

光学学报

基于反谐振空芯光纤的甲烷气体检测

斯贝贝^{1,2}, 刘家祥¹, 司赶上^{1,2}, 李振钢^{1,2}, 宁志强^{1,2}, 方勇华^{1,2*}

¹中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 介绍了一种基于反谐振空芯光纤的甲烷气体检测装置,该装置选用中心波长为 1653 nm 的分布式反馈激光器结合 1.8 m 长的反谐振空芯光纤,采用可调谐二极管激光吸收光谱与波长调制光谱相结合的技术对甲烷气体进行实时测量。利用陶瓷插芯和陶瓷套管光纤耦合器件实现空芯光纤与单模光纤的稳定对接耦合,搭建了无透镜式全光纤气体检测装置,并对不同浓度梯度的甲烷气体展开实验。结果表明,二次谐波信号峰峰值与气体浓度之间呈良好的线性关系,线性相关系数为 $R^2=0.997$ 。由波长调制技术反演得到的甲烷气体的体积分数精度为 0.918×10^{-6} ,相对精度为 1.3%。通过 Allan 方差评估系统的稳定性,当平均时间为 66.8 s 时,装置的最低探测灵敏度为 13×10^{-9} 。

关键词 光纤光学; 光谱学; 反谐振空芯光纤; 波长调制; 气体传感

中图分类号 O433

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1906003

Methane Gas Detection Based on Anti-Resonant Hollow-Core Fiber

Si Beibei^{1,2}, Liu Jiexiang¹, Si Ganshang^{1,2}, Li Zhengang^{1,2}, Ning Zhiqiang^{1,2}, Fang Yonghua^{1,2*}

¹Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China

Abstract A methane gas detection device based on anti-resonant hollow-core fibers is presented. A distributed feedback laser with a center wavelength of 1653 nm is combined with anti-resonant hollow-core fibers with a length of 1.8 m. The methane gas is detected in real time with a technique integrating tunable diode laser absorption spectroscopy with wavelength-modulation spectroscopy. A fiber coupling device of a ceramic ferrule and a ceramic sleeve is used to achieve stable butt-coupling between hollow-core fibers and single-mode fibers. Then, a lensless all-fiber gas detection device is built, and experiments are carried out on methane gas with different concentration gradients. The results show that there is a good linear relationship between the peak-to-peak value of the second harmonic signal and the gas concentration, and the linear correlation coefficient is $R^2=0.997$. The accuracy of the volume fraction of the methane gas obtained by the wavelength modulation technique through inversion is 0.918×10^{-6} , and the relative accuracy is 1.3%. The stability of the system is evaluated by the Allan variance, and the lowest detection sensitivity of the device is 13×10^{-9} when the averaging time is 66.8 s.

Key words fiber optics; spectroscopy; anti-resonant hollow-core fiber; wavelength modulation; gas sensing

1 引言

可调谐二极管激光吸收光谱技术具有选择性强、灵敏度高和响应速度快等优点,常被用于痕量气体的在线检测^[1]。在激光吸收光谱检测系统中气室的有效吸收光程是决定系统检测灵敏度的关键参数之一^[2]。根据光在气室中传播的路径不同,传统气室分为单光程池和长光程池^[3]。单光程池一般由一对光纤准直器

构成,但准直距离(一般为 50 cm)有限使得气体的有效吸收光程较短,并且单光程池通常体积较大,不利于小型化集成。长光程池是通过不同类型的多通池来实现的^[4-6],相关的多通池包括怀特池、赫里奥特池和直角棱镜池。虽然这些多通池通过特殊的光路结构使得光在气室内多次反射从而增加了气体吸收的有效长度,但是这些多通池结构复杂、调试困难且易发生机械漂移,进而会显著影响仪器的稳定性。

