



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113777073 B

(45) 授权公告日 2024.05.14

(21) 申请号 202110926492.7

CN 104596996 A, 2015.05.06

(22) 申请日 2021.08.12

CN 110286577 A, 2019.09.27

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 108801946 A, 2018.11.13

申请公布号 CN 113777073 A

US 2019195781 A1, 2019.06.27

(43) 申请公布日 2021.12.10

US 2007146721 A1, 2007.06.28

(73) 专利权人 香港理工大学深圳研究院

JP H08338805 A, 1996.12.24

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

WO 2019183838 A1, 2019.10.03

(72) 发明人 靳伟 鲍海泓 何海律

JP H0894328 A, 1996.04.12

(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

DE 19633569 A1, 1998.02.26

专利代理人 徐凯凯

JP H02240546 A, 1990.09.25

(51) Int.Cl.

WO 2005108939 A1, 2005.11.17

G01N 21/39 (2006.01)

US 2014253919 A1, 2014.09.11

G01N 21/25 (2006.01)

US 2006114464 A1, 2006.06.01

G01N 21/03 (2006.01)

US 9735537 B1, 2017.08.15

(56) 对比文件

Haihong Bao et al..Phase-Modulation-Amplifying Hollow-Core Fiber Photothermal Interferometry for Ultrasensitive Gas Sensing.《JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY》.2022,第40卷(第1期),全文.

CN 103364371 A, 2013.10.23

姜寿林 等.基于空芯光纤光热光谱技术的高灵敏度CO₂检测.《光学学报》.2021,第41卷(第13期),正文第1-4节. (续)

CN 111504945 A, 2020.08.07

审查员 王姝月

RU 2736178 C1, 2020.11.12

US 2005105099 A1, 2005.05.19

US 2010315642 A1, 2010.12.16

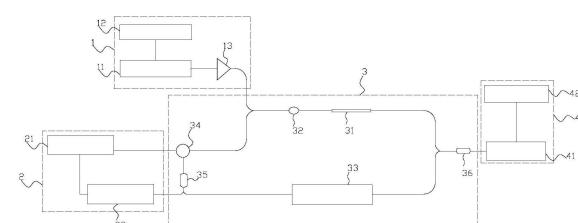
US 2017299508 A1, 2017.10.19

权利要求书3页 说明书10页 附图4页

(54) 发明名称

提高检测的信噪比。本发明可实现体积分数检测下限为万亿分之一量级的痕量气体参数检测,本发明对能够吸收可见光波段、近红外波段以及中红外波段的气体具有普适性。

一种基于光学相位放大的气体检测方法和系统



(57) 摘要

本发明涉及气体检测领域,具体是涉及一种基于光学相位放大的气体检测方法和系统。本发

B
CN 113777073 B
明通过待检测气体吸收加热激光而产生热量,产生的热量能够调制探测激光的相位;探测激光受到的光热相位调制经光学谐振腔放大;对从光学谐振腔出射的探测激光的相位进行测量并分析以获取待检测气体的参数。本发明可以有效地将探测激光受到的微小的光热相位调制进行放大,

[转续页]

[接上页]

(56) 对比文件

李树旺 等. 大气吸收性成分的光热干涉法

测量.《红外与激光工程》.2016,第45卷(第S1期),全文.

1. 一种基于光学相位放大的气体检测方法,其特征在于,所述气体检测方法包括:

将加热激光和探测激光均射入光学谐振腔,所述光学谐振腔盛放含有待检测气体的气体样品,所述加热激光的波长与所述待检测气体分子的吸收线中心所对应的波长之差的绝对值小于第一设定值,所述探测激光的波长与所述光学谐振腔的一个谐振波长相匹配,且所述探测激光的波长与所述待检测气体分子的吸收线中心所对应的波长之差的绝对值大于第二设定值,所述第二设定值大于所述第一设定值;

获取探测光经盛放含有所述待检测气体的气体样品的所述光学谐振腔放大光热相位调制后射出的探测出射光信息;

依据所述探测出射光信息所对应的相位调制幅度,得到所述待检测气体的参数;

依据所述探测出射光信息所对应的相位调制幅度,得到所述待检测气体的参数,包括:

获取数据库,所述数据库包括标定气体的参数和与所述标定气体的参数所匹配的标定激光的相位调制幅度;其中,所述标定激光与所述探测出射光对应,所述标定激光的相位调制幅度与所述探测出射光的相位调制幅度对应,所述标定气体与所述气体样品对应;其中所述标定气体指在已知气体样品物理参量的情况下,按照确定的体积分数将待测气体混合于另一种不同种类的气体中所形成的均匀稳定的气体样品;

依据所述探测出射光的相位调制幅度和与所述探测出射光的相位调制幅度对应的所述标定激光的相位调制幅度以及与所述标定激光的相位调制幅度所匹配的所述标定气体的参数,得到所述待检测气体的参数;

所述探测出射光包括探测光经所述光学谐振腔反射的探测反射光和探测光经所述光学谐振腔透射的探测透射光;所述探测出射光的相位调制幅度包括探测透射光的相位调制幅度和探测反射光的相位调制幅度;

所述标定激光的相位调制幅度包括与所述探测透射光的相位调制幅度所对应的标定相位调制幅度,或者所述标定激光的相位调制幅度包括与所述探测反射光的相位调制幅度所对应的标定相位调制幅度,或者所述标定激光的相位调制幅度包括由所述探测透射光的相位调制和所述探测反射光的相位调制构成的探测光相位差调制幅度所对应的标定相位差调制幅度;

所述标定气体的参数包括与所述标定相位调制幅度所匹配的标定气体浓度和与所述标定相位差调制幅度所匹配的标定气体浓度;

所述待检测气体的参数包括待检测气体在气体样品中的浓度;

所述依据所述探测出射光的相位调制幅度、与所述探测出射光的相位调制幅度对应的标定激光的相位调制幅度以及与所述标定激光的相位调制幅度所匹配的所述标定气体的参数,得到所述待检测气体的参数,包括:

依据所述探测透射光的相位调制幅度,获取所述探测透射光的相位调制幅度所对应的标定相位调制幅度;

依据所述探测透射光的相位调制幅度所对应的标定相位调制幅度,得到与所述标定相位调制幅度所匹配的标定气体浓度;

依据所述标定气体浓度,得到所述待检测气体在气体样品中的浓度;

或者,依据所述探测反射光的相位调制幅度,得到所述探测反射光的相位调制幅度所对应的标定相位调制幅度;

依据所述探测反射光的相位调制幅度所对应的标定相位调制幅度,得到与所述标定相位调制幅度所匹配的标定气体浓度;

依据所述标定气体浓度,得到所述待检测气体在气体样品中的浓度;

或者,依据所述探测透射光的相位调制幅度和所述探测反射光的相位调制幅度,得到由所述探测透射光的相位调制和所述探测反射光的相位调制构成的探测光相位差调制幅度所对应的标定相位差调制幅度;

依据所述标定相位差调制幅度,得到与所述标定相位差调制幅度所匹配的标定气体浓度;

依据所述标定气体浓度,得到所述待检测气体在气体样品中的浓度。

2. 如权利要求1所述的基于光学相位放大的气体检测方法,其特征在于,所述气体检测方法还包括:

