模光纤的探测激光输出端不完全对准,使得探测激光激发生双模空芯光纤的第一传输模式和第二传输模式。第一传输模式和第二传输模式同时在双模空芯光纤中传播,并在输出端发生干涉。

[0036] 可选的,双模空芯光纤的探测激光输入端与第二单模光纤的探测激光输出端相对设置,包括:

[0037] 双模空芯光纤的探测激光输入端与第二单模光纤的探测激光输出端完全对准,使得探测激光只激发双模空芯光纤的第一传输模式。其中,在双模空芯光纤的探测激光输入端写入长周期光栅,长周期光栅使得第一传输模式的部分能量耦合到第二传输模式,使得探测激光生成的第一传输模式和第二传输模式同时在双模空芯光纤中传播,并在输出端发生干涉。

[0038] 本申请实施例与现有技术相比存在的有益效果是:将含待测物质的流体填充至双模空芯光纤的纤芯内;将探测激光和调制后的泵浦激光输入双模空芯光纤中,待测物质吸收泵浦激光后加热流体,致使流体折射率被调制;在探测激光进入双模空芯光纤时,激发生双模空芯光纤中的第一传输模式和第二传输模式,其中,第一传输模式与第二传输模式互异;流体折射率被调制时,将导致第一传输模式和第二传输模式在双模空芯光纤中传输时的相位被调制;解调第一传输模式的调制后的相位和第二传输模式的调制后的相位之间的相位差信息,获得待测物质的浓度信息。通过本申请实施例,由于外界环境对探测激光的第一传输模式和第二传输模式的相位具有相似影响效果,因此可以有效抵消外界环境对测量系统的干扰,降低了系统噪声,实现高信噪比,提高流体浓度传感器的探测灵敏度和动态范围。

附图说明

[0039] 为了更清楚地说明本申请实施例中的技术方案,下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本申请的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动性的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0040] 图1是本申请提供的一种流体浓度检测方法的示意性流程图;

[0041] 图2是本申请提供的一种双模反谐振空芯光纤的截面图;

[0042] 图3是本申请提供的一种双模反谐振空芯光纤的传输光谱图;

[0043] 图4是本申请提供的一种双模反谐振空芯光纤的示意性气室结构图;

[0044] 图5是本申请提供的一种探测激光为 LP_{01} 模式的近场光学图;

[0045] 图6是本申请提供的一种探测激光为 LP_{11} 模式的近场光学图;

- [0046] 图7是本申请提供的一种流体浓度检测方法的示意性系统图；
[0047] 图8是本申请提供的一种双模反谐振空芯光纤气室的双模干涉损耗谱图；
[0048] 图9是本申请提供的一种双模反谐振空芯光纤气室的双模干涉损耗谱的傅里叶变换结果图；
[0049] 图10是本申请提供的一种流体浓度检测方法测量的体积浓度为1ppm(百万分之一)的乙炔气体的谐波信号曲线图；
[0050] 图11是本申请提供的一种基于2小时噪声数据得到的乙炔气体检测的阿伦方差曲线图；
[0051] 图12是本申请提供的一种在3小时内测量的体积浓度为1ppm的乙炔气体的谐波信号变化曲线图；
[0052] 图13是本申请提供的一种带有微通道的双模反谐振空芯光纤的气室结构图；
[0053] 图14是本申请提供的一种带有微通道的双模反谐振空芯光纤气室的双模干涉损耗谱图；
[0054] 图15是本申请提供的一种带有微通道的双模反谐振空芯光纤的微通道处的截面图；
[0055] 图16是本申请提供的一种归一化光热信号随充气时间的变化曲线图；
[0056] 图17是本申请提供的一种在常温常压下乙炔气体传感器动态范围测量结果的曲线图；
[0057] 图18是本申请提供的一种流体浓度检测系统的结构框图。

具体实施方式

- [0058] 以下描述中,为了说明而不是为了限定,提出了诸如特定系统结构、技术之类的具体细节,以便透彻理解本申请实施例。然而,本领域的技术人员应当清楚,在没有这些具体细节的其它实施例中也可以实现本申请。在其它情况下,省略对众所周知的系统、装置、电路以及方法的详细说明,以免不必要的细节妨碍本申请的描述。
[0059] 应当理解,当在本申请说明书和所附权利要求书中使用时,术语“包括”指示所描述特征、整体、步骤、操作、元素和/或组件的存在,但并不排除一个或多个其它特征、整体、步骤、操作、元素、组件和/或其集合的存在或添加。
[0060] 还应当理解,在本申请说明书和所附权利要求书中使用的术语“和/或”是指相关联列出的项中的一个或多个的任何组合以及所有可能组合,并且包括这些组合。
[0061] 如在本申请说明书和所附权利要求书中所使用的那样,术语“如果”可以依据上下文被解释为“当...时”或“一旦”或“响应于确定”或“响应于检测到”。类似地,短语“如果确定”或“如果检测到[所描述条件或事件]”可以依据上下文被解释为意指“一旦确定”或“响应于确定”或“一旦检测到[所描述条件或事件]”或“响应于检测到[所描述条件或事件]”。
[0062] 另外,在本申请说明书和所附权利要求书的描述中,术语“第一”、“第二”、“第三”等仅用于区分描述,而不能理解为指示或暗示相对重要性。
[0063] 在本申请说明书中描述的参考“一个实施例”或“一些实施例”等意味着在本申请的一个或多个实施例中包括结合该实施例描述的特定特征、结构或特点。由此,在本说明书中的不同之处出现的语句“在一个实施例中”、“在一些实施例中”、“在其他一些实施例中”、

“在另外一些实施例中”等不是必然都参考相同的实施例，而是意味着“一个或多个但不是所有的实施例”，除非是以其他方式另外特别强调。术语“包括”、“包含”、“具有”及它们的变形都意味着“包括但不限于”，除非是以其他方式另外特别强调。

[0064] 下面结合具体实施例，对本申请提供的一种流体浓度检测方法进行示例性的说明。

[0065] 请参阅图1，图1是本申请提供的一种流体浓度检测方法的示意性流程图。

[0066] 本实施例中流体浓度检测方法的执行主体为流体浓度传感器。

[0067] S102、将含待测物质的流体填充至双模空芯光纤的纤芯内。

[0068] 所谓光热效应，是由于物质吸收一束强度随时间变化的光束或其他能量束而被加热时所引起的一系列变化，如物质的折射率变化、物质的表面形变等。本申请就是基于含待测物质的流体在发生光热效应时，流体的折射率会发生变化，从而导致流体中传输激光的相位也发生变化，进而通过获取激光的相位变化而计算得到待测物质的浓度信息。

[0069] 在本发明实施例中，待测物质可以为气体或液体。例如，体积浓度为100ppm的乙炔气体，其中，待测物质为体积占比为 100×10^{-6} 的乙炔气体，剩余体积占比为 $(1 - 100 \times 10^{-6})$ 的气体为平衡气体，通常为氮气或氩气等气体。

[0070] 作为示例而非限定，在本申请实施例中，待测物质是乙炔气体。

[0071] 在一种可能的实现方式中，流体浓度传感器可以将双模空芯光纤作为含待测物质的流体的容器。空芯光纤相比于传统的自由空间气室或者空腔，可以减小传感器的体积和流体的消耗量，同时空芯光纤可以实现极小的激光损耗，并且支持长距离的光传输，可以提高光热效应的激发效率。

[0072] 进一步的，双模空芯光纤可以包括反谐振光纤、光子带隙光子晶体光纤、以及Kagome光纤等中的任意一种。

[0073] 在本申请实施例中，选用的是双模反谐振空芯光纤。请参阅图2，图2是本申请提供的一种双模反谐振空芯光纤的截面图。图2中包括，双模反谐振空芯光纤的环形包层外径711，其直径约为190微米；双模反谐振空芯光纤的环形包层内径712，其直径约为55微米；毛细管713，其厚度约为370纳米的，其外径约为14微米；双模反谐振空芯光纤的纤芯714，其内切圆直径约为28微米。其中，双模反谐振空芯光纤的组成材料为二氧化硅，并且7个毛细管713环绕纤芯排列。请参阅图3，图3是本申请提供的一种双模反谐振空芯光纤的传输光谱图。从图3中可以看出，该双模反谐振空芯光纤具有850纳米至1700纳米的宽的光谱传输范围。

[0074] 具体的，在将含待测物质的流体填充至双模空芯光纤的纤芯内时，流体浓度传感器可以让流体通过自由扩散的方式，从双模空芯光纤的一端或两端填充至双模空芯光纤中。或者通过在双模空芯光纤的一端施加压力，使含待测物质的流体快速地填充至双模空芯光纤中。还可以使用飞秒激光对双模空芯光纤进行微加工处理，形成从双模空芯光纤外表面对贯穿至双模空芯光纤纤芯的多个微通道，其中，多个微通道之间间隔预设距离。通过多个微通道将含待测物质的流体均匀的填充至双模空芯光纤的纤芯内。

[0075] 例如，请参阅图4，图4是本申请提供的一种双模反谐振空芯光纤的示意性气室结构图。图4包括，一段4.67米长的双模反谐振空芯光纤710，双模反谐振空芯光纤710的探测激光输入端716，双模反谐振空芯光纤710的泵浦激光输入端717，第一单模光纤720，第一单