收稿日期: 2022-02-21; 修回日期: 2022-03-22; 录用日期: 2022-04-01

通信作者: *yhfang@aiofm.ac.cn

目前,空芯光纤的兴起,吸引了越来越多的学者将其作为多通池的替代品。相比传统气室,空芯光纤气室去除了传统气室中的光学准直器或高反射镜等光学器件,不仅有助于降低光路噪声,还具有体积小、质量轻、易缠绕和易延长气体有效吸收路径等显著优点。Blake等^[7]利用中空波导搭建了红外激光传输装置,实现了中红外波段的气体探测。Li等^[8]将与文献^[7]中相似类型的光纤用于氧化亚氮传感中。然而,这种类型的光纤在光传输时会导致光学条纹的出现,这些条纹很可能是由高阶空间模的干涉引起的,这种现象严重降低了大多数光谱系统的性能。光子带隙空芯光纤是另一种可用于气体检测的空芯光纤。Hoo等^[9]利用该光纤搭建了实验装置,并记录下了乙炔的吸收光谱。然而,光子带隙空芯光纤有两个缺点:1)所记录的光谱中通常存在强条纹;2)光子带隙空芯光纤中的纤芯相对较小,这会导致气体扩散时间很长。Jin等^[10]利用光热干涉技术来避免光学条纹问题,在一定程度上抑制了这些不需要的背景信号。崔俊红等^[11]在乙炔的气体传感实验中,将40 cm长的光纤填充满气体样品需要6 min。近年来,反谐振空芯光纤(AR-HCF)凭借着损耗低、传输带宽广、光学条纹的振幅小^[12]和芯径大等优点获得了科学家们的青睐。姜寿林等^[13]基于光热干涉光谱法采用反谐振空芯光纤开展了关于CO₂高灵敏度检测技术的研究,与已报道的基于其他类别空芯光纤的CO₂气体检测相比,其灵敏度高了两个量级。Zhao等^[14]基于光声光谱技术,以反谐振空芯光纤作为气室,实现了乙炔气体10⁻⁶量级的探测。

为了进一步开展反谐振空芯光纤在气体检测领域中的应用,本文基于反谐振空芯光纤和可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)与波长调制光谱(WMS)相结合的技术(TDLAS-WMS)开展了甲烷气体检测研究。选用中心波长为1653 nm的半导体分布式反馈(DFB)激光器作为光源,利用长度为180 cm的反谐振空芯光纤作为气室和导光介质,对不同浓度的甲烷气体进行探测。所提系统优点在于结构简单,没有使用任何透镜组合,机械稳定性强。

2 理论基础

2.1 朗伯-比尔定律

基于气体分子学光谱基础,由于能级量子化的分布,因此分子只对特定频率的光具有吸收作用。当激光器发出特定频率的激光被待测气体吸收时,光强会衰减。光强的衰减程度与气体浓度成正比,且遵循朗伯-比尔定律,相关表达式为

$$I_1 = I_0 \exp[-\alpha(\lambda)CL], \quad (1)$$

式中: I_1 为经过气体吸收后的出射光强; I_0 为激光器输出的初始光强; $\alpha(\lambda)$ 为波长 λ 处的吸收系数; C 为待测气体的浓度; L 为有效吸收光程。因此,在理想情况下,当外界条件恒定且入射光强一定时,利用光电探测器检测处的激光器出射光强的变化即可反演出气体的浓度。

2.2 TDLAS技术原理

在可调谐二极管激光吸收光谱技术中,有两种方法在气体检测领域中得到了广泛应用。一是利用直接吸收光谱法来检测气体浓度,二是利用波长调制法来检测气体浓度。波长调制技术常用于痕量气体的检测,该方法大大降低了噪声,并提高了检测装置的信噪比和最低检测限^[15]。波长调制法利用可调谐半导体激光器的窄线宽和波长随注入电流改变的特性,通过改变电流的方式来改变激光器的波长,使激光器的波长扫描过被测气体分子的吸收峰。调制后的激光被待测气体分子吸收,基于朗伯-比尔定律,根据吸收量实现对气体分子浓度的测量。

在将信号发生器产生的低频锯齿波作为扫描信号与作为调制信号的高频正弦波进行叠加后,输出光强和波长^[16]分别为

$$I(t) = I_0(t)[1 + u(t) + n \sin(\omega t)], \quad (2)$$

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \lambda_m \sin(\omega t), \quad (3)$$

式中: $u(t)$ 为低频锯齿波信号; n 为调制系数; λ_0 为锯齿波对应的激光器的中心波长; λ_m 为波长的调制幅度; ω 为角频率; t 为时间。根据朗伯-比尔定律,气体的吸收光强为

$$I'(t) = I_0(t)[1 + u(t) + n \sin(\omega t)] \times \exp\{-\alpha[\lambda(t)]LC\}. \quad (4)$$