实时控制探测激光的波长,使得探测激光的波长等于所述光学谐振腔的一个选定的谐振波长,其中,所述选定的谐振波长为所述光学谐振腔的各个谐振波长中与所述待检测气体分子的吸收线中心所对应的波长之差的绝对值大于第二设定值的一个谐振波长。

3. 如权利要求1-2任一项所述的基于光学相位放大的气体检测方法,其特征在于,所述加热激光为周期性激光信号。

4. 一种基于光学相位放大的气体检测系统,其特征在于,所述气体检测系统包括:

加热激光模块,用于输出波长与待检测气体分子的吸收线中心所对应的波长之差的绝对值小于第一设定值的加热激光;

探测激光模块,用于输出波长与待检测气体分子的吸收线中心所对应的波长之差的绝对值大于第二设定值的探测激光,所述探测激光模块包括探测激光光源和波长稳定组件;

光学相位放大及检测模块,用于盛放含有待检测气体的气体样品,接收加热激光和探测激光,并对探测激光受到的光热相位调制进行放大及测量;

所述光学相位放大及检测模块包括波分复用器、环形器、第二光学耦合器以及用于盛放待检测气体并接收加热激光和探测激光的光学谐振腔,所述光学谐振腔包括微纳结构光纤和包含微纳结构光纤的气室;

所述加热激光模块的激光输出端与所述波分复用器的第一端口相连;

所述探测激光光源的激光输出端与所述环形器的第一端口相连,所述环形器的第二端口与所述波分复用器的第二端口相连;

所述环形器的第三端口与所述第二光学耦合器的输入端相连,所述第二光学耦合器的第一输出端与所述波长稳定组件的输入端相连;

所述第二光学耦合器的第二输出端与信号处理模块的输入端相连;

信号处理模块,用于解调经光学相位放大及检测模块测量的探测出射光的相位调制幅度,获取待检测气体的参数,所述探测出射光包括探测光经所述光学谐振腔反射的探测反射光和探测光经所述光学谐振腔透射的探测透射光;所述探测出射光的相位调制幅度包括探测透射光的相位调制幅度和探测反射光的相位调制幅度;

所述加热激光模块和所述探测激光模块均与所述光学相位放大及检测模块相连,所述光学相位放大及检测模块与所述信号处理模块相连。

5. 如权利要求4所述的基于光学相位放大的气体检测系统,其特征在于:

所述探测激光光源,用于输出所述探测激光;

所述波长稳定组件,用于使得探测激光光源输出的所述探测激光的波长与所述光学谐振腔的谐振波长相匹配,且使得所述探测激光光源输出的所述探测激光的波长与所述待检测气体分子的吸收线中心所对应的波长之差的绝对值大于第二设定值;

所述探测激光光源的输出端与所述光学相位放大及检测模块相连,所述波长稳定组件的输入端与所述光学相位放大及检测模块相连,所述波长稳定组件的输出端与所述探测激光光源的波长控制端相连。

6. 如权利要求4所述的基于光学相位放大的气体检测系统,其特征在于,所述光学相位放大及检测模块还包括第三光学耦合器和用于降低环境对相位检测干扰的光学相位控制组件;

所述第二光学耦合器的第二输出端与光学相位控制组件的输入端相连,所述光学相位控制组件的输出端与所述第三光学耦合器的第一输入端相连,所述光学谐振腔的输出端与所述第三光学耦合器的第二输入端相连,所述第三光学耦合器的输出端与所述信号处理模块的输入端相连。

7. 如权利要求4-6任一项所述的基于光学相位放大的气体检测系统,其特征在于,所述加热激光模块包括泵浦激光光源和与泵浦激光光源输出端相连的光学功率放大器;所述光学功率放大器的输出端与光学相位放大及检测模块的波分复用器的第一端口相连。

一种基于光学相位放大的气体检测方法和系统

技术领域

[0001] 本发明涉及气体检测领域,具体是涉及一种基于光学相位放大的气体检测方法和系统。

背景技术

[0002] 高灵敏的气体检测技术在环境污染物监测,呼吸气体疾病诊断及原子、分子物理等诸多领域有着广泛的应用。基于吸收光谱技术及其衍生技术的气体检测方法具有气体参数检测灵敏度高和气体种类选择性好等特点。根据比尔-朗伯定律,当特定波长的入射光通过待检测气体时,气体分子会吸收一部分光功率,使得透射光功率降低。根据气体分子对光功率吸收的强度和特征吸收波长可以确定气体的参数。另外一种技术是基于光吸收引起的光热效应,利用光热干涉仪来检测气体参数。当气体分子吸收入射光功率后会释放热量,改变气体温度。光热干涉仪测量气体温度变化引起的光学相位调制幅度来表征气体参数。利用光学谐振模块来增强光与气体分子之间的相互作用,提高气体检测灵敏度。

[0003] 基于空芯微纳结构光纤谐振腔增强的光吸收检测技术受限于空芯微纳结构光纤的多模传输特性,系统受模式干涉噪声影响较大,检测灵敏度不高,稳定性不好。基于空芯微纳结构光纤谐振腔理论上也可以提高光热干涉气体检测的灵敏度。该技术将探测激光波长固定在谐振腔透射谱斜率最大处,通过提高对光热相位调制的检测效率来提高气体检测灵敏度。但在谐振腔透射谱斜率最大处,探测激光的相位噪声会转换成强度噪声,增大了检测系统的整体噪声水平,系统检测灵敏度提升有限,不能满足实际应用的需求。

[0004] 综上所述,现有技术检测气体参数的灵敏度较低。

[0005] 因此,现有技术还有待改进和提高。

发明内容

[0006] 为解决上述技术问题,本发明提供了一种基于光学相位放大的气体检测方法和系统,解决了检测气体参数的灵敏度较低的问题。

[0007] 为实现上述目的,本发明采用了以下技术方案:

[0008] 第一方面,本发明提供一种基于光学相位放大的气体检测方法,其中,包括:

[0009] 将加热激光和探测激光均射入光学谐振腔,所述光学谐振腔盛放含有待检测气体的气体样品,所述加热激光的波长与所述待检测气体分子的吸收线中心所对应的波长之差的绝对值小于第一设定值,所述探测激光的波长与所述光学谐振腔的一个谐振波长相匹配,且所述探测激光的波长与所述待检测气体分子的吸收线中心所对应的波长之差的绝对值大于第二设定值,所述第二设定值大于所述第一设定值;

[0010] 获取探测光经盛放含有所述待检测气体的气体样品的所述光学谐振腔放大光热相位调制后射出的探测出射光信息;

[0011] 依据所述探测出射光信息所对应的相位调制幅度,得到所述待检测气体的参数。

[0012] 在一种实现方式中,所述探测出射光包括探测光经所述光学谐振腔反射的探测反

射光和探测光经所述光学谐振腔透射的探测透射光；所述依据所述探测出射光的相位调制幅度，得到所述待检测气体的参数，包括：

[0013] 获取数据库，所述数据库包括标定气体的参数和与所述标定气体的参数所匹配的标定激光的相位调制幅度；其中，所述标定激光与所述探测出射光对应，所述标定激光的相位调制幅度与所述探测出射光的相位调制幅度对应，所述标定气体与所述气体样品对应；其中所述标定气体指在已知气体样品物理参量的情况下，按照确定的体积分数将待测气体混合于另一种不同种类的气体所形成的均匀稳定的气体样品。