模光纤720的泵浦激光输出端721，第二单模光纤730，第二单模光纤730的探测激光输出端731，T型玻璃管740，装有乙炔气体的气瓶751，进气气阀752，压力计753，出气气阀754，陶瓷插芯761，陶瓷套管762，三维精密移动平台770。双模反谐振空芯光纤710的泵浦激光输入端717可以设置在三维精密移动平台770上，第一单模光纤720的泵浦激光输出端721也可以设置在三维精密移动平台770上，双模反谐振空芯光纤710的探测激光输入端716可以设置在T型玻璃管740中，并通过陶瓷插芯761和陶瓷套管762与第二单模光纤730的探测激光输出端731机械连接，气瓶751可以通过进气气阀752、压力计753与T型玻璃管740的下口连接，出气气阀754可以设置在T型玻璃管740的左出口，T型玻璃管740的三个出口可以通过AB胶进行密封。在进行乙炔气体填充时，可以打开气瓶751，通过进气气阀752调节压力，通过压力计753检查当前压力，乙炔可以通过T型玻璃管740的下口进入T型玻璃管740内部，开放出气气阀754，排空T型玻璃管740内部空气后关闭出气气阀754。此时由于T型玻璃管740中的压力大于外界压力，乙炔可以快速的从双模反谐振空芯光纤710的探测激光输入端716填充进去。

[0076] S104、将探测激光和调制后的泵浦激光输入双模空芯光纤中，待测物质吸收泵浦激光后加热流体，致使流体折射率被调制。

[0077] 在一种可能的实现方式中，探测激光可以为连续激光，泵浦激光可以为连续激光，也可以脉冲激光。本申请需要流体产生周期性的光热效应，使探测激光的相位产生周期性的变化。因此，若泵浦激光为连续激光，则泵浦激光在输入双模空芯光纤之前，需要经过周期性调制，使得泵浦激光产生周期性的变化，其中，周期性调制为强度调制，和/或波长调制。若泵浦激光为脉冲激光，则由于脉冲激光光源本身会周期性的产生脉冲激光，因此，不需要进行周期性调制。

[0078] 另外，若泵浦激光为脉冲激光，则泵浦激光的脉冲宽度应该大于流体在双模空芯光纤中的横向热传导时间。这样可以保证待测物质因光热效应产生的热量完全传导至双模空芯光纤并达到稳态，从而获得最大的光热信号。

[0079] 需要说明的是，探测激光和泵浦激光可以从双模空芯光纤同一侧进入，也可以从双模空芯光纤的不同侧进入。也即是，本申请对探测激光和泵浦激光在双模空芯光纤中的传输方向不做限定，可以同向传输也可以反向传输。

[0080] 可选的，泵浦激光的中心波长可以调谐至待测物质的吸收线上，使得待测物质可以充分吸收泵浦激光。探测激光的中心波长可以调谐至远离待测物质的吸收线，使得待测物质无法吸收探测激光。

[0081] 例如，请参阅图4，探测激光可以从第二单模光纤730的探测激光输出端731进入双模反谐振空芯光纤710，泵浦激光可以从第一单模光纤720的泵浦激光输出端721进入双模反谐振空芯光纤710。

[0082] S106、在探测激光进入双模空芯光纤时，激发生双模空芯光纤中的第一传输模式和第二传输模式，其中，第一传输模式与第二传输模式互异。

[0083] 在一种可能的实现方式中，流体浓度传感器可以在探测激光进入双模空芯光纤时，生成第一传输模式和第二传输模式，其中，第一传输模式与第二传输模式互异。

[0084] 可选的，请参阅图4，流体浓度传感器可以通过调整第二单模光纤730的探测激光输出端731与双模反谐振空芯光纤710的探测激光输入端716的相对位置，使得双模反谐振

空芯光纤710的探测激光输入端716与第二单模光纤的探测激光输出端731不完全对准,形成侧向位移,在探测激光进入双模反谐振空芯光纤710时,激发生第一传输模式和第二传输模式。

[0085] 可选的,请参阅图4,流体浓度传感器还可以通过调整第二单模光纤730的探测激光输出端731与双模反谐振空芯光纤710的探测激光输入端716的相对位置,使得双模反谐振空芯光纤710的探测激光输入端716与第二单模光纤730的探测激光输出端731完全对准,这时,双模反谐振空芯光纤710中只生成第一传输模式。通过在双模反谐振空芯光纤710的探测激光输入端716写入长周期光栅,长周期光栅可以使得第一传输模式的部分能量耦合到第二传输模式。

[0086] 具体的,第一传输模式与第二传输模式应为互异的传输模式,也即是,只要第一传输模式与第二传输模式不是同样的传输模式即可。例如,当第一传输模式为 LP_{01} 时,第二传输模式可以是 LP_{mn} (m,n为自然数,其中m≠0,n≠0或1)中的任意一个。

[0087] 作为示例而非限定,本申请实施例中,探测激光采用的是第一传输模式为 LP_{01} 模式,第二传输模式为 LP_{11} 模式。请参阅图5,图5是本申请提供的一种探测激光为 LP_{01} 模式的近场光学图。请参阅图6,图6是本申请提供的一种探测激光为 LP_{11} 模式的近场光学图。

[0088] S108、流体折射率被调制时,将导致第一传输模式和第二传输模式在双模空芯光纤中传输时的相位被调制。

[0089] 在一种可能的实现方式中,当泵浦激光进入双模空芯光纤后,待测物质将吸收泵浦激光,进而产生光热效应,导致含待测物质的流体的折射率跟随泵浦激光的周期性变化而变化,最终使得第一传输模式和第二传输模式的相位也随泵浦激光的周期性变化而变化,经过周期性变化的相位可以称为调制相位。

[0090] 例如,请参阅图7,图7是本申请提供的一种流体浓度检测方法的示意性系统图。图7包括,激光驱动器510,可调谐泵浦光源520,激光放大器530,光隔离器540,可调谐光学滤波器550,第一波分复用器780,第二波分复用器790,双模反谐振空芯光纤气室700,探测光源610,光探测器810,锁相放大器820,分析终端830。

[0091] 具体的,首先,在双模反谐振空芯光纤气室700中进气端充入1.95巴体积浓度为1ppm的乙炔气体。可调谐泵浦光源520可以选用1.53微米的分布式反馈激光器。锁相放大器820可以向激光驱动器510输入一个9.5千赫兹的正弦调制信号,同时激光驱动器510以0.01赫兹的锯齿波扫描频率共同驱动可调谐泵浦光源520,输出调制后的泵浦激光,调制后的泵浦激光可以经过激光放大器530、光隔离器540、可调谐光学滤波器550,和第一波分复用器780进入双模反谐振空芯光纤气室700,使得泵浦激光与乙炔气体相互作用产生光热效应,进而使得双模反谐振空芯光纤内的气体折射率被周期性的调制。其中,激光放大器530用于提高泵浦激光的能量,光隔离器540用于避免反向传输的激光进入可调谐泵浦光源520,可调谐光学滤波器550用于滤除激光放大器530的自发辐射噪声。然后,探测光源610可以输出探测激光,经过第二波分复用器790进入双模反谐振空芯光纤气室700。探测激光在进入双模反谐振空芯光纤气室700时,激发生双模空芯光纤中的第一传输模式和第二传输模式,由于双模反谐振空芯光纤内的气体折射率被周期性的调制,导致第一传输模式和第二传输模式在传输过程中的相位也被周期性调制。

[0092] S110、解调第一传输模式的调制后的相位和第二传输模式的调制后的相位之间的

相位差信息,获得待测物质的浓度信息。

[0093] 在步骤S108中,第一传输模式和第二传输模式在传输过程中的相位已经被周期性的调制,因此,只要解调第一传输模式的调制后的相位和第二传输模式的调制后的相位之间的相位差,就可以得出待测物质的浓度信息。

[0094] 在一种可能的实现方式中,步骤S110可以分成:

[0095] S111获取第一传输模式和第二传输模式形成的干涉光。

[0096] 具体的,根据光的干涉原理可知,两束光发生干涉后,干涉条纹的光强分布与两束光的光程差/相位差有关。因此,流体浓度传感器可以利用光的干涉原理形成一个干涉仪,获取第一传输模式和第二传输模式形成的干涉光,进而获取第一传输模式和第二传输模式的调制相位之间的相位差。

[0097] 例如,请参阅图4,当探测激光从第二单模光纤730的探测激光输出端731射出时,双模反谐振空芯光纤710的探测激光输入端716与第二单模光纤730的探测激光输出端731可以通过引入适当的侧向位移,使得探测激光在双模反谐振空芯光纤710中激发出第一传输模式和第二传输模式,形成一个模式干涉仪。再通过三维精密移动平台770调整双模反谐振空芯光纤710的泵浦激光输入端717和第一单模光纤720的泵浦激光输出端721之间的相对位置使得干涉条纹的对比度达到最大、传输损耗达到最小。接着,可以通过第一波分复用器780获取干涉光,并将干涉光传输至光探测器810。最后,将探测激光的波长调谐至对应干涉光的干涉条纹的最高斜率点,以获得最大相位探测灵敏度。请参阅图8,图8是本申请提供的一种双模反谐振空芯光纤气室的双模干涉损耗谱图。图8中虚线与曲线相交的点为干涉光的干涉条纹的最高斜率点,且经双模反谐振空芯光纤气室700后产生干涉光的干涉条纹峰值之间的平均距离为435皮米。请参阅图9,图9是本申请提供的一种双模反谐振空芯光纤气室的双模干涉损耗谱的傅里叶变换结果图。由图9可知,在双模反谐振空芯光纤气室700中仅存在LP₀₁模式和LP₁₁模式,其中,LP₀₁模式的光功率占比约为96%。