由于气体的吸收系数很小,一般满足 $\alpha[\lambda(t)]LC \ll 1$,故式(4)可改写成

$$I'(t) = I_0(t)[1 + u(t) + n \sin(\omega t)] - I_0(t)\alpha[\lambda(t)]LC - I_0(t)[u(t) + n \sin(\omega t)]\alpha[\lambda(t)]LC, \quad (5)$$

用洛伦兹线性函数表示气体的吸收系数,即

$$\alpha(\lambda) = \frac{\alpha_0}{1 + \left(\frac{\lambda - \lambda_v}{\Delta\lambda}\right)^2}, \quad (6)$$

式中: α_0 为待测气体吸收谱线中心波长处的吸收系数; λ_v 为待测气体吸收谱线的中心波长; $\Delta\lambda$ 为待测气体吸收谱线的半峰全宽。此时,式(5)可变为

$$I'(t) = I_0(t)[1 + u(t) + n \sin(\omega t)] - \frac{I_0(t)\alpha_0 LC}{1 + \left[\frac{\lambda_0 + \lambda_m \sin(\omega t) - \lambda_v}{\Delta\lambda}\right]^2}. \quad (7)$$

当光源的中心波长 λ_0 与气体的吸收波长 λ_v 相等时,对式(7)进行傅里叶级数展开可得到二次谐波信号的幅值,即

$$I_{2f} = -kI_0\alpha_0 LC, \quad (8)$$

式中: k 是关于 λ_m 和 $\Delta\lambda$ 的函数; f 为正弦波的频率。

由式(8)可以看出,二次谐波信号的幅值与气体浓度相关,进而可通过测量二次谐波信号的幅值来反演气体浓度。

2.3 反谐振空芯光纤

反谐振空芯光纤是近年来新研发的一种微纳结构光纤^[17],可以利用平面波导中的反谐振光波导(ARROW)理论模型来阐述反谐振空芯光纤的导光机理。该模型将反谐振空芯光纤当作由一系列高低折射率薄层叠加组成的阵列,每个高低折射率薄层均可以当作一个法布里-珀罗(F-P)谐振腔^[18],如图1所示,其中 T 为透过率。F-P腔的谐振波长为

$$\lambda_{\text{res}} = \frac{2n_1d}{m} \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - 1}, \quad (9)$$

式中: n_1 为低折射率薄层的折射率; n_2 为高折射率薄层的折射率; d 为高折射率薄层的厚度; m 为谐振阶数。

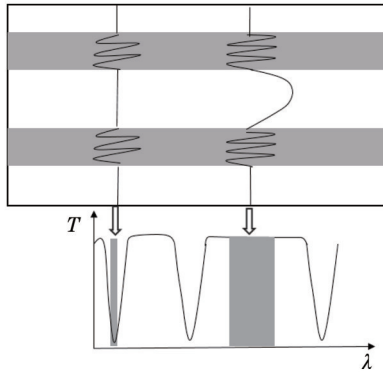


图1 ARROW模型原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ARROW model

当反谐振空芯光纤中传输光的波长满足式(9)所描述的谐振条件时,光纤对光的约束作用变弱,纤芯的光可迅速透过包层逃逸至外界,这会导致光纤的传输损耗变大。反之,当光波长不满足式(9)所描述的谐振条件时,光纤对光的约束作用变强,使光沿着纤芯传播,此时光纤的传输损耗会变得很小。

3 实验装置与结果分析

3.1 气体吸收谱线选择

甲烷在 $3.31 \mu\text{m}$ 的中红外区域中有很强的吸收,但在该区域中开发光纤传感系统是相当困难的^[19]。近红外分布反馈激光器开发工艺成熟,成本较低,且甲烷在近红外区域中也有较强的吸收,故本文选择近红外

分布反馈激光器作为气体检测装置的光源。基于HITRAN2012数据库,在体积分数为 1000×10^{-6} ,压强为 $1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$,温度为 296 K ,光程为 1 cm 的条件下,绘制甲烷在 $1649 \sim 1659 \text{ nm}$ 波长范围内的吸收谱线,如图2所示。本文选用的分布反馈激光器的中心波长为 1653 nm ,合理设置激光器的调制参数,即可很好地吻合甲烷的吸收谱线。