[0014] 依据所述探测出射光的相位调制幅度和与所述探测出射光的相位调制幅度对应的所述标定激光的相位调制幅度以及与所述标定激光的相位调制幅度所匹配的所述标定气体的参数，得到所述待检测气体的参数。

[0015] 在一种实现方式中，所述探测出射光的相位调制幅度包括探测透射光的相位调制幅度和探测反射光的相位调制幅度；

[0016] 所述标定激光的相位调制幅度包括与所述探测透射光的相位调制幅度所对应的标定相位调制幅度，或者所述标定激光的相位调制幅度包括与所述探测反射光的相位调制幅度所对应的标定相位调制幅度，或者所述标定激光的相位调制幅度包括由所述探测透射光的相位调制和所述探测反射光的相位调制构成的探测光相位差调制幅度所对应的标定相位差调制幅度；

[0017] 所述标定气体的参数包括与所述标定相位调制幅度所匹配的标定气体浓度和与所述标定相位差调制幅度所匹配的标定气体浓度；

[0018] 所述待检测气体的参数包括待检测气体在气体样品中的浓度；

[0019] 所述依据所述探测出射光的相位调制幅度、与所述探测出射光的相位调制幅度对应的标定激光的调制幅度以及与所述标定激光的相位调制幅度所匹配的所述标定气体的参数，得到所述待检测气体的参数，包括：

[0020] 依据所述探测透射光的相位调制幅度，获取所述探测透射光的相位调制幅度所对应的标定相位调制幅度；

[0021] 依据所述探测透射光的相位调制幅度所对应的标定相位调制幅度，得到与所述标定相位调制幅度所匹配的标定气体浓度；

[0022] 依据所述标定气体浓度，得到所述待检测气体在气体样品中的浓度；

[0023] 或者，依据所述探测反射光的相位调制幅度，得到所述探测反射光的相位所对应的标定相位调制幅度；

[0024] 依据所述探测反射光的相位调制幅度所对应的标定相位调制幅度，得到与所述标定相位调制幅度所匹配的标定气体浓度；

[0025] 依据所述标定气体浓度，得到所述待检测气体在气体样品中的浓度；

[0026] 或者，依据所述探测透射光的相位调制和所述探测反射光的相位调制，得到由所述探测透射光的相位调制和所述探测反射光的相位调制构成的探测光相位差调制幅度所对应的标定相位差调制幅度；

[0027] 依据所述标定相位差调制幅度，得到与所述标定相位差调制幅度所匹配的标定气体浓度；

[0028] 依据所述标定气体浓度，得到所述待检测气体在气体样品中的浓度。

[0029] 在一种实现方式中,所述气体检测方法还包括在气体检测过程中将探测激光的波长调谐成等于所述光学谐振腔的一个标准谐振波长,包括:

[0030] 实时控制探测激光的波长,使得探测激光的波长等于所述光学谐振腔的一个选定的谐振波长,其中,所述选定的谐振波长为所述光学谐振腔的各个谐振波长中与所述待检测气体分子的吸收线中心所对应的波长之差的绝对值大于第二设定值的一个谐振波长。

[0031] 在一种实现方式中,所述加热激光为周期性激光信号。

[0032] 第二方面,本发明实施例还提供一种基于光学相位的气体检测系统,其中,所述气体检测系统包括:

[0033] 加热激光模块,用于输出波长与待检测气体分子的吸收线中心所对应的波长之差的绝对值小于第一设定值的加热激光;

[0034] 探测激光模块,用于输出波长与待检测气体的分子吸收线中心所对应的波长之差的绝对值大于第二设定值的探测激光;

[0035] 光学相位放大及检测模块用于盛放含有待检测气体的气体样品,接收加热激光和探测激光,并对探测激光受到的光热相位调制进行放大及测量;

[0036] 信号处理模块,用于解调经光学相位放大及检测模块测量的探测出射光的相位调制幅度,获取待检测气体的参数;

[0037] 所述加热激光模块和所述探测激光模块均与所述光学相位放大及检测模块相连,所述光学相位放大及检测模块与所述信号处理模块相连。

[0038] 在一种实现方式中,所述探测激光模块包括探测激光光源和波长稳定组件;

[0039] 所述探测激光光源,用于输出所述探测激光;

[0040] 所述波长稳定组件,用于使得探测激光光源输出的所述探测激光的波长与所述光学谐振腔的一个谐振波长相匹配,且使得所述探测激光光源输出的所述探测激光的波长与所述待检测气体分子的吸收线中心所对应的波长之差的绝对值大于第二设定值;

[0041] 所述探测激光光源的输出端与所述光学谐振腔相连,所述波长稳定组件的输入端与所述光学谐振腔相连,所述波长稳定组件的输出端与所述探测激光光源的波长控制端相连。

[0042] 在一种实现方式中,所述光学相位放大及检测模块包括波分复用器、环形器、第二光学耦合器以及用于盛放待检测气体并接收加热激光和探测激光的光学谐振腔,所述光学谐振腔包括微纳结构光纤和包含微纳结构光纤的气室;

[0043] 所述加热激光模块的激光输出端与所述波分复用器的第一端口相连;

[0044] 所述探测激光光源的激光输出端与所述环形器的第一端口相连,所述环形器的第二端口与所述波分复用器的第二端口相连;

[0045] 所述环形器的第三端口与所述第二光学耦合器的输入端相连,所述第二光学耦合器的第一输出端与所述波长稳定组件的输入端相连,所述波长稳定组件的输出端与所述探测激光光源的波长控制端相连接;

[0046] 所述第二光学耦合器的第二输出端与所述信号处理模块的输入端相连。

[0047] 在一种实现方式中,所述光学相位放大及检测模块还包括第三光学耦合器和用于降低环境对相位检测干扰的光学相位控制组件;

[0048] 所述第二光学耦合器的第二输出端与光学相位控制组件的输入端相连,所述光学

相位控制组件的输出端与所述第三光学耦合器的第一输入端相连,所述光学谐振腔的输出端与所述第三光学耦合器的第二输入端相连,所述第三光学耦合器的输出端与所述信号处理模块的输入端相连。

[0049] 在一种实现方式中,所述加热激光模块包括泵浦激光光源和与泵浦激光光源输出端相连的光学功率放大器;所述光学功率放大器的输出端与所述波分复用器的第一端口相连。

[0050] 有益效果:本发明通过待检测气体分子吸收加热激光而产生热量,产生的热量能够调制探测激光的相位,相位被调制之后的探测激光从光学谐振腔内射出,对被调制之后的探测激光的相位进行分析以获取待检测气体的参数。具体过程如下:

[0051] 本发明首先将含有待检测气体的气体样品置于光学谐振腔内,然后将两束激光射入光学谐振腔。加热激光的波长与待检测气体分子的吸收线中心所对应的波长之差的绝对值小于第一设定值,即加热激光的波长靠近待检测气体的分子吸收线中心所对应的波长,以此提高待检测气体对加热激光的吸收,进而提高待检测气体产生的热效应,最终提高获取到的待检测气体参数的精准度;探测激光的波长与待检测气体分子的吸收线中心所对应的波长之差的绝对值大于第二设定值,即探测激光的波长远离待检测气体分子的吸收线中心所对应的波长,以降低待检测气体对探测激光的吸收,获取探测光形成的探测透射光和探测反射光,进而提高对待检测气体浓度检测的灵敏度。