[0098] S112将干涉光转化为电信号。

[0099] 在经过步骤S111后,流体浓度传感器已经获取到了干涉光,然后,流体浓度传感器可以进行光电转换,将干涉光转换为电信号,用于进一步的信号分析。

[0100] 例如,光探测器810在接收到干涉光后,可以将干涉光转换为电信号,并传输至锁相放大器820。

[0101] S113若泵浦激光为连续激光,则根据电信号,解调出谐波信号,其中,谐波信号的峰值或峰峰值信息为包含相位差信息的光热信号;

[0102] 若泵浦激光为脉冲激光,则电信号的峰值信息为包含相位差信息的光热信号。

[0103] 当泵浦激光为连续激光时,泵浦激光在输入双模空芯光纤之前经过周期性调制。因此,需要进一步的将电信号解调为谐波信号。其中,谐波信号的峰峰值信息为包含相位差信息的光热信号。例如,锁相放大器820在接收到电信号后,可以从电信号中解调出谐波信号,并传输至分析终端830,分析终端830在接收到谐波信号后,处理得到谐波信号的峰峰值信息。

[0104] 当泵浦激光为脉冲激光时,泵浦激光在输入双模空芯光纤之前没有经过周期性调制。因此,该电信号的峰值信息直接就是包含相位差信息的光热信号,可以直接将步骤S112中得到的电信号传输至分析终端。

[0105] S114根据光热信号,确定待测物质的浓度信息。

[0106] 在经过步骤S113后,流体浓度传感器已经获取到了谐波信号的峰峰值信息,或电信号的峰值信息,也即是光热信号,该光热信号与待测物质的浓度成正比。最后,通过光热信号与待测物质的浓度关系,求得待测物质的真实浓度信息。

[0107] 下面对本申请的测量原理进行示例性的说明。

[0108] 光在介质中传播时,如果光的波长和介质分子的吸收峰对准或在其附近时,光的强度会随传播距离而衰减,该现象称为光的吸收,可由比尔-朗伯定律描述。根据比尔-朗伯定律,激光在包含待测痕量物质的流体中传播时(弱吸收),吸收光强度 I_{ab} 可表示为:

$$I_{ab}(\lambda) = (1 - e^{-\alpha_0(\lambda)CL}) I_p \approx \alpha_0(\lambda) CL I_p(\lambda) \quad (1)$$

[0110] 其中, α_0 为待测物质浓度为100%时对应的峰值吸收系数,C为待测物质的浓度,L为光介质中传播距离, I_p 为泵浦激光强度, λ 为泵浦激光波长。

[0111] 因此,在弱吸收近似下,可简化原理说明。

[0112] 首先,待测物质吸收泵浦激光所产生的热量Q可以表示为:

$$Q = H\alpha_0(\lambda) CI_p(\lambda) \quad (2)$$

[0114] 其中,H为热转换效率。通过式(2)可以看出,Q与C成正比。

[0115] 如果对泵浦激光的强度进行调制,那么 I_p 和Q都是时间t的谐波函数;如果对泵浦激光的波长进行调制,由于 $\alpha_0(\lambda)$ 对波长 λ 的依赖性,Q可能包含调制频率的多次谐波。但是,泵浦激光不论是经过谐波强度调制还是经过谐波波长调制,所引起的双模空芯光纤内的温度场变化T均可由热传导方程得到:

$$\rho C_p \partial T / \partial t = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + Q \quad (3)$$

[0117] 其中, ρ 为双模空芯光纤内流体或光纤材料的密度, C_p 为双模空芯光纤内流体或光纤材料的比热, κ 为双模空芯光纤内流体或光纤材料的热导率。

[0118] 通过式(3)可以看出,由于Q与C成正比,因此,由此引发的T也与C成正比。

[0119] 然后,可以通过克劳修斯-莫索提方程获得双模空芯光纤的纤芯内流体折射率的改变量 Δn :

$$\Delta n = - (n_0 - 1) \Delta T / T_{abs} = - (n_0 - 1) [T - T_{abs}] / T_{abs} \quad (4)$$

[0121] 其中 n_0 为常温常压条件下的流体的折射率, T_{abs} 为环境温度,也即是双模空芯光纤内的温度场的初始温度。

[0122] 通过式(4)可以看出,由于T与C成正比,因此, Δn 也与C成正比。

[0123] 再通过对光纤横截面上的交叠积分来计算第一传输模式和第二传输模式的折射率的改变量 $\Delta n_i(z, t)$:

$$\Delta n_i(z, t) = \langle \Delta n(x, y, z), \psi_i^2 \rangle \quad (5)$$

[0125] 其中, ψ_i 为归一化模场,其满足 $\langle \psi_i, \psi_i \rangle = 1$ (且*i*=1或2,分别表示第一传输模式和第二传输模式,下文同样适用), $\langle \rangle$ 代表在光纤横截面上的交叠积分,(x,y,z)为双模空芯光纤内的某一笛卡尔空间坐标系。

[0126] 然后,第一传输模式和第二传输模式被调制后的相位差 $\Delta \phi$ 可表示为:

$$\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda_s} \int_0^L [\Delta n_1(z, t) - \Delta n_2(z, t)] dz \quad (6)$$

[0128] 其中, λ_s 为探测激光的波长,L为双模空芯光纤的长度。

[0129] 因此,该被调制后的相位差 $\Delta \varphi$ 与C成正比例。理论分析结果表明 $\Delta \varphi$ 对C的敏感度和第一传输模式的相位对C的敏感度差不多,也就是说 $\Delta \varphi$ 对C比较敏感。

[0130] 进一步的,温度、压力等外界环境扰动也会对探测激光的第一传输模式和第二传输模式的相位产生影响,但是两个传输模式对它们的敏感程度相似,因此,通过测量两个传输模式的相位差会大大减弱外界环境扰动的影响。理论分析如下:

[0131] 探测激光的相位对外界环境扰动的相位灵敏度 $S_{i,X}$ 可表示为:

$$[0132] S_{i,X} = \frac{d\phi_i}{dx} = \frac{2\pi L}{\lambda_s} n_i \left(\frac{1}{n_i} \frac{\partial n_i}{\partial x} + \frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial x} \right) \quad (7)$$

[0133] 其中, ϕ_i ($i=1, 2$) 为第 i 个传输模式的相位, n_i 为第 i 个传输模式的有效折射率, x 为外界环境扰动。

[0134] 进一步的,第一传输模式和第二传输模式的相位差对外界环境扰动的相位差灵敏度 $S_{1-2,X}$ 可表示为:

$$[0135] S_{1-2,X} = \frac{d\Delta\phi}{dx} = \frac{2\pi L}{\lambda_s} \Delta n_{eff} \left(\frac{1}{\Delta n_{eff}} \frac{\partial \Delta n_{eff}}{\partial x} + \frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial x} \right) \quad (8)$$

[0136] 其中, $\Delta n = n_1 - n_2$, 为第一传输模式和第二传输模式的折射率差。

[0137] 研究表明,式(7)和式(8)中括号内第二项“ $\frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial x}$ ”(即外界环境扰动对双模空芯光纤纵向长度变化的影响)对相位灵敏度的贡献更大,或至少与第一项“ $\frac{1}{n_i} \frac{\partial n_i}{\partial x}$, 或 $\frac{1}{\Delta n} \frac{\partial \Delta n}{\partial x}$ ”(即外界环境扰动对双模空芯光纤材料折射率和对双模空芯光纤横向尺寸在内的改变对光纤模式折射率的共同影响)在同一数量级。因此和单一传输模式的相位变化相比,两种不同传输模式的相位差对外界环境扰动的相位灵敏度可减弱 $\frac{S_{1-2,X}}{S_{i,X}} \approx \frac{\Delta n}{n_i}$ 量级,从而有效消除外界环境扰动的影响,达到减小噪声,实现测量传感器的高信噪比探测。

[0138] 结合上述理论分析可知,两种不同传输模式的相位差变化正比于待测物质的浓度,且相比于采用单一传输模式,采用两种不同传输模式的相位差变化可获得更高的信噪比。

[0139] 下面通过一些实验数据,进一步证明本申请提供的一种流体浓度检测方法的有益效果。

[0140] 请参阅图10,图10是本申请提供的一种流体浓度检测方法测量的体积浓度为1ppm的乙炔气体的谐波信号曲线图。图10中,每条曲线对应的泵浦激光功率不同,当泵浦激光经过波长调制后,获取的谐波信号表现为,当泵浦激光的强度越高(即功率越大),谐波信号的峰峰值越大,即光热信号越大。当泵浦激光的波长被调谐至1532.573时(即远离乙炔气体吸收线),获取的谐波信号的均方差为系统噪声。经实验证明,当泵浦激光的功率约为108毫瓦,探测激光的功率为125微瓦,锁相放大器的积分时间为1秒时,通过计算信号噪声比值,也即是信噪比,可以得到信噪比为1时对应的最小可探测灵敏度约为68ppt(万亿分之一)。

[0141] 请参阅图11,图11是本申请提供的一种基于2小时噪声数据得到的乙炔气体检测的阿伦方差曲线图。从图11中可以看出,随着积分时间的增加,可探测浓度极限不断下降。当积分时间增加至100秒时,本申请的乙炔气体最小可探测灵敏度可以提高到15ppt。体现

了检测系统的高灵敏度探测的效果。

[0142] 请参阅图12,图12是本申请提供的一种在3小时内测量的体积浓度为1ppm的乙炔气体的谐波信号变化曲线图。前0.1小时做放大处理,可以看见乙炔气体在吸收周期性调制后的泵浦激光所产生的谐波信号,计算得到3小时光热信号的波动幅度约为0.8%。体现了检测系统稳定的效果。