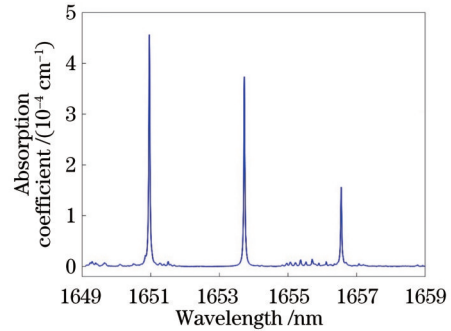


图2 甲烷的吸收谱线

Fig. 2 Absorption spectrum of methane

3.2 光纤的选择

实验中使用的反谐振空芯光纤是由高纯度的熔融石英玻璃(Suprasil F300)^[20]制成的,并使用常用的堆叠拉拔技术进行制备。该光纤的工作波长为 $670 \sim 1720 \text{ nm}$,在 1653 nm 波长处,衰减损耗为 0.6 dB/m ,弯曲半径为 10 cm ,在大于该弯曲半径时,光纤几乎无弯曲损耗。该光纤的包层直径为 $155 \mu\text{m}$,毛细管外径为 $16 \mu\text{m}$,毛细管壁厚为 600 nm ,芯径为 $26 \mu\text{m}$ 。光纤截面的扫描电子显微图如图3(a)所示,光纤波长与损耗的关系图如图3(b)所示。

3.3 光纤耦合装置

在空芯光纤气室中,反谐振空芯光纤与普通单模光纤(SMF)之间的耦合装置是引导光与气体进入反谐振空芯光纤的核心部件。本文采用机械耦合的对准方式^[21-22],设计了如图4所示的耦合装置。单模光纤与反谐振空芯光纤跳线的接头用相同外径的陶瓷插芯固定夹持,用陶瓷开口套管连接两个陶瓷插芯,调整合适的间距,并用紫外(UV)胶进行加固,以保证气密性。与精密的位移调节装置相比,这种简单

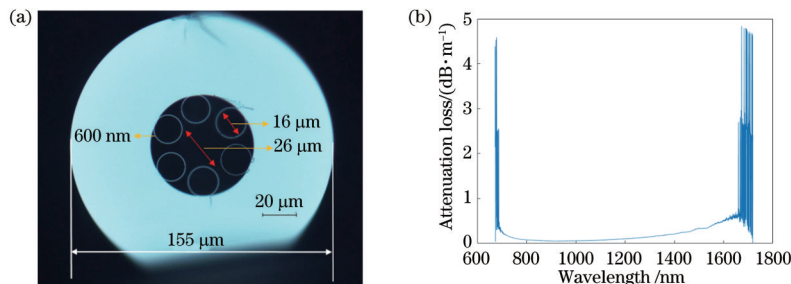


图3 光纤截面图和光纤波长与损耗关系图。(a)光纤截面图;(b)光纤波长与损耗关系图

Fig. 3 Fiber cross section and relationship between fiber wavelength and loss. (a) Fiber cross section; (b) relationship between fiber wavelength and loss

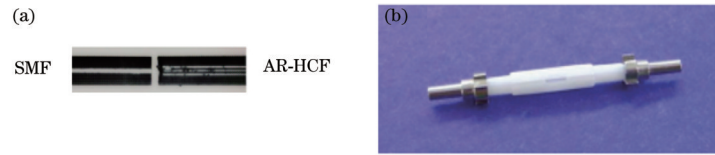


图 4 光纤耦合装置。(a)示意图;(b)实物图

Fig. 4 Fiber coupling device. (a) Schematic diagram; (b) physical diagram

的连接结构不仅实现了普通光纤与反谐振空心光纤之间稳定的耦合,还具有设计简洁和成本低廉的优点。在实验中,利用该耦合装置实现了 43.4% 的耦合效率。

3.4 检测装置搭建

为了实现甲烷气体的测量,搭建了基于反谐振空芯光纤的气体检测装置。图 5 为甲烷气体检测装置结构示意图,该装置的光源采用中心波长为 1653 nm 的分布式反馈激光器。为了实现波长调制,利用信号发生器的两个通道产生正弦波与锯齿波,将其叠加后通

入激光器的波长调制接口中。气体池模块主要由 1.8 m 长的反谐振空芯光纤构成,调制后的激光通过单模光纤输出,然后经光纤耦合装置进入到气体池内。光纤耦合装置密封在气室 1 内,气体经气室 1 流入,从气室 2 流出。空芯光纤的整体盘绕在半径为 12 cm 的圆盘上,结构紧凑。信号检测模块主要由光电探测器 (PD) 和锁相放大器构成。光电探测器将检测到的光强信号转换成电信号,电信号经锁相放大器解调后,利用上位机的数据采集卡 (DAQ) 采集二次谐波信号并通过程序反演甲烷气体浓度。

