

# 基于空芯带隙型光子晶体光纤的单端置入式同源甲烷检测仪

丛海芳<sup>1\*</sup>, 李彦超<sup>2</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup>黑龙江大学电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080

**摘要** 为了提高复杂环境中甲烷气体探测的适用性, 选择空芯带隙型光子晶体光纤(单端镀全反膜)作为光学气室, 实现了置入式同源甲烷浓度的探测。采用可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术, 结合长度为 0.5 m 的空芯带隙型光子晶体光纤, 实现了甲烷气体的在线测量, 系统的检测下限可达到  $1.92 \times 10^{-5}$ , 稳定性波动小于  $\pm 2.18\%$ 。单端全反射设计配合同源探测方式使复杂环境中的甲烷浓度的置入式探测成为可能, 为单光源分布式探测提供了研究基础。

**关键词** 光谱学; 红外吸收光谱; 同源探测; 甲烷检测; 空芯带隙型光子晶体光纤

**中图分类号** TN219; 0433.5+1; O657.3

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/CJL202047.0111003

## Single-End Inserted Homologous Methane Detector Based on Hollow-Core Band Gap Photonic Crystal Fibers

Cong Haifang<sup>1\*</sup>, Li Yanchao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup>College of Electric Engineering, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150080, China

**Abstract** To improve the applicability of methane gas detection in complex environments, a hollow-core band gap photonic crystal fiber is used as the optical chamber, realizing the inserted detection of homologous methane concentration. Tunable diode laser absorption spectroscopy with a 0.5-m hollow-core band gap photonic crystal fiber is used for the online detection of methane gas. The detection limit of the designed detection system is approximately  $1.92 \times 10^{-5}$  and the long-term stability of detection fluctuation is less than  $\pm 2.18\%$ . The single-ended total reflection design and homologous detection method make inserted detection possible in complex environments. This work provides the research foundation for distributed detection using a single light source.

**Key words** spectroscopy; infrared absorption spectrum; homologous detection; methane detection; hollow band gap photonic crystal fibers

**OCIS codes** 300.1030; 060.2390; 060.2370

## 1 引 言

我国稻田甲烷(CH<sub>4</sub>)排放量高达全球稻田甲烷排放量的 27.4%, 作为温室气体的主要成分之一, 其浓度仅次于二氧化碳, 但其温室效应的潜势却为二氧化碳的 25 倍, 科学地制定温室气体减排策略依赖

于有效科学数据的获取<sup>[1]</sup>。但由于稻田内甲烷的源汇过程复杂, 仅对稻田内甲烷排放总量进行探测并不能有效反映甲烷浓度在稻田内部的空间分布, 限制了对稻株甲烷气体产生、传输、排放机制的有效分析<sup>[2-3]</sup>。

目前, 检测稻田甲烷排放的常规方法包括箱法、

**收稿日期:** 2019-07-22; **修回日期:** 2019-09-04; **录用日期:** 2019-10-09

**基金项目:** 黑龙江省自然科学基金优秀青年项目(YQ2019F015)、黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划(UNPYSC2017116)

\* **E-mail:** lb13180749268@sina.com

微气象学法、土壤廓线法及同位素法四种方式,其中后三种探测方法分别存在探测精度不足、侵入式探测、对实验过程要求严苛等缺陷<sup>[4]</sup>。箱法因具有较高的探测精度与重复性而被沿用至今,但它仅能反映箱内气体的平均浓度,探测结果无法满足稻株甲烷产生机制的研究需求<sup>[5]</sup>。

相比于传统的检测方法,光学检测方法具有选择性好、无中毒反应、高精度、非侵入式测量等优势<sup>[6-7]</sup>。但受限于多反射光学气室结构的特性,在非开放空间中仍无法实现置入式测量,在矿井、稻田等复杂环境下仍无法实现内部空间气体浓度的探测。