[0143] 请参阅图13,图13是本申请提供的一种带有微通道的双模反谐振空芯光纤的气室结构图。该双模反谐振空芯光纤总长74厘米。首先,通过使用800纳米飞秒激光在该双模反谐振空芯光纤的侧面加工了34个微通道,使得乙炔气体可以快速进入到双模反谐振空芯光纤内,其中,每个微通道之间间隔2厘米,最左侧的微通道距离左侧端面3厘米,最右侧的微通道距离右侧端面5厘米。然后,将该双模反谐振空芯光纤放入长度为1米,直径为25毫米的圆柱形气室中。请参阅图14,图14是本申请提供的一种带有微通道的双模反谐振空芯光纤气室的双模干涉损耗谱图,图中条纹是由于第一传输模式和第二传输模式干涉引起的。该光纤气室是由单模光纤-双模空芯光纤-单模光纤连接而成。请参阅图15,图15是本申请提供的一种带有微通道的双模反谐振空芯光纤的微通道处的截面图。

[0144] 请参阅图16,图16是本申请提供的一种归一化光热信号随充气时间的变化曲线图。图16的气体浓度检测实验是基于图13的一种带有微通道的双模反谐振空芯光纤气室完成的。图中,曲线从45秒时开始上升,直到约89秒时气体填充量达到整个空芯光纤的90%,随后曲线区域逐步趋于稳定,并于170秒左右开始下降。测试过程为:先向图13的圆柱形气室中充入纯氮气,在45秒时以压差1巴的条件充入体积浓度为1000ppm的乙炔气体,在170秒时以压差1巴的条件充入纯氮气,计算得到乙炔气体的测量响应时间约为44秒。体现了检测系统响应时间短的效果。

[0145] 请参阅图17,图17是本申请提供的一种在常温常压下乙炔气体传感器动态范围测量结果的曲线图。图17的气体浓度检测实验是基于图13的一种带有微通道的双模反谐振空芯光纤气室完成的。可以看出乙炔气体的体积浓度从4ppm到1%的变化过程中,光热信号与乙炔气体的浓度成正比关系,当浓度大于1%时,出现非线性关系。当积分时间为100秒时,乙炔气体的最小可探测灵敏度约为500ppt,此时系统的动态范围高达7个量级(约为 2×10^7)。体现了超高动态范围的效果。

[0146] 综上,本申请实施例通过,将含待测物质的流体填充至双模空芯光纤的纤芯内;将探测激光和调制后的泵浦激光输入双模空芯光纤中,待测物质吸收泵浦激光后加热流体,致使流体折射率被调制;在探测激光进入双模空芯光纤时,激发生双模空芯光纤中的第一传输模式和第二传输模式,其中,第一传输模式与第二传输模式互异;流体折射率被调制时,将导致第一传输模式和第二传输模式在双模空芯光纤中传输时的相位被调制;解调第一传输模式的调制后的相位和第二传输模式的调制后的相位之间的相位差信息,获得待测物质的浓度信息。通过本申请实施例,由于外界环境对探测激光的第一传输模式和第二传输模式的相位具有相似影响效果,因此可以有效抵消外界环境对测量系统的干扰,降低系统噪声,实现高信噪比,提高流体浓度传感器的探测灵敏度和动态范围。

[0147] 进一步的,本申请还具有高探测灵敏度、系统长期稳定性好、响应时间短的效果。

[0148] 应理解,上述实施例中各步骤的序号的大小并不意味着执行顺序的先后,各过程的执行顺序应以其功能和内在逻辑确定,而不应对本申请实施例的实施过程构成任何限

定。

[0149] 对应于上文实施例的流体浓度检测方法,图18示出了本申请提供的一种流体浓度检测系统的结构框图,为了便于说明,仅示出了与本申请实施例相关的部分。

[0150] 参照图18,该装置包括:用于生成调制后的泵浦激光的泵浦激光组件202,用于生成探测激光的探测激光组件204,用于使用探测激光激发出双模空芯光纤的第一传输模式和第二传输模式,并提供泵浦激光和含待测物质的流体相互作用产生光热效应的场所的双模空芯光纤气室组件206,以及用于将第一传输模式和第二传输模式形成的干涉光转换为电信号,解调第一传输模式和第二传输模式之间的相位差,并获得待测物质的浓度信息的分析组件208:

[0151] 双模空芯光纤气室组件206包括用于填充含待测物质的流体的双模空芯光纤,用于传输泵浦激光和探测激光的第一单模光纤和第二单模光纤,用于分离泵浦激光和探测激光的第一波分复用器和第二波分复用器,用于存储含待测物质的流体的气室装置,用于输入含待测物质的流体的输入装置;

[0152] 其中,泵浦激光组件202的输出端与第一波分复用器的泵浦激光输入端相连,第一波分复用器的泵浦激光输出端与第一单模光纤的泵浦激光输入端相连,第一单模光纤的泵浦激光输出端与双模空芯光纤的泵浦激光输入端相对设置,双模空芯光纤的探测激光输入端与第二单模光纤的探测激光输出端相对设置,第二单模光纤的探测激光输入端与第二波分复用器的探测激光输出端相连,第二波分复用器的探测光输入端与探测激光组件204的输出端相连,第一波分复用器的探测激光输出端与分析组件208的输入端相连,双模空芯光纤的探测激光输入端和第二单模光纤的探测激光输出端设置于气室装置中,输入装置与气室装置相连。

[0153] 可选的,泵浦激光组件202包括激光驱动器,可调谐泵浦光源,激光放大器,光隔离器,可调谐光学滤波器;

[0154] 探测激光组件204包括探测光源;

[0155] 分析组件208包括光探测器,锁相放大器,以及分析终端;

[0156] 其中,激光驱动器的输出端与可调谐泵浦光源的输入端相连,可调谐泵浦光源的输出端与激光放大器的输入端相连,激光放大器的输出端与光隔离器的输入端相连,光隔离器的输出端与可调谐光学滤波器的输入端相连,可调谐光学滤波器的输出端与第一波分复用器的泵浦激光输入端相连;

[0157] 第一波分复用器的探测激光输出端与光探测器的输入端相连,光探测器的输出端与锁相放大器的输入端相连,锁相放大器的谐波信号输出端与分析终端的输入端相连,锁相放大器的调制信号输出端与激光驱动器的输入端相连。

[0158] 可选的,双模空芯光纤包括反谐振光纤、光子带隙光子晶体光纤、以及Kagome光纤中的任意一种。

[0159] 可选的,双模空芯光纤的探测激光输入端与第二单模光纤的探测激光输出端相对设置,包括:

[0160] 双模空芯光纤的探测激光输入端与第二单模光纤的探测激光输出端不完全对准,使得探测激光激发生双模空芯光纤的第一传输模式和第二传输模式。第一传输模式和第二传输模式同时在双模空芯光纤中传播,并在输出端发生干涉。

[0161] 可选的,双模空芯光纤的探测激光输入端与第二单模光纤的探测激光输出端相对设置,包括:

[0162] 双模空芯光纤的探测激光输入端与第二单模光纤的探测激光输出端完全对准,使得探测激光只激发双模空芯光纤的第一传输模式。其中,在双模空芯光纤的探测激光输入端写入长周期光栅,长周期光栅使得第一传输模式的部分能量耦合到第二传输模式,使得探测激光生成的第一传输模式和第二传输模式同时在双模空芯光纤中传播,并在输出端发生干涉。

[0163] 需要说明的是,上述装置/组件之间的信息交互、执行过程等内容,由于与本申请方法实施例基于同一构思,其具体功能及带来的技术效果,具体可参见方法实施例部分,此处不再赘述。

[0164] 所属领域的技术人员可以清楚地了解到,为了描述的方便和简洁,仅以上述各功能单元、模块的划分进行举例说明,实际应用中,可以根据需要而将上述功能分配由不同的功能单元、模块完成,即将所述装置的内部结构划分成不同的功能单元或模块,以完成以上描述的全部或者部分功能。实施例中的各功能单元、模块可以集成在一个处理单元中,也可以是各个单元单独物理存在,也可以两个或两个以上单元集成在一个单元中,上述集成的单元既可以采用硬件的形式实现,也可以采用软件功能单元的形式实现。另外,各功能单元、模块的具体名称也只是为了便于相互区分,并不用于限制本申请的保护范围。上述系统中单元、模块的具体工作过程,可以参考前述方法实施例中的对应过程,在此不再赘述。

[0165] 在上述实施例中,对各个实施例的描述都各有侧重,某个实施例中没有详述或记载的部分,可以参见其它实施例的相关描述。

[0166] 本领域普通技术人员可以意识到,结合本文中所公开的实施例描述的各示例的单元及算法步骤,能够以电子硬件、或者计算机软件和电子硬件的结合来实现。这些功能究竟以硬件还是软件方式来执行,取决于技术方案的特定应用和设计约束条件。专业技术人员可以对每个特定的应用来使用不同方法来实现所描述的功能,但是这种实现不应认为超出本申请的范围。

[0167] 以上所述实施例仅用以说明本申请的技术方案,而非对其限制;尽管参照前述实施例对本申请进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分技术特征进行等同替换;而这些修改或者替换,并不使相应技术方案的本质脱离本申请各实施例技术方案的精神和范围,均应包含在本申请的保护范围之内。