[0052] 光学谐振腔有多个不连续的谐振波长,本发明的探测激光的波长不仅远离待检测气体分子的吸收线中心所对应的波长,且与光学谐振腔的多个谐振波长中的其中一个谐振波长相匹配以使探测激光受到的光热相位调制被放大。因此,即使气体样品中的待检测气体的体积分数非常小,由于本发明能够使得探测激光受到的相位调制进行放大,也能够很精准地获取待检测气体的浓度。

[0053] 综上所述,本发明可以有效地将微小的探测激光受到的光热相位调制进行放大,提高检测的信噪比。本发明可实现体积分数检测下限为万亿分之一量级的痕量气体参数检测,本发明对能够吸收可见光波段、近红外波段以及中红外波段的气体具有普适性。

附图说明

- [0054] 图1为本发明的系统结构图;
- [0055] 图2A和图2B为本发明的光学谐振腔的结构图;
- [0056] 图3为本发明的微纳结构光纤的横截面图;
- [0057] 图4A和图4B为本发明的将探测光波长固定在微纳结构光纤谐振腔的一个谐振波长处时,对探测反射光和探测透射光的光热相位调制进行放大的原理示意图;
- [0058] 图5A和图5B为发明的反射镜反射光谱图;
- [0059] 图6为本发明的方法测量的体积浓度为1.8ppm(1ppm=百万分之一)的甲烷气体的二次谐波信号曲线图。
- [0060] 图中标注符号的含义如下:
- [0061] 1、加热激光模块;11、泵浦激光光源;12、调制组件;
- [0062] 13、光学功率放大器;
- [0063] 2、探测激光模块;21、探测激光光源;22、波长稳定组件;

- [0064] 3、光学相位放大及检测模块；31、光学谐振腔；311、微纳结构光纤；
- [0065] 312、第一反射镜；313、第二反射镜；314、第一光学耦合器；32、波分复用器；33、光学相位控制组件；34、环形器；35、第二光学耦合器；
- [0066] 36、第三光学耦合器；
- [0067] 4、信号处理模块；41、光电探测器；42、信号检测组件。

具体实施方式

[0068] 以下结合实施例和说明书附图，对本发明中的技术方案进行清楚、完整地描述。基于本发明中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本发明保护的范围。

[0069] 高灵敏的气体检测技术在环境污染物监测，呼吸气体疾病诊断及原子、分子物理等诸多领域有着广泛的应用。基于吸收光谱技术及其衍生技术的气体检测方法具有气体参数检测灵敏度高和气体种类选择性好等特点。根据比尔-朗伯定律，当特定波长的入射光通过待检测气体时，气体分子会吸收一部分光功率，使得透射光功率降低。根据气体分子对光功率吸收的强度和特征吸收波长可以确定气体的参数。另外一种技术是基于光吸收引起的光热效应，利用光热干涉仪来检测气体参数。当气体分子吸收入射光功率后会释放热量，改变气体温度。光热干涉仪测量气体温度变化引起的光热相位调制幅度来表征气体参数。基于空芯微纳结构光纤311谐振腔，将探测激光波长固定在空芯微纳结构光纤311谐振腔透射谱斜率最大处，通过提高光热相位信号的检测效率，理论上也可以提高光热干涉气体检测的灵敏度。但在谐振腔透射谱斜率最大处，探测激光的相位噪声会转换成强度噪声，增大了检测系统的整体噪声水平，系统检测灵敏度提升有限，不能满足实际应用的需求。

[0070] 为解决上述技术问题，本发明提供了一种基于光学相位放大的气体检测方法和系统，解决了检测气体参数的灵敏度较低的问题。具体实施时，本发明通过待检测气体吸收加热激光而产生热量，产生的热量能够调制探测激光的相位，相位被调制之后的探测激光从光学相位放大及检测模块3内射出，对被调制之后的探测激光的相位调制幅度进行分析以获取待检测气体的参数。光学谐振腔31有多个不连续的谐振波长，本发明的探测激光的波长不仅远离待检测气体分子的吸收线中心所对应的波长，且与光学谐振腔31的多个谐振波长中的其中一个谐振波长相匹配以使探测激光受到的光热相位调制被放大，即使气体样品中的待检测气体的体积分数非常小，由于本发明能够使得探测激光受到的光热相位调制被放大，提高检测的信噪比，很精准地获取待检测气体的浓度。本发明可实现体积分数检测下限为万亿分之一量级的痕量气体参数检测，本发明对能够吸收可见光波段、近红外波段以及中红外波段的气体具有普适性。

[0071] 本实施例提供一种基于光学相位的气体检测系统，如图1所示，气体检测系统包括如下组成部分：

[0072] 加热激光模块1，用于输出波长与待检测气体分子的吸收线中心所对应的波长之差的绝对值小于第一设定值的加热激光；

[0073] 探测激光模块2，用于输出波长与待检测气体分子的吸收线中心所对应的波长之差的绝对值大于第二设定值的探测激光；

[0074] 光学相位放大及检测模块3，用于盛放待含有待检测气体的气体样品，接收加热激

光和探测激光，并对探测激光受到的光热相位调制进行放大及测量；

[0075] 信号处理模块4，用于解调经光学相位放大及检测模块3测量的探测出射光的相位调制幅度，获取待检测气体的参数。下面分别对其进行介绍：

[0076] 如图1所示，加热激光模块1包括调制组件12，输入端与调制组件12输出端相连的泵浦激光光源11，输入端与泵浦激光光源11输出端相连的光学功率放大器13。

[0077] 如图1所示，探测激光模块2包括探测激光光源21，输出端与探测激光光源21的波长控制端相连的波长稳定组件22。

[0078] 当光学相位放大及检测模块3使用光纤马赫-曾德干涉仪检测经放大的探测激光光热相位调制时，为了保证最大的相位调制检测效率，需要将经过由微纳结构光纤311构成的光学相位放大及检测模块3的探测反射光和探测透射光的相位直流分量差 Φ_0 稳定在+90°或-90°的相位点上。在本申请中采用光学相位控制组件33来实现。具体地，光学相位控制组件33对由探测反射光和探测透射光的相位差进行低通滤波得到探测反射光和探测透射光的相位差的直流分量 Φ ，其中低通滤波器带宽小于加热激光调制频率。光学相位控制组件33通过比较 Φ 与 Φ_0 的差别并产生相应的反馈信号来改变与沿光纤传输的通过光学相位控制组件33后探测光的相位从而改变沿光纤传输的探测透射光或者探测反射光的光学相位差的直流分量，使得 $\Phi = \Phi_0$ 。

[0079] 如图1所示，光学相位放大及检测模块3包括波分复用器32、环形器34、第二光学耦合器35、第三光学耦合器36、用于盛放包含待检测气体的气体样品并接收加热激光和探测激光的光学谐振腔31、用于降低光学相位放大及检测模块3受环境干扰的光学相位控制组件33。