空芯带隙型光子光纤(HC-PCF)作为光学气室,与传统的多反射气室相比具有更低的散射损耗与传输损耗以及更长的有效光程<sup>[8-10]</sup>,因此,在近年来的研究中多次被作为光学气室应用于痕量气体浓度的测量<sup>[11-12]</sup>。早在2008年,Lazaro等<sup>[13]</sup>便采用空芯光子晶体光纤作为气室对甲烷气体的浓度进行了探测,探测精度可达到 $4.5 \times 10^{-5}$ ,验证了空芯光子晶体光纤在气体传感方面应用的可行性。2019年,吉林大学采用自由空间耦合的方式将传统单模光纤与空芯光子晶体光纤进行对接,通过优化结构参数抑制模式干涉,将甲烷气体的检测下限提升至 $5 \times 10^{-6}$ ,但该检测结构对耦合精度的要求较高,在实际应用上受到一定限制<sup>[14]</sup>。2019年,Huang等<sup>[15]</sup>采用中红外LED光源,通过光学聚焦实现了 $3.31 \mu\text{m}$ 甲烷强吸收峰的高精度探测,同时通过气泵对空芯光子晶体光纤两侧施加压力差,提高了响应速度;该研究在检测精度与响应时间方面均具有较大优势,但使用条件仅限于实验室环境,且光学部件与气体泵增加了成本投入与能量损耗。鉴于在实际应用中将空芯光子晶体光纤作为气室实现气体传感受到诸多限制,本文对检测系统的结构进行了优化,采用一端反射膜的设计方式在倍增光程的同时实现了同源探测,机械保护配合防水透气处理使置入式探测成为可能,为单光源大范围分布式探测的研究提供了基础。

在甲烷气体的实地测试中,同源探测模式对非开放性复杂环境中气体浓度的探测具有更高的使用价值,配合空芯带隙型光子晶体光纤作为小型化、长光程气室,可在稻田环境等苛刻环境下实现置入式探测,使特定位置处气体浓度的探测成为可能。本文将中心波段位于 $1653 \text{ nm}$ 附近的分布反馈式(DFB)激光器作为光源,采用模糊PID(Proportional-Integral-Derivative)温控调制实现快速、高精度的温度

调控,结合TDLAS(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy)技术实现所需光谱的输出。检测系统采用差分检测结构,参考信号经光衰减器后被探测,而探测信号经过带隙型空芯光子晶体光纤时先被待测气体充分吸收,之后再被探测。利用正交锁相放大器提取差分信号的二次谐波,提高了信噪比,确保了较高的检测灵敏度<sup>[16-17]</sup>。最后,通过气体实验验证了该检测系统结构的可行性。该检测系统在实现同源置入式探测的基础上,为分布式光纤传感技术与激光光谱技术实现复杂环境下痕量气体的有效探测提供了一种新思路。

## 2 检测原理

### 2.1 吸收谱线的选择

根据Beer-Lambert定律,甲烷气体分子受红外光束照射时,会选择性地吸收特定波长的光能,产生红外吸收现象。假设入射光的强度为 $I_0(\lambda)$ ,透射光的强度为 $I(\lambda)$ ,则吸收现象可表示为

$$\tau(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = \exp[-\alpha LC], \quad (1)$$

式中: $\alpha$ 为特定波长处的吸收率; $L$ 为有效光程; $C$ 为待测气体的浓度。

综合考虑干扰气体吸收峰重叠、激光器成本、光子晶体光纤传输能力等限制因素,选择 $1653 \text{ nm}$ 附近的甲烷的吸收峰进行研究,如图1(a)所示。假设实验条件为标准大气压,温度为 $300 \text{ K}$ ,有效光程为 $1 \text{ m}$ ,考虑到实际应用环境中可能存在干扰气体,根据HITRAN数据库得到甲烷、水汽和二氧化碳气体在探测波段的吸收谱线如图1(b)所示,所选吸收即使在环境中的二氧化碳与水汽浓度均较大时亦不会受到干扰气体吸收的影响,确保了甲烷浓度探测的准确性。

### 2.2 激光器的调制与信号的解调

采用TDLAS技术对激光器进行驱动,该检测技术对环境干扰(如机械振动、温度漂移)带来的影响具有较强的鲁棒性,可有效降低系统中的低频噪声对检测结果的影响。TDLAS技术采用高频正弦波叠加低频锯齿波的方式对激光器进行驱动,根据激光器的发光特性,当驱动电流变化时,其输出波峰的中心频率会随之改变。因此,低频锯齿波使激光器出射光中心波长往复扫过所选甲烷的吸收峰时,载波频率通常需要远高于采样频率,并尽可能降低 $1/f$ 噪声,以提高检测精度<sup>[18-19]</sup>。此时,输出信号包含低频信号频率与高频载波频率,经傅里叶级数展