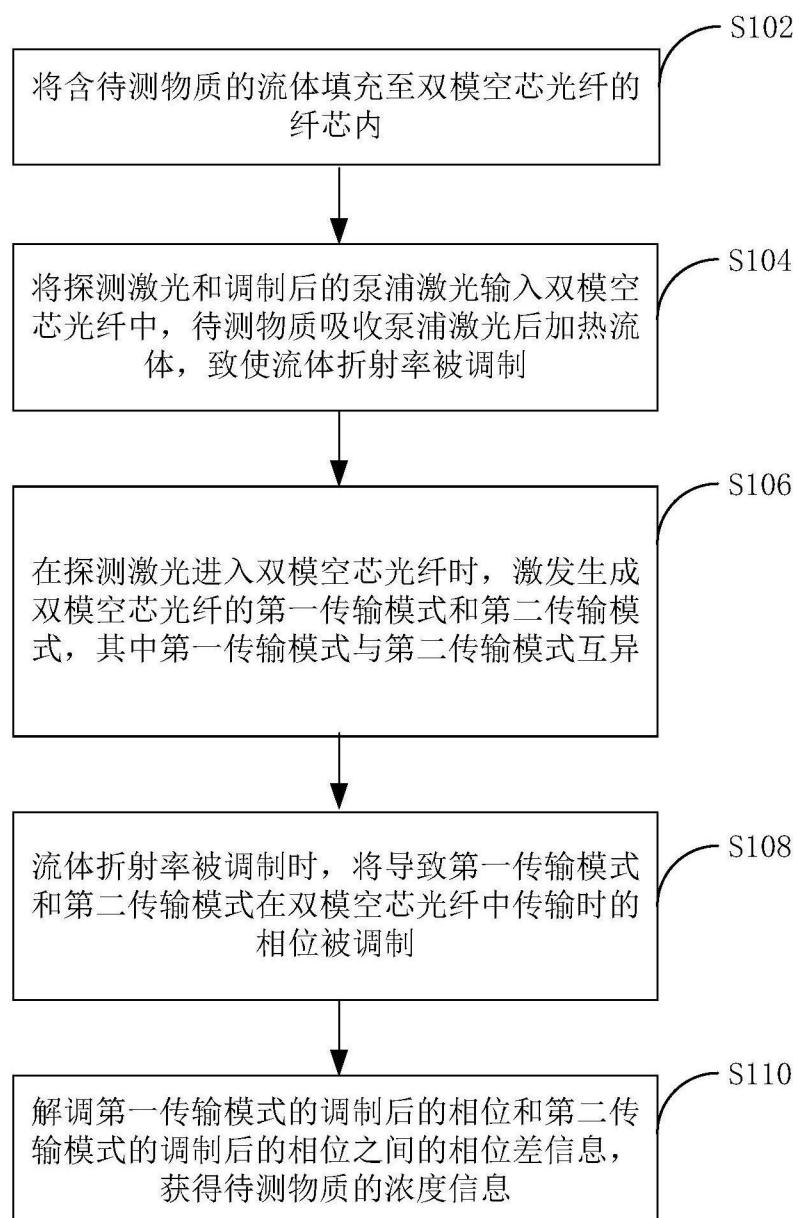


图1

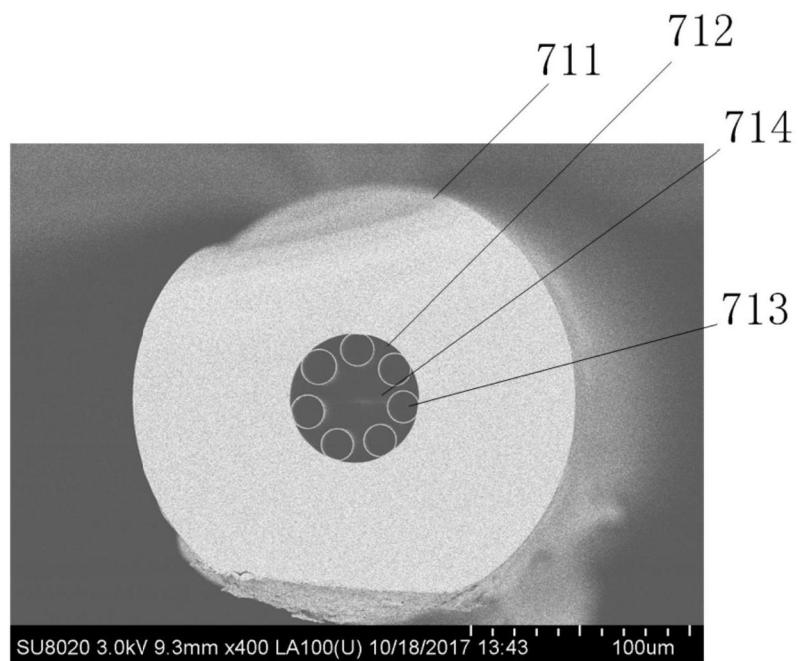


图2

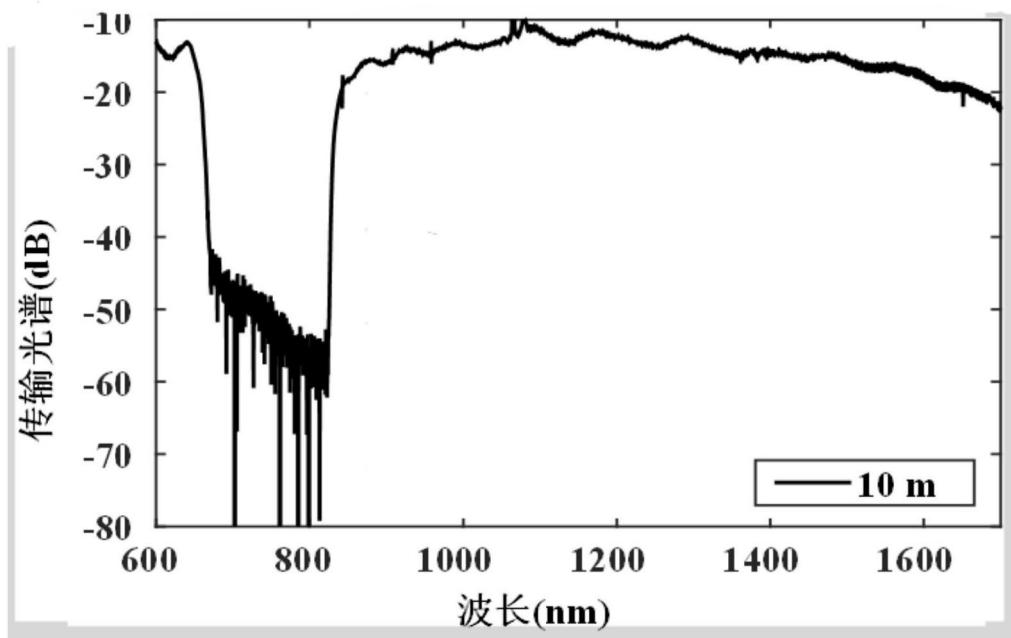


图3

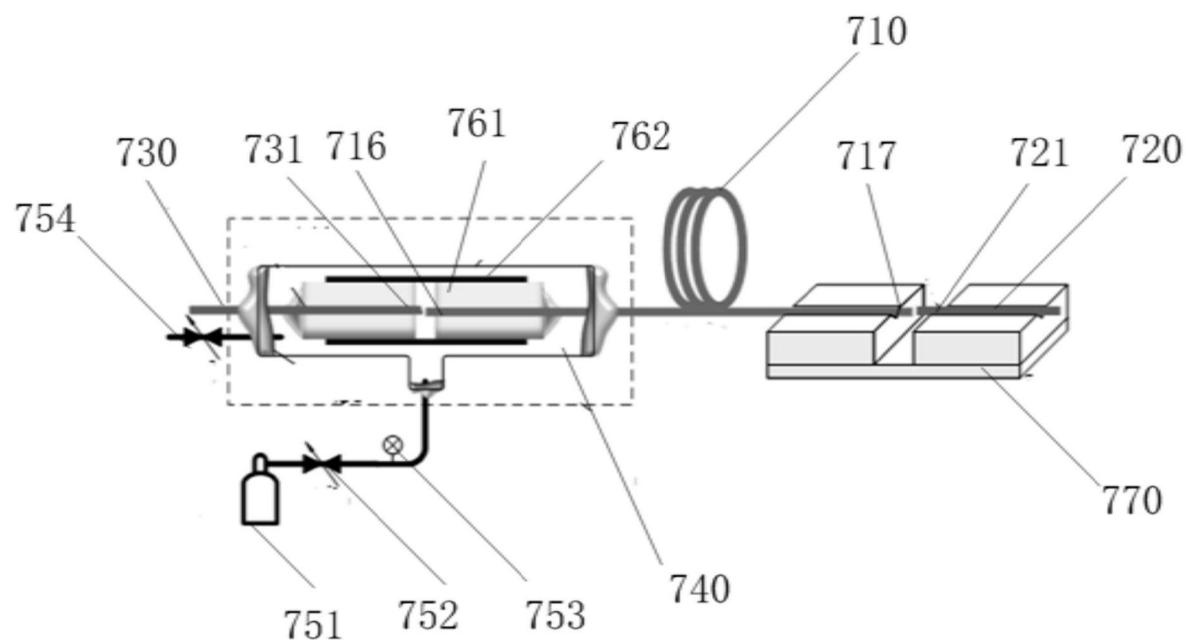


图4

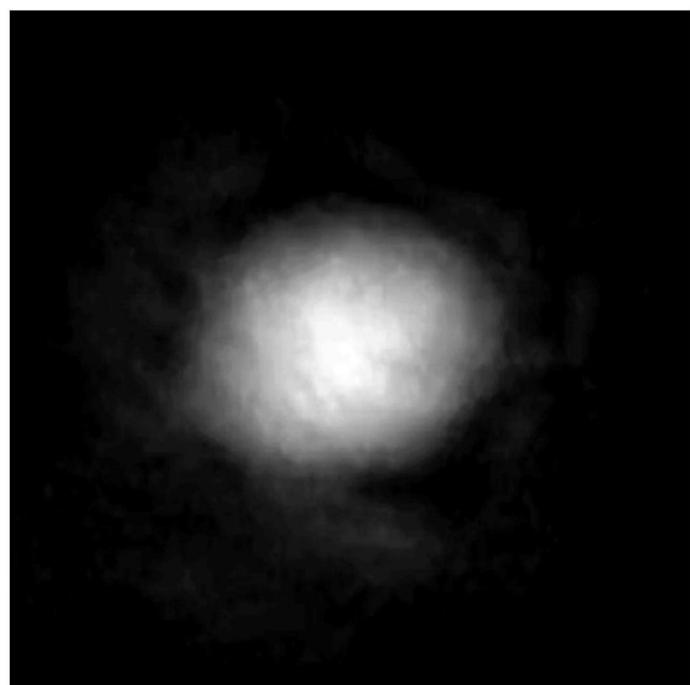