[0080] 光学功率放大器13的输出端作为加热激光模块1的激光输出端与波分复用器32的第一端口相连。

[0081] 探测激光光源21的激光输出端与环形器34的第一端口相连，环形器34的第二端口与波分复用器32的第二端口相连。

[0082] 环形器34的第三端口与第二光学耦合器35的输入端相连，第二光学耦合器35的第一输出端与波长稳定组件22的输入端相连，波长稳定组件22的输出端与探测激光光源21的波长控制端相连接。

[0083] 第二光学耦合器35的第二输出端与光学相位控制组件33的输入端相连，光学相位控制组件33的输出端与第三光学耦合器36的第一输入端相连，光学谐振腔31的输出端与第三光学耦合器36的第二输入端相连。

[0084] 如图2A所示，光学谐振腔31包括沿光路方向依次设置的第一反射镜312、微纳结构光纤311和第二反射镜313。

[0085] 或者如图2B所示，光学谐振腔31包括微纳结构光纤311和第一光学耦合器314，微纳结构光纤311和第一光学耦合器314形成闭合光路结构。

[0086] 本实施例的微纳结构光纤311在探测光波长与泵浦激光波长具有低传输损耗；微纳结构光纤311可以是基于光倏逝场与气体相互作用的实心的微纳结构光纤311，如D型光纤，实心光子晶体光纤，微纳光纤和悬挂芯光纤等中的任意一种；或者是基于光导模与气体相互作用的空芯的微纳结构光纤311，如空芯毛细管，空芯光子晶体带隙光纤，反谐振空芯光纤，Kagome光纤等中的任意一种。

[0087] 在本实施例中，微纳结构光纤311为如图3所示的反谐振空芯光纤，图3是本实施例提供的一种典型的基于反谐振原理的微纳结构空芯光纤的截面示意图。其中，反谐振空芯光纤的组成材料为二氧化硅，由若干个毛细管均匀环绕排列。图3的反谐振空芯光纤的毛细管的直径为十几微米、管壁厚度约为几百纳米；反谐振空芯光纤的纤芯，其内切圆直径为几十微米。反谐振空芯光纤具有很宽的低损耗光谱传输窗口。可以根据实际检测气体所具有的本征吸收波长，选择具有合适传输窗口的反谐振光纤。在本实施例中使用的反谐振空芯光纤在对波长为1500nm-1700nm的激光具有低损耗传输窗口。

[0088] 本实施例的光学谐振腔31为由微纳结构光纤311构成的谐振腔，可由微纳结构光纤311与反射镜构成线性谐振腔，或由微纳结构光纤311与光学耦合器构成环形谐振腔。图2A和图2B是本实施例提供的光学谐振腔31的结构示意图。

[0089] 反射镜在探测光波长处具有高反射率，如图5A所示反射镜在泵浦光波长处具有低反射率；如图5B所示，反射镜同时在探测光波长和泵浦光波长处具有高反射率。

[0090] 在本实施例中，选用的是如图2A所示的由反射镜与微纳结构光纤311构成的线性谐振腔。如图5A所示，反射镜在探测光波长($\lambda_{\text{探测}}=1550\text{nm}$)处具有高反射率，在泵浦光波长($\lambda_{\text{泵浦}}=1653\text{nm}$)处具有低反射率。

[0091] 如图1所示，信号处理模块4包括输入端与第三光学耦合器36的输出端相连的光电探测器41，输入端与光电探测器41的输出端相连的信号检测组件42。

[0092] 本实施例以甲烷气体作为待检测气体说明本实施例的气体检测系统的工作过程：

[0093] 加热激光模块1输出的泵浦激光经波分复用器32进入到光学谐振腔31内，光学谐振腔31内含有待检测气体甲烷的气体样品，甲烷吸收泵浦激光而产生热量，探测激光光源21输出的探测激光也进入到光学谐振腔31内，探测激光被加热之后的气体样品进行光热相位调制并反射出光学谐振腔31，此时并不针对被反射的探测激光进行甲烷浓度的测量，而是将反射的探测激光经环形器34和第二光学耦合器35输入到波长稳定组件22，波长稳定组件22判断反射的探测激光是否与光学谐振腔31的一个选定的谐振波长匹配，且探测光波长与所述待检测气体分子的吸收线中心所对应的波长之差的绝对值大于第二设定值。如果不匹配，则通过波长稳定组件22调整探测激光光源21输出的探测激光的波长，直至由探测激光波长与光学谐振腔31的选定的谐振波长匹配，且探测光波长与所述待检测气体分子的吸收线中心所对应的波长之差的绝对值大于第二设定值，再依据反射探测光和透射探测光的相位进行甲烷浓度的测量。

[0094] 第二光学耦合器35将光学谐振腔31反射的探测反射光分成两路，一路探测反射光进入到波长稳定组件22用于调整探测激光光源21输出的探测激光的波长，使其和光学谐振腔的选定的谐振波长对准；另一路探测反射光经光学相位控制组件33和第三光学耦合器36进入到信号处理模块4中。

[0095] 探测激光光源21输出的探测激光也有一部分穿过光学谐振腔31内的含有待测甲烷的气体样品，形成探测透射光，探测透射光也进入到信号处理模块4中。信号处理模块4根据探测透射光和探测反射光以及含有气体浓度与气体浓度相匹配的相位差调制幅度的数据库，得到甲烷气体的浓度。

[0096] 本实施例还提供一种基于光学相位放大的气体检测方法，包括：

[0097] S100，将加热激光和探测激光均射向盛放含有待检测气体的气体样品的光学谐振

腔31；

[0098] 所述加热激光的波长与所述待检测气体分子的吸收线中心所对应的波长之差的绝对值小于第一设定值，即加热激光的波长等于或靠近待检测气体分子的吸收线中心所对应的波长；所述探测激光的波长与所述待检测气体分子的吸收线中心所对应的波长之差的绝对值大于第二设定值，即探测激光的波长远离待检测气体分子的吸收线中心所对应的波长；且所述探测激光的波长与所述光学谐振腔31的一个谐振波长相匹配。

[0099] 本实施例中，探测激光的波长等于光学谐振腔31的一个谐振波长，且该谐振波长与所述待检测气体分子的吸收线中心所对应的波长之差的绝对值大于第二设定值。光学谐振腔31有多个谐振波长，有的谐振波长靠近待检测气体分子的吸收线中心所对应的波长，有的远离待检测气体分子的吸收线中心所对应的波长。本实施例的探测激光的波长等于光学谐振腔31的一个谐振波长而且远离待检测气体分子的吸收线中心。

[0100] 举例说明，某种气体分子吸收线中心所对应的波长为1650nm，光学谐振腔31存在多个谐振波长，假设其中五个谐振波长为：1500nm、1550nm、1600nm、1650nm、1700nm，本实施例选择的探测激光的波长1550nm，这样使得探测激光的波长不仅远离待检测气体分子的吸收线中心所对应的波长，而且也与谐振波长中的其中一个波长相等，能够最大程度的提高检测的灵敏度。

[0101] 本实施例中的，加热激光为周期性泵浦激光，若泵浦激光为连续激光，则泵浦激光在输入微纳结构光纤311之前经过周期性调制；其中，周期性调制为强度调制，或波长调制。