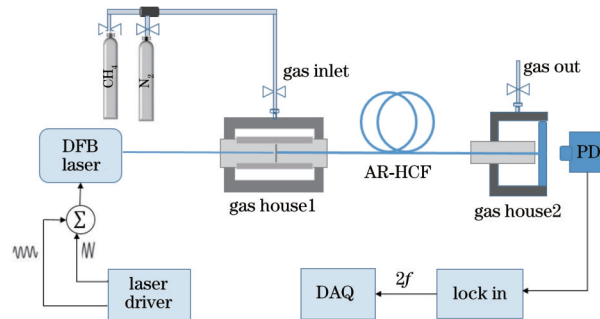


图 5 检测装置结构示意图

Fig. 5 Structural diagram of detection device

3.5 二次谐波信号

为实现波长调制,通过信号发生器产生幅值为 215 mV、频率为 10 kHz 的正弦波和幅值为 125 mV、频率为 5 Hz 的锯齿波,并将两路信号叠加后通入激光器波长调制接口中。将激光器的温度设置为 35 °C,通入体积分数为 130×10^{-6} 的甲烷气体,通过数据采集卡采样并记录下数据,设置采样频率为 100 kHz。二次谐波信号如图 6 所示。

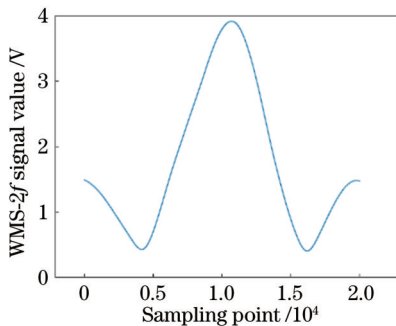


图 6 二次谐波信号

Fig. 6 Second harmonic signal

3.6 检测装置浓度标定

由 2.2 节可知,二次谐波信号的峰峰值与气体浓

度成正比,通过动态配气仪配置体积分数分别为 50×10^{-6} 、 70×10^{-6} 、 90×10^{-6} 、 110×10^{-6} 和 130×10^{-6} 的甲烷气体,并记录下对应浓度的二次谐波信号的峰峰值。每个甲烷浓度的二次谐波信号采集 10 次,并对其求均值,以减小测量误差,提高精确度。检测装置的定标结果如图 7 所示,图中正方形点为各浓度的二次谐波信号的均值。采用最小二乘法对不同浓度下的信号均值进行一元线性回归拟合,实线为线性拟合结果 ($y=0.03056x+1.558$),线性相关系数为 $R^2=0.997$ 。

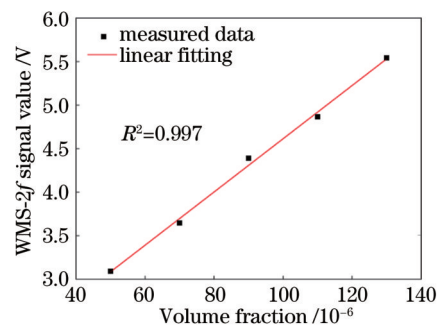


图 7 浓度标定曲线

Fig. 7 Concentration calibration curve

3.7 检测装置性能分析

为了获得所提检测装置的检测精度,实验中长时间测量体积分数为 70×10^{-6} 的甲烷气体,每个谱以 0.2 s 的时间连续采集 200 s,根据反演的浓度值绘制浓度情况分布图,如图 8(a)所示。根据测量结果绘制浓度的频率分布直方图,并对其进行高斯拟合,高斯拟合结果的半峰全宽即为装置的检测精度。拟合结果的半峰全宽为 0.918×10^{-6} ,如图 8(b)所示。对应测量到的甲烷气体的体积分数为 $(69.1 \pm 0.918) \times 10^{-6}$,相对精度为 1.3%。