图5

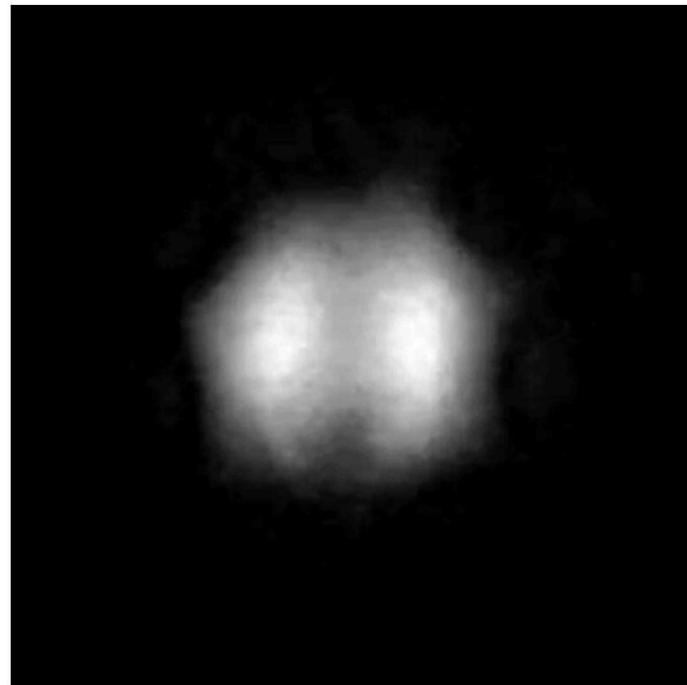


图6

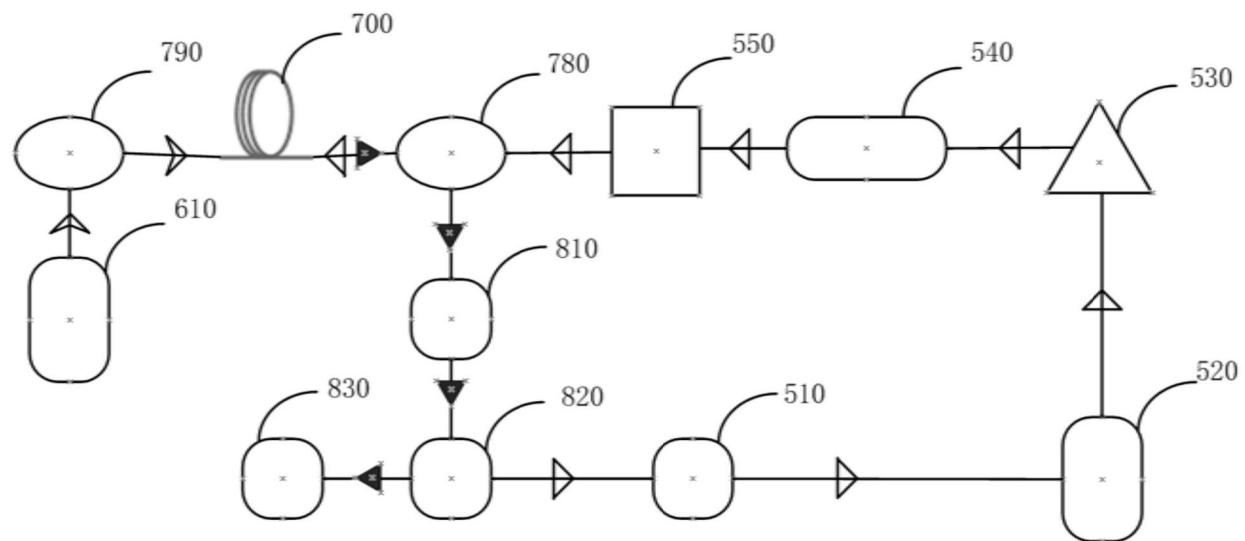


图7

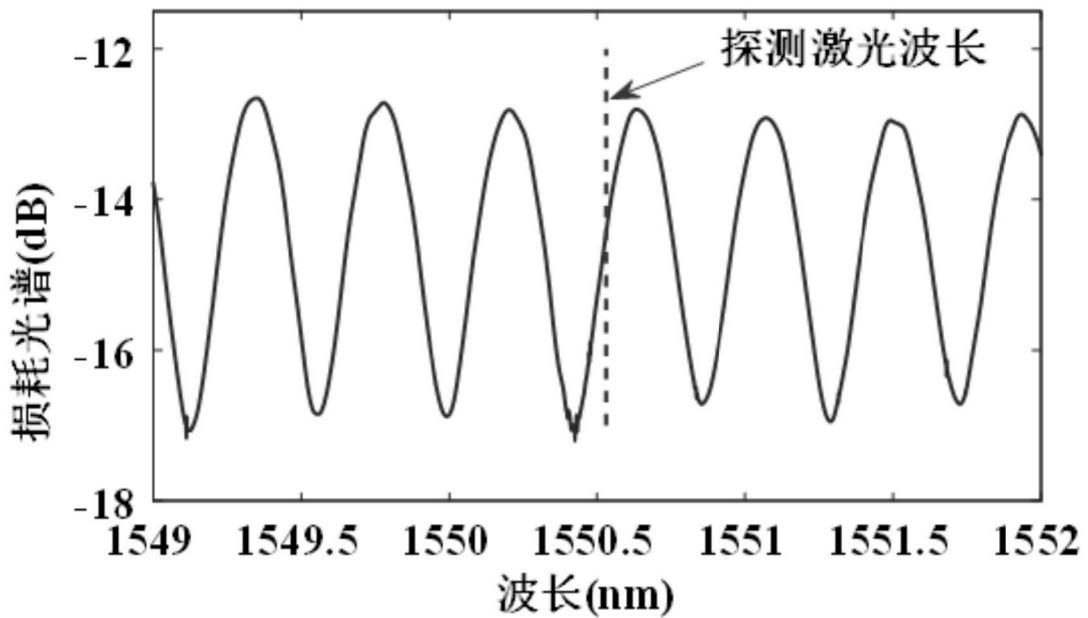


图8

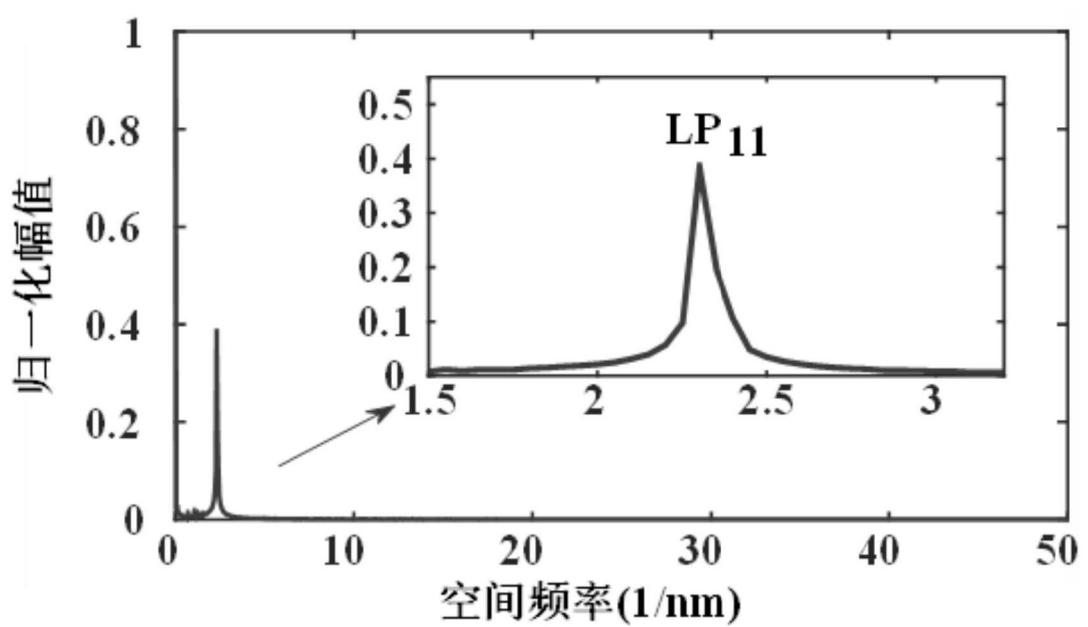


图9