[0102] 以甲烷气体为例，泵浦波长可选 $\lambda_{\text{泵浦}} = 1653\text{nm}$ ，对应一个甲烷气体吸收线的中心。泵浦激光波长以13kHz进行波长调制。经周期性调制的泵浦激光耦合进微纳结构光纤311后，与待测气体分子相互作用，产生光热相位调制。探测光由另一探测激光发出，光波波长可以选择在1550nm附近，用来探测泵浦光与气体分子相互作用产生的光热相位调制。将探测光波长固定在微纳结构光纤311构成的谐振腔的谐振波长上，经过谐振腔的反射探测光和透射探测光分别在谐振波长相消干涉和相长干涉，放大反射探测光和透射探测光的光热相位调制。进一步地，利用光纤马赫-曾德干涉仪可以测量出经放大的反射探测光和透射探测光的相位差。

[0103] 举例说明，泵浦激光（加热激光）波长调谐至待检测气体分子吸收线中心附近。经周期性调制的泵浦激光被待检测气体分子吸收，一部分光能被转化成热能，使包含检测气体的气体样品温度发生变化，改变气体样品折射率，从而调制探测激光的相位。因此通过探测经过包含待检测气体的气体样品的探测激光的相位调制可以获取待检测气体的浓度。

[0104] S200，测量探测激光被所述盛放包含待检测气体的气体样品的光学谐振腔31腔射出的探测出射光；

[0105] 本实施例中，光学谐振腔31射出的探测出射光包括探测透射光和探测反射光，通过测量探测透射光和探测反射光可以获取待检测气体的浓度，原理如下：

[0106] 微纳结构光纤311在基模传输时，泵浦激光光强沿光纤横截面方向近似呈高斯分布。由待检测气体分子对泵浦激光吸收而产生的热量分布可以表示为：

$$Q(r) = \alpha C P_{\text{pump}} / \pi w_{\text{pump}}^2 \exp(-r^2/w_{\text{pump}}^2), \text{ 其中 } P_{\text{pump}} \text{ 泵浦激光总功率},$$

w_{pump} 为微纳结构光纤311内泵浦激光模场半径， α 为待检测气体浓度为100%时对应的峰值

吸收系数,C为待检测气体的浓度。对应的,由于光热效应所引起的微纳结构光纤311内的温度场变化T可由热传导方程得到:

[0107] $\rho C_p \partial T / \partial t = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q$ 。其中, ρ 为包含待检测气体的气体样品的密度, C_p 为包含待检测气体的气体样品的比热, k 为包含待检测气体的气体样品热导率。由于 Q 与 C 成正比, 因此, 由此引发的 T 也与 C 成正比。

[0108] 然后, 可以通过克劳修斯-莫索提方程获得待检测气体由于气体温度变化引起的折射率变化 Δn

$$[0109] \Delta n = - (n_0 - 1) \Delta T / T_{abs} = - (n_0 - 1) [T - T_{abs}] / T_{abs}$$

[0110] 其中, n_0 为常温常压条件下的气体的折射率, T_{abs} 为环境温度, 也即是包含待检测气体的气体样品的初始温度。由于 T 与 C 成正比, 因此, Δn 也与 C 成正比。

[0111] 由气体折射率改变引起的由微纳结构光纤311构成的谐振腔内的探测激光往返一次相位变化为 $\Delta \phi_0$:

$$[0112] \Delta \phi_0 = 4\pi \Delta n L / \lambda_{\text{探测}}$$

[0113] 其中 $\lambda_{\text{探测}}$ 是探测激光波长, L 是微纳结构光纤311的长度。

[0114] 经过微纳结构光纤311构成的光学谐振腔31的探测反射光和探测透射光分别在光学谐振腔31的谐振波长处发生相消干涉和相长干涉, 探测透射光相位 $\Delta \phi_t$ 与探测反射光相位 $\Delta \phi_r$ 随 $\Delta \phi_0$ 的变化产生剧烈变化, 起到相位放大作用, 其放大倍数为:

$$[0115] k_r = F t_1^2 / (r_1 - r_2) \pi$$

$$[0116] k_t = 2F / \pi$$

[0117] 其中 F 是光学谐振腔31的精细度, t_1 是第一反射镜312的透射系数, r_1 和 r_2 分别是第一反射镜312和第二反射镜313的反射系数。经放大后的探测反射光和探测投射光相位调制幅度分别为:

$$[0118] \Delta \phi_r = k_r \Delta \phi_0$$

$$[0119] \Delta \phi_t = k_t \Delta \phi_0$$

[0120] 图4A和图4B为本发明的将探测光波长固定在微纳结构光纤谐振腔31的一个谐振波长处时, 探测反射光和探测透射光相位调制放大的原理示意图。

[0121] S300, 依据所述探测出射光的相位信息, 得到所述待检测气体的参数。

[0122] 本实施例, 待检测气体的参数为待检测气体在包含待测气体的气体样品中的体积分数。包括如下步骤:

[0123] S301, 获取数据库, 所述数据库包括标定气体的参数和与所述标定气体的参数所匹配的标定激光的相位调制幅度; 其中, 所述标定激光与所述探测出射光对应, 所述标定激光的相位调制幅度与所述探测出射光的相位调制幅度对应, 所述标定气体与包含所述待检测气体的气体样品对应;

[0124] S302, 依据所述探测出射光的相位调制幅度和与所述探测出射光的相位调制幅度对应的标定激光的相位调制幅度以及与所述标定激光的相位调制幅度所匹配的所述标定气体的参数, 得到所述待检测气体的参数。

[0125] 本实施例中, 所述探测出射光的相位调制幅度包括探测透射光的相位调制幅度和探测反射光的相位调制幅度; 所述标定激光的相位调制幅度包括由所述探测透射光的相位

调制和所述探测反射光的相位调制构成的探测光相位差调制幅度所对应的标定相位差调制幅度；所述标定气体的参数包括与所述标定相位差调制幅度所匹配的标定气体浓度，步骤S302的具体步骤如下：

[0126] 步骤S3021，依据所述探测透射光的相位调制和所述探测反射光的相位调制，得到由所述探测透射光的相位调制和所述探测反射光的相位调制构成的探测光相位差调制幅度。

[0127] 本实施例中，利用探测光源发出的探测光与探测反射光，或探测透射光分别进行干涉来测量经过光热相位调制放大的探测反射光相位调制 $\Delta \varphi_r$ 和探测透射光相位调制 $\Delta \varphi_t$ 。或，利用探测反射光和探测透射光进行干涉来测量经过光热相位调制放大的探测反射光和探测透射光的相位差 $\Delta \varphi_r - \Delta \varphi_t$ 。