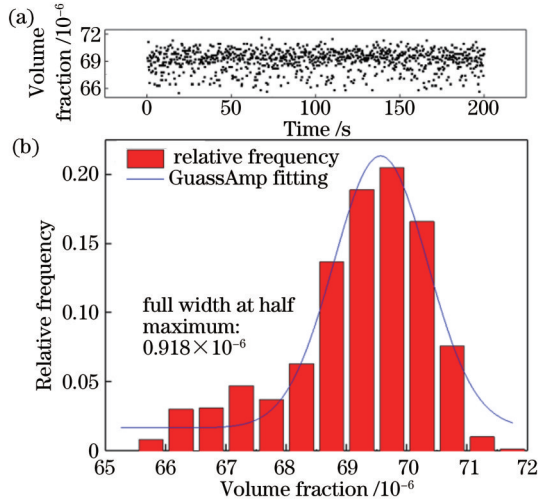


图 8 装置测量精度。(a)甲烷浓度分布情况;(b)浓度频率分布直方图

Fig. 8 Measurement accuracy of device. (a) Distribution of methane concentration; (b) histogram of concentration frequency distribution

3.8 气体置换时间

反谐振空芯光纤的芯径只有 $26 \mu\text{m}$,气体置换的时间关乎到该检测装置的响应速度。为了探测气体在光纤中的扩散速度,在光纤中充入一定浓度的甲烷后,将纯氮气以 500 Pa 的压力通入气室 1 中,连续采集 100 s 内的二次谐波信号,二次谐波信号的幅值变化情况如图 9 所示,气体置换的时间约为 42 s。

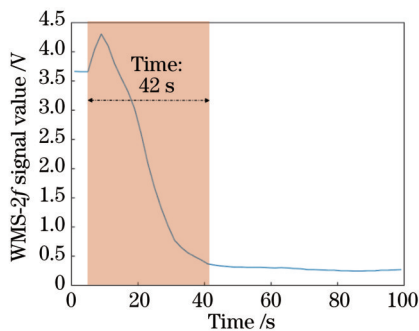


图 9 二次谐波信号幅值变化曲线图

Fig. 9 Amplitude change curve of second harmonic signal

3.9 装置的探测极限

为了评测装置的最低检测极限,使用动态配气仪

配置体积分数为 70×10^{-6} 的甲烷气体进入反谐振空芯光纤内,连续记录 1000 个二次谐波信号并将其转换成浓度值,利用 Allan 方差评估其稳定性,如图 10 所示。可以发现:当装置的积分时间为 4.2 s 时,装置的最低探测极限为 206×10^{-9} ;当装置积分时间为 66.8 s 时,装置的最低探测极限为 13×10^{-9} 。

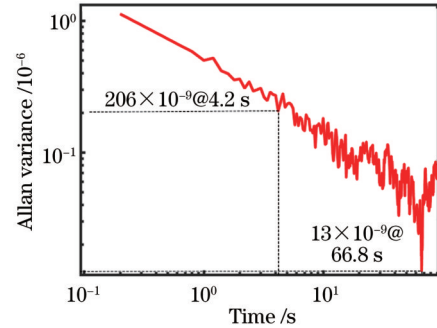


图 10 Allan 方差曲线图

Fig. 10 Allan variance curve

4 结 论

基于反谐振空芯光纤和 TDLAS-WMS 技术,搭建了一种气体传感装置,并利用甲烷对其性能进行了实验研究。采用 1.8 m 长反谐振空芯光纤作为气室,利用陶瓷插芯和陶瓷套管组成的连接件实现了单模光纤与反谐振空芯光纤的耦合。通过对甲烷的测量得出二次谐波信号的幅值与甲烷浓度之间具有良好的线性关系。通过长时间测量固定浓度的甲烷气体得到,装置的测量精度为 0.918×10^{-6} ,相对精度为 1.3%。由 Allan 方差分析可知:在 4.2 s 的平均时间下,检测装置的探测极限为 206×10^{-9} ,在 66.8 s 的平均时间下,检测装置的探测极限可进一步提高到 13×10^{-9} 。基于反谐振空芯光纤的气体检测装置具有集成度高、灵敏度高、体积小和实时测量等优点,为大气环境监测、生物医学、农业生产和工业过程控制等领域中的气体检测提供了新的检测方法。

参 考 文 献

- [1] 李红莲,李飞超,高山,等.基于 TDLAS 的 CO_2 检测系统测量不确定度分析与评定[J].激光杂志,2017,38(10):20-23.
Li H L, Li F C, Gao S, et al. The measurement uncertainty analysis and evaluation of the CO_2 detection system based on TDLAS[J]. Laser Journal, 2017, 38(10): 20-23.
- [2] 王振生.一种基于红外吸收光谱的气体检测系统:CN209148538U[P].2019-07-23.
Wang Z S. A gas detection system based on infrared absorption spectrum: CN209148538U[P]. 2019-07-23.
- [3] 马帅,吴涛,孙城林,等.基于中红外中空波导光纤的呼吸气体 CO_2 实时测量[J].光学学报,2020,40(11):1130001.
Ma S, Wu T, Sun C L, et al. Real-time exhaled CO_2