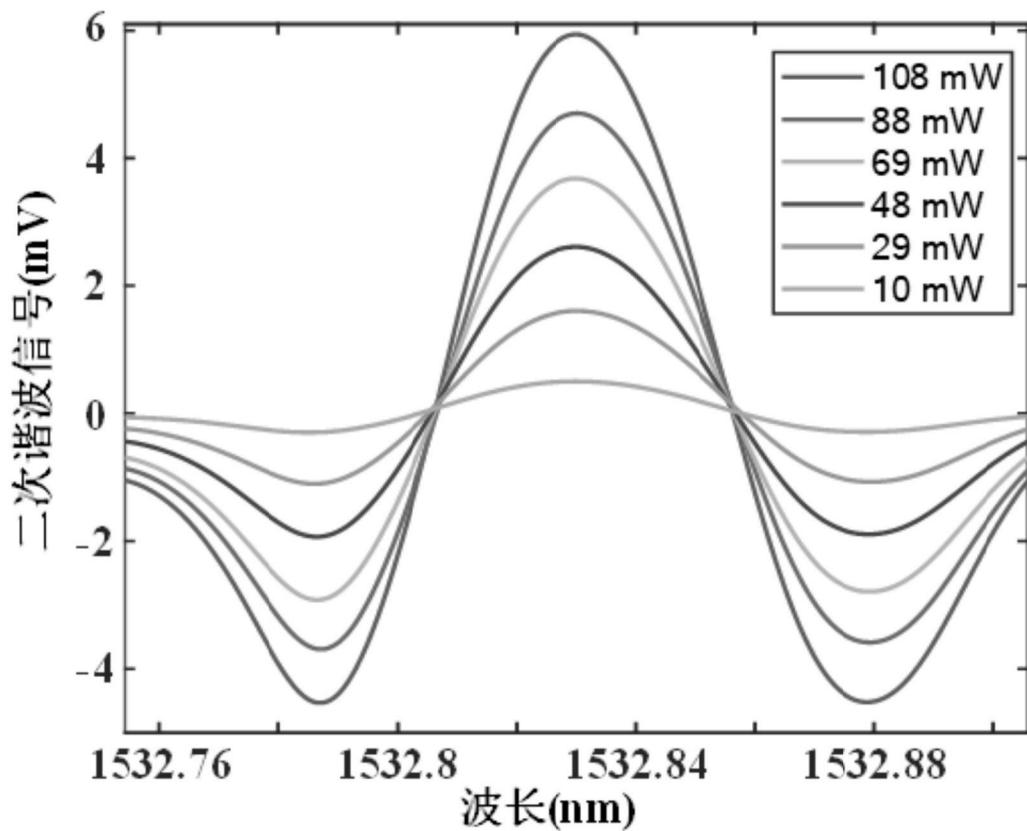


图10

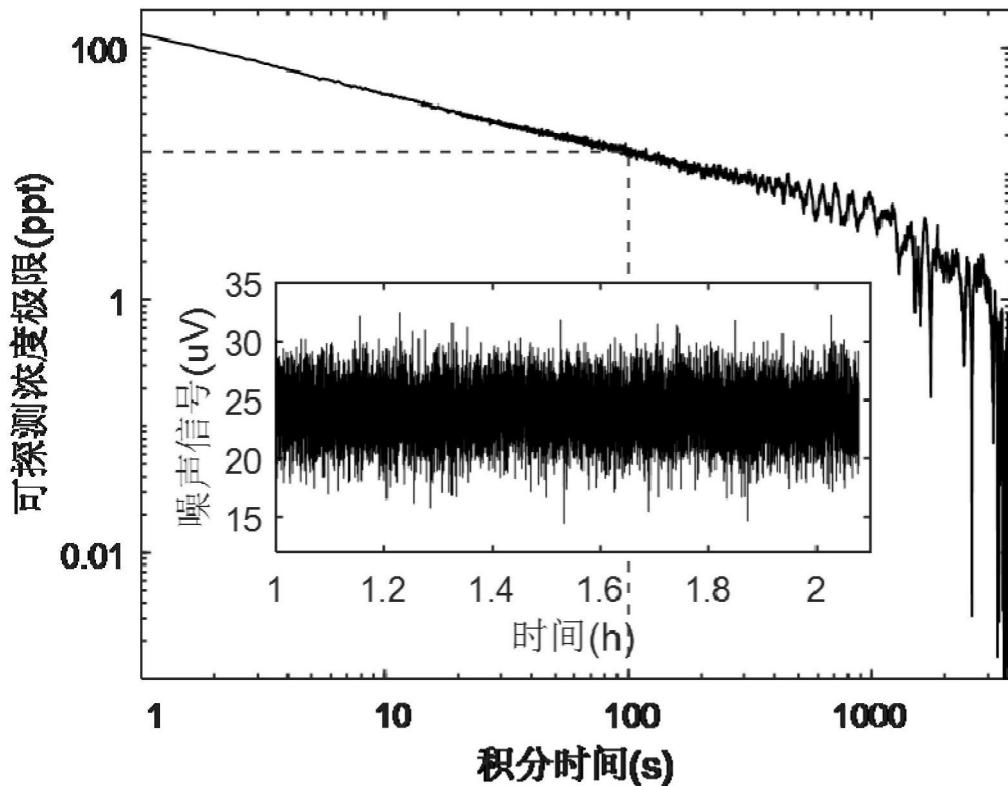


图11

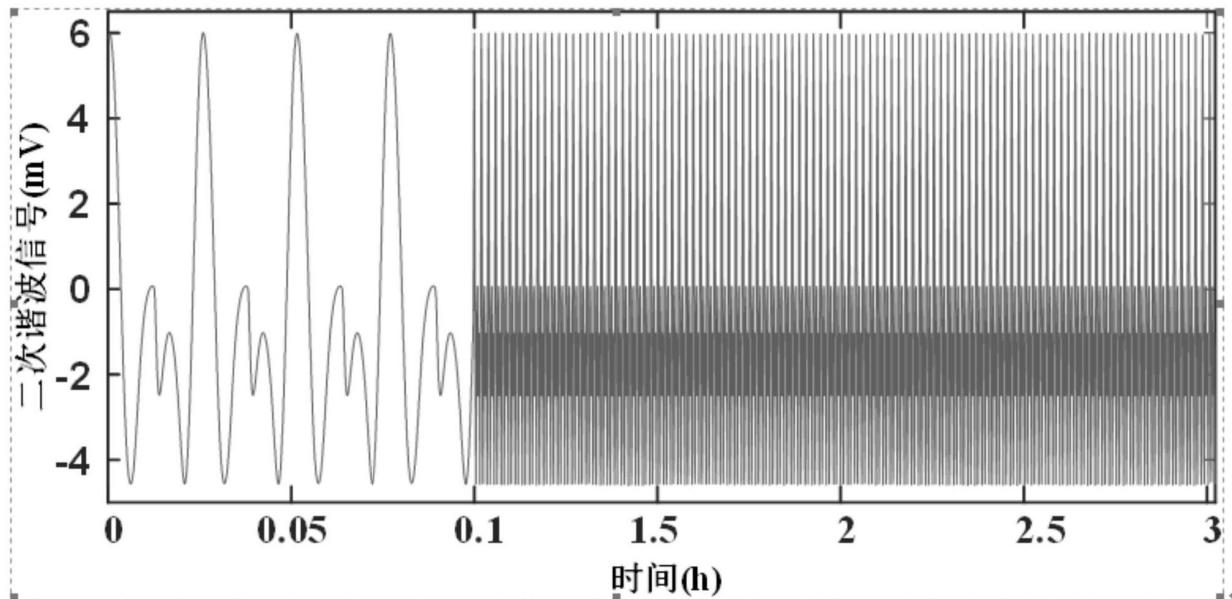


图12

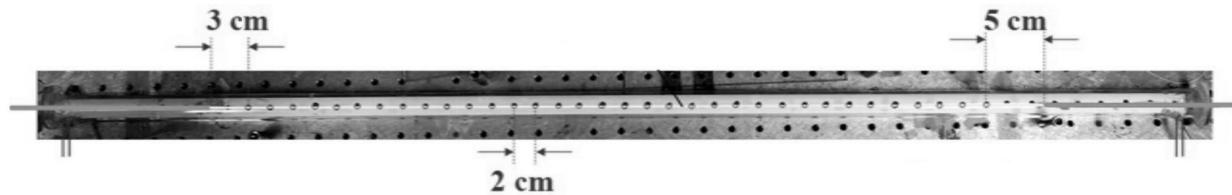


图13

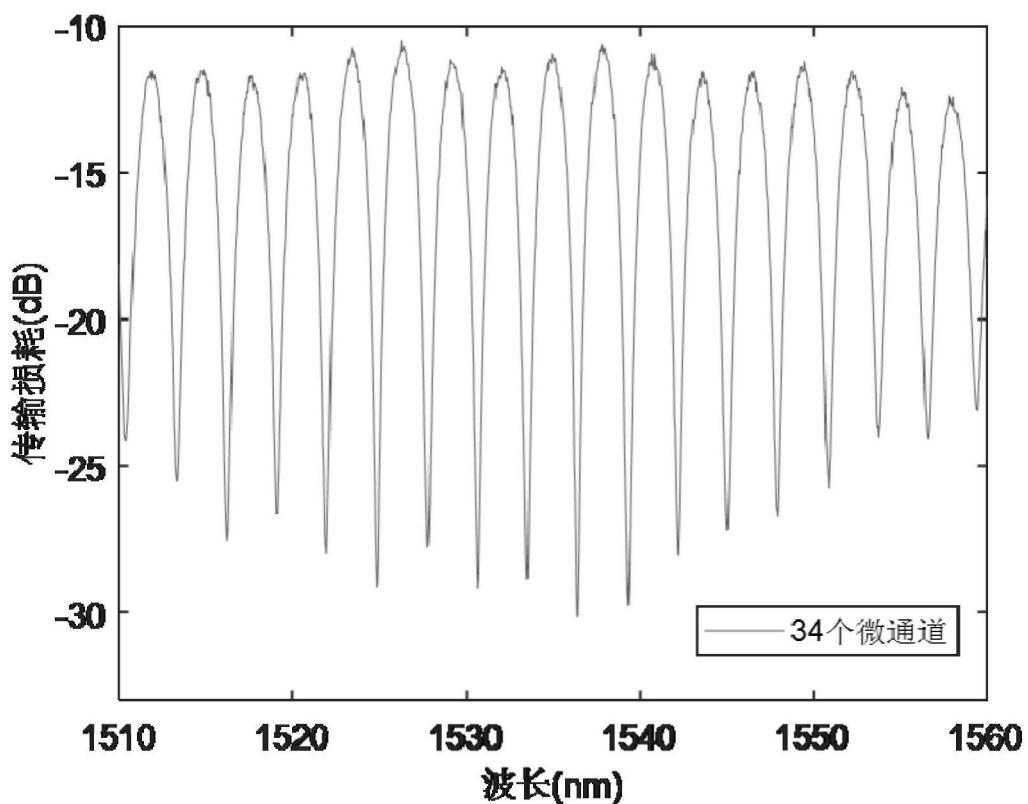