[0128] 步骤S3022，依据所述探测光相位差调制幅度，获取数据库中与所述相位差调制幅度所对应的所述标定相位差调制幅度。

[0129] 步骤S3023，依据所述标定相位差调制幅度，得到与所述标定相位差调制幅度所匹配的标定气体浓度；

[0130] 步骤S3024，依据所述标定气体浓度，得到所述待检测气体浓度。

[0131] 本实施例以下面的例子说明本发明的有益效果：

[0132] 为甲烷气体的测量，首先将甲烷混合于纯氮气中获得体积分数为1.8ppm的甲烷气体样品；气体样品通过自然扩散的方式填充到微纳结构光纤311中；泵浦激光波长选在1653nm。泵浦激光采用波长调制的方式，调制频率为13kHz。信号处理模块4中的检测甲烷气体光热引起的探测光相位调制的二次谐波信号。信号处理模块4时间常数设置为1s，信号处理模块4滤波器斜率设为18dB/oct，通过在甲烷吸收峰附近周期性扫描泵浦光波长，获得的二次谐波信号如图6所示。将微纳结构光纤311气室填充纯氮气，固定泵浦光波长在甲烷吸收线中心，通过测量二次谐波信号随时间变化得到的噪声值。当泵浦激光进入10cm长的反谐振空芯的微纳结构光纤311功率为100mW时，通过计算二次谐波信号的峰值和噪声获得的信噪比为14912，对应体积分数为0.12ppb的甲烷检测灵敏度。使用更长的时间常数进行平均处理，检测系统对甲烷的检测灵敏度可以达到1ppt (1ppt = 万亿分之一)量级。上述测量装置有效地解决了现有光纤气体传感系统中响应时间长，灵敏度不够高的问题。

[0133] 最后应说明的是：以上实施例仅用以说明本发明的技术方案，而非对其限制；尽管参照前述实施例对本发明进行了详细的说明，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发明各实施例技术方案的精神和范围。