- gas measurement using a mid-infrared hollow waveguide fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(11): 1130001.
- [4] Herriott D R, Schulte H J. Folded optical delay lines[J]. *Applied Optics*, 1965, 4(8): 883-889.
- [5] Tuzson B, Mangold M, Looser H, et al. Compact multipass optical cell for laser spectroscopy[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(3): 257-259.
- [6] Zhang M, Zhang B, Chen K, et al. Miniaturized multipass cell based photoacoustic gas sensor for parts-per-billion level acetylene detection[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 308: 112013.
- [7] Blake T A, Kelly J F, Stewart T L, et al. Absorption spectroscopy in hollow-glass waveguides using infrared diode lasers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4817: 216-232.
- [8] Li Z L, Wang Z, Yang F, et al. Mid-infrared fiber-optic photothermal interferometry[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(18): 3718-3721.
- [9] Hoo Y L, Jin W, Ho H L, et al. Gas diffusion measurement using hollow-core photonic bandgap fiber [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2005, 105(2): 183-186.
- [10] Jin W, Cao Y, Yang F, et al. Ultra-sensitive all-fibre photothermal spectroscopy with large dynamic range[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6767.
- [11] 崔俊红, 丁晖, 李仙丽, 等. 基于空芯光子晶体光纤气体吸收腔的乙炔检测系统[J]. *光学学报*, 2010, 30(8): 2262-2266.
- Cui J H, Ding H, Li X L, et al. Acetylene sensing system using hollow-core photonic crystal fiber as gas cell [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2262-2266.
- [12] Belardi W. Design and properties of hollow antiresonant fibers for the visible and near infrared spectral range[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(21): 4497-4503.
- [13] 姜寿林, 靳伟, 陈非凡, 等. 基于空芯光纤光热光谱技术的高灵敏度 CO₂ 检测[J]. *光学学报*, 2021, 41(13): 1306004.
- Jiang S L, Jin W, Chen F F, et al. Carbon dioxide detection with high sensitivity based on photo-thermal spectroscopy in hollow-core optical fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(13): 1306004.
- [14] Zhao Y, Qi Y, Ho H L, et al. Photoacoustic Brillouin spectroscopy of gas-filled anti-resonant hollow-core optical fibers[J]. *Optica*, 2021, 8(4): 532-538.
- [15] Jin W, Xu Y Z, Demokan M S, et al. Investigation of interferometric noise in fiber-optic gas sensors with use of wavelength modulation spectroscopy[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(28): 7239-7246.
- [16] 信丰鑫. 基于 TDLAS 的大气 CO₂ 监测技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014: 20-30.
- Xin F X. Study on monitoring technology of atmospheric carbon dioxide concentration based on TDLAS[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014: 20-30.
- [17] 王梦玲, 高寿飞, 汪滢莹, 等. 紫外空芯反谐振光纤的研制[J]. *中国激光*, 2020, 47(8): 0806002.
- Wang M L, Gao S F, Wang Y Y, et al. UV guiding hollow-core antiresonant fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(8): 0806002.
- [18] Litchinitser N M, Abeeluck A K, Headley C, et al. Antiresonant reflecting photonic crystal optical waveguides[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(18): 1592-1594.
- [19] 刘中亮. 基于 TDLAS 的甲烷气体监测系统的设计[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- Liu Z L. Methane monitoring system based on TDLAS [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
- [20] Yu F, Wu D K, Wang Y Z, et al. Delivery of CW laser power up to 300 watts at 1080 nm by an uncooled low-loss anti-resonant hollow-core fiber[J]. *Optics Express*, 2020, 29(2): 1492-1501.
- [21] Lin Y C, Jin W, Yang F, et al. Performance optimization of hollow-core fiber photothermal gas sensors[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(22): 4712-4715.
- [22] Liu F, Bao H H, Ho H L, et al. Multicomponent trace gas detection with hollow-core fiber photothermal interferometry and time-division multiplexing[J]. *Optics Express*, 2021, 29(26): 43445-43453.