图14

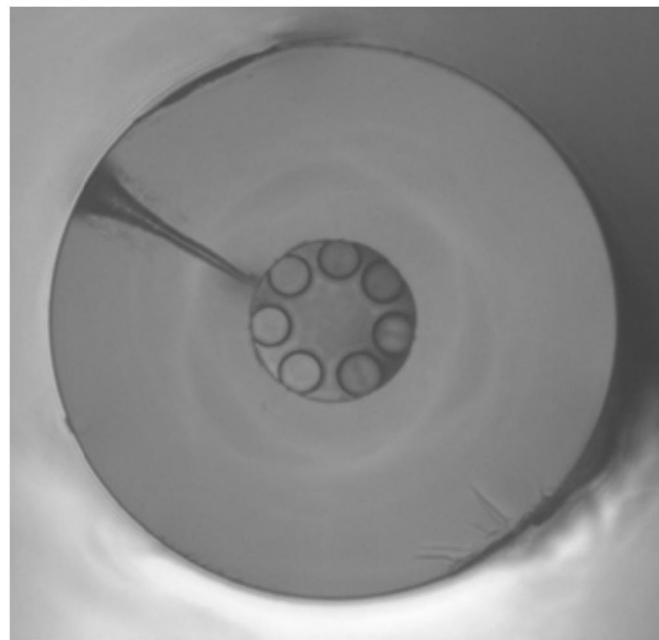


图15

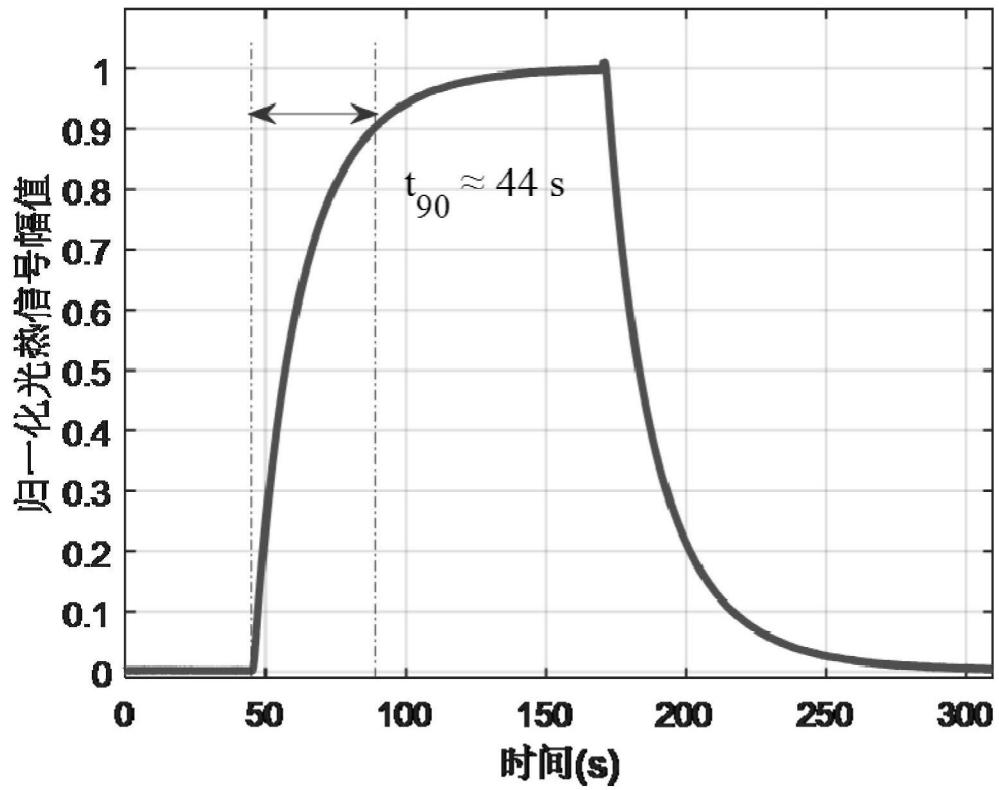


图16

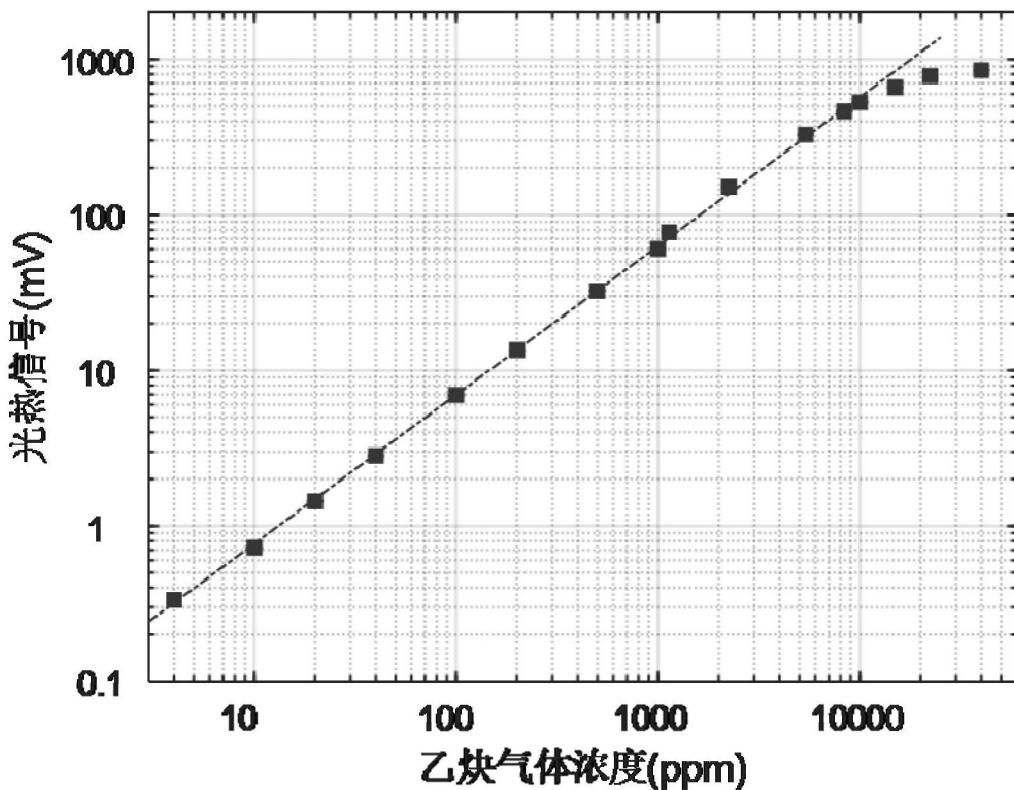


图17

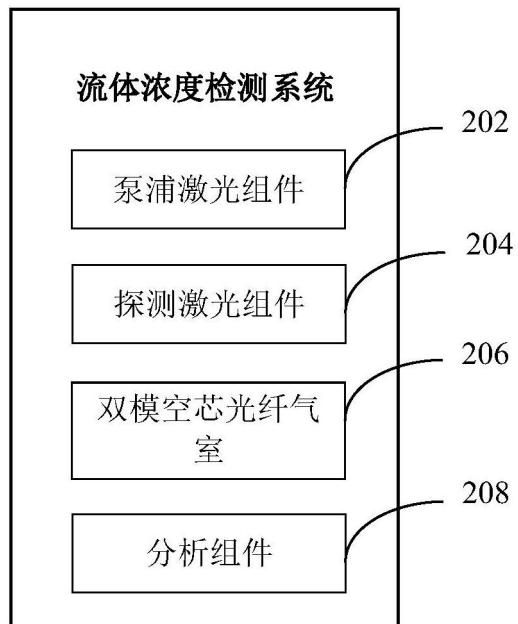


图18