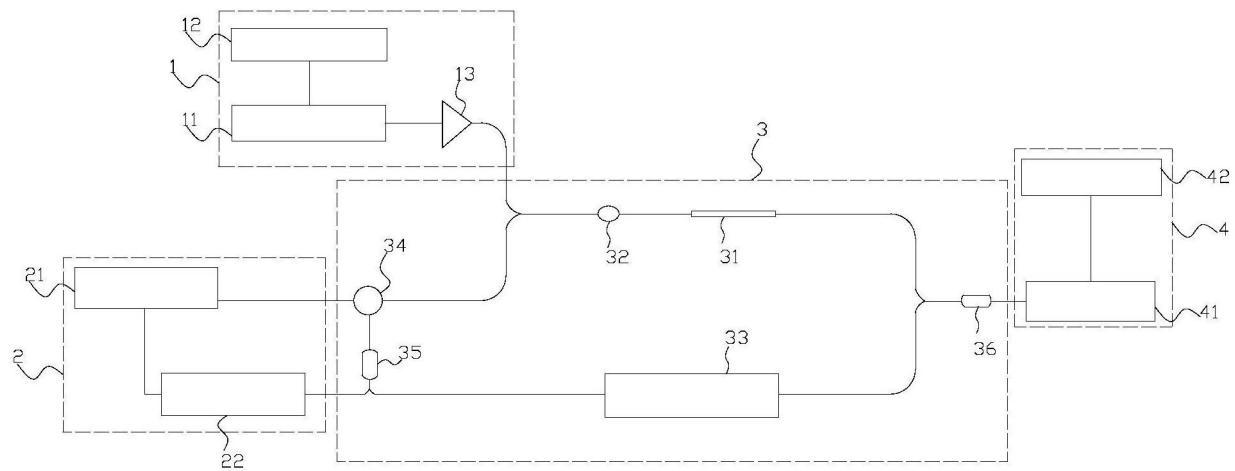


图1

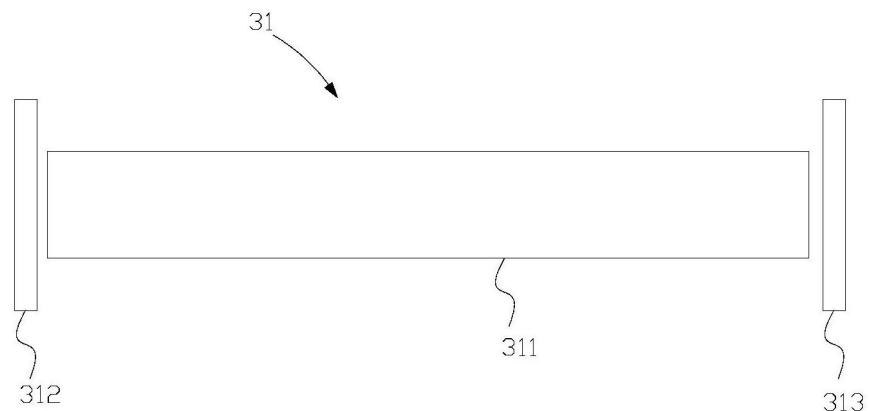


图2A

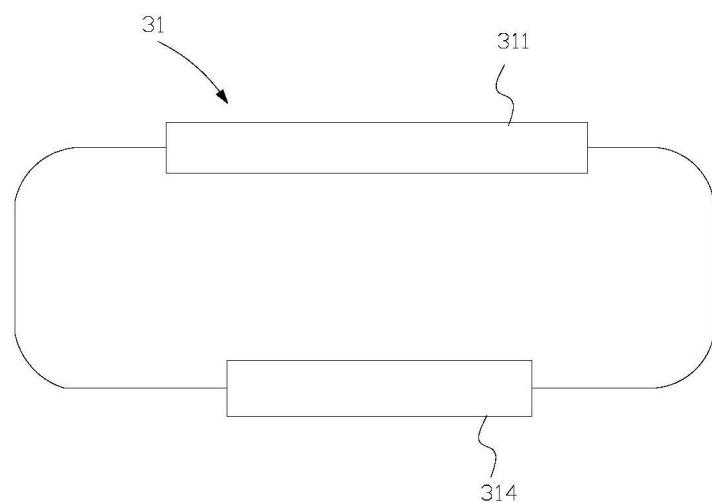


图2B

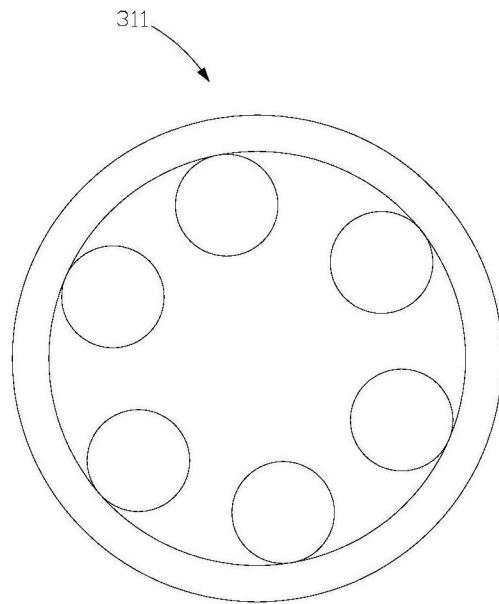


图3

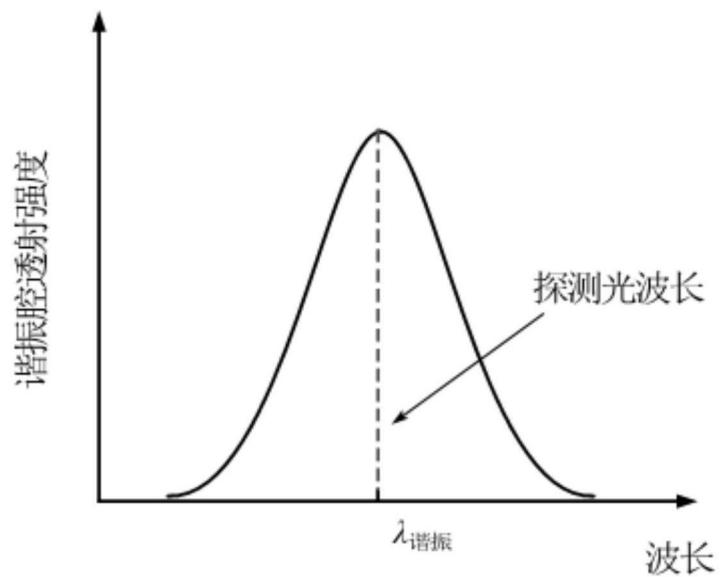


图4A

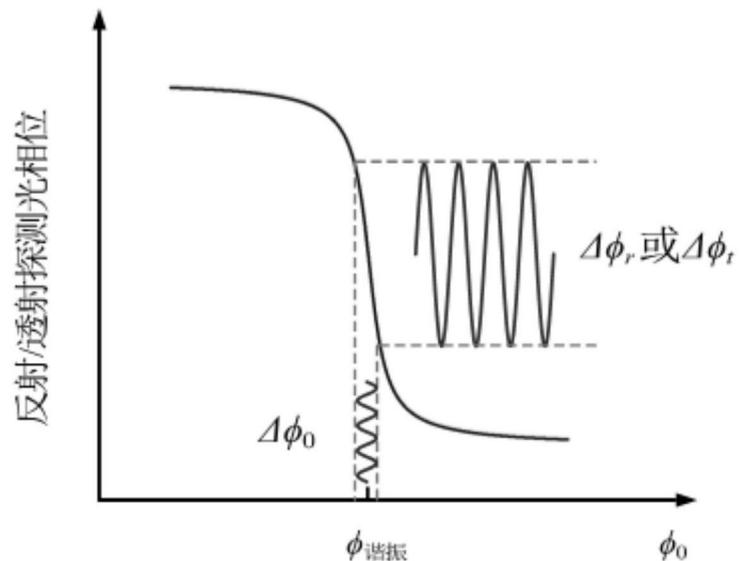


图4B

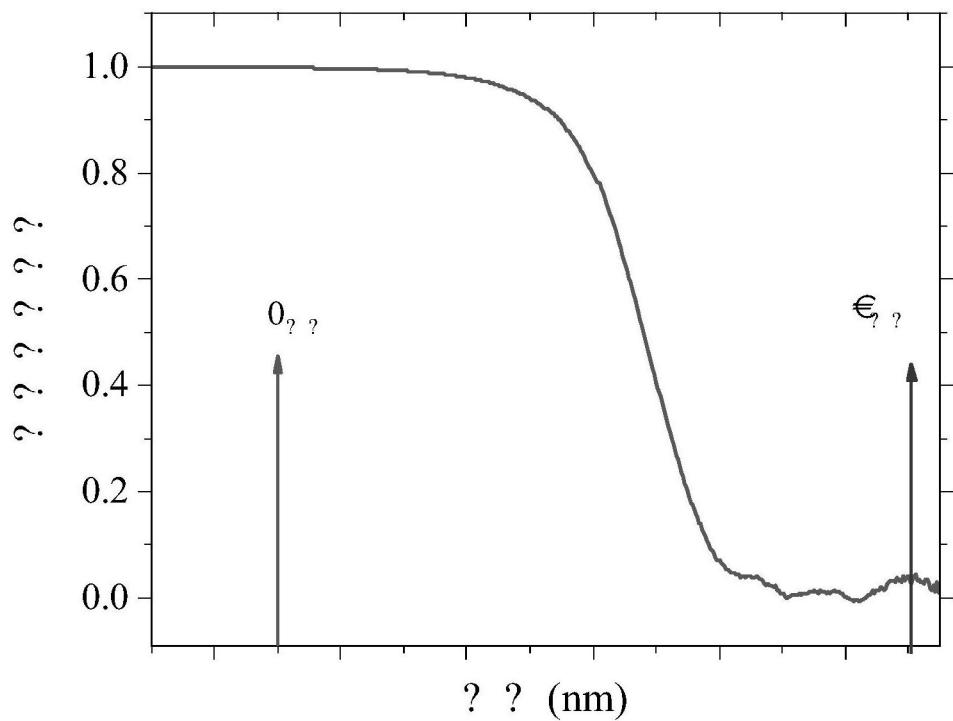


图5A

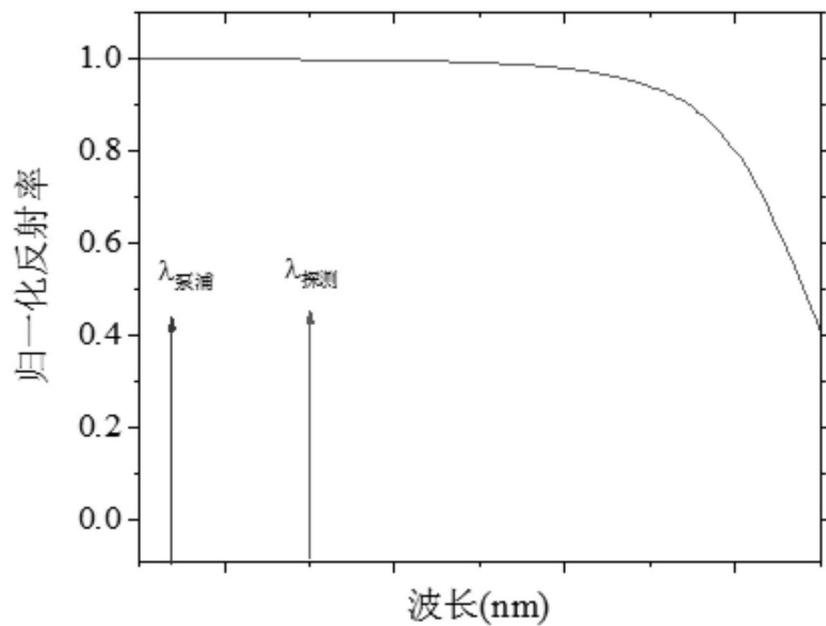


图5B

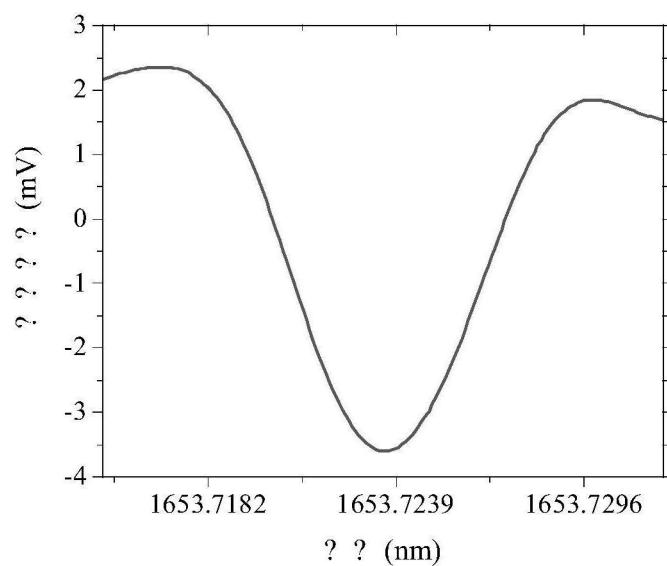


图6