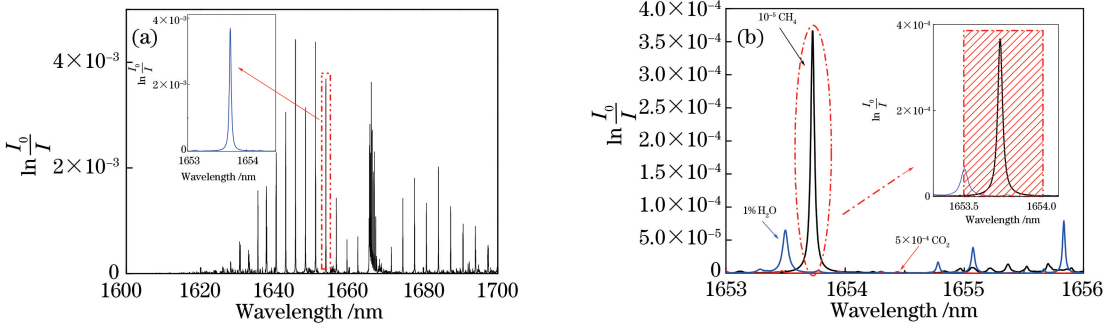


图 1 近红外 1653 nm 附近常见气体的吸收强度。(a) CH<sub>4</sub> 吸收峰;(b)干扰气体的吸收强度

Fig. 1 Absorption intensity of common gas in near-infrared band near 1653 nm.

(a) Absorption peak of CH<sub>4</sub>; (b) absorption intensity of interference gas

开和泰勒级数展开后可知,奇次谐波频率中心频率处的值为 0,常用来标定系统中心波长的位置,偶次谐波分量在中心频率处得最大值,并与气体浓度成正比。在实际设计过程中,将角频率为  $\omega_{\text{sin}}$  的高频正弦波加载于频率为  $F_{\text{ramp}}$  的低频锯齿波上,调制信号为

$$u(t) = \alpha \sin(\omega_{\text{sin}} t) + b F_{\text{ramp}}(t - F_{\text{ramp}}) + b, \quad (2)$$

式中: $b$  为噪声。

本设计中采用差分检测技术,两路通道分别经过光衰减器与空芯光子晶体光纤后,被红外铟镓砷探测器接收的光信号强度分别为

$$I_r(t) = n I_0 [1 + m u(t)], \quad (3)$$

$$I_d(t) = I_0 [1 + m u(t)] \exp[-\alpha LC] \approx I_0 [1 + m u(t)] \times [1 - \alpha LC] \quad (4)$$

式中: $m$  为光强调制系数; $I_0$  为中心波长处激光器发光的平均强度; $n$  为光衰减系数。调节光衰减器的衰减系数,使参考通道与探测通道的衰减效果相同,然后对两通道接收光经光电转换后所得的电压信号作差分运算,即

$$\mu_{\text{Diff}}(t) = \mu_r(t) - \mu_a(t) = I_0 [1 + m \mu(t)] [K_r K_{oc} \alpha LC], \quad (5)$$

式中: $\mu_r(t)$ 、 $\mu_a(t)$  分别为参考通道与探测通道经光电转换后的电信号; $K_r$ 、 $K_{oc}$  分别为信号放大系数与光电转换参数。采用自主研发的正交锁相放大器即可对包含气体浓度信息的二次谐波信号进行提取,提取得到的正交分量为

$$\begin{cases} A_{2f,\perp}(t) = \int_{t-T_{\text{int}2}}^t u_{\text{Diff}}(\tau) \sin(2\omega_{\text{sin}} \tau) d\tau \\ A_{2f,\parallel}(t) = \int_{t-T_{\text{int}2}}^t u_{\text{Diff}}(\tau) \cos(2\omega_{\text{sin}} \tau) d\tau \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $\tau$  为积分时间; $T_{\text{int}1}$ 、 $T_{\text{int}2}$  为积分因子,由锁相放大器所选滤波器截止频率决定,最终的二次谐波信号可表示为

$$A_{2f}(t) = \sqrt{(A_{2f,\perp})^2 + (A_{2f,\parallel})^2}. \quad (7)$$

### 3 检测系统的设计

图 2 所示为检测系统的结构框图,检测系统主要由 DFB 激光器、驱动及温控电路、光环形器、空芯带隙型光子晶体光纤、C 型陶瓷套环和数字正交锁相放大器组成。激光器驱动功能与数字正交锁相放大器均在 LabVIEW 平台上实现,参数可根据实际需求进行更改。光源部分采用的是中心波长为 1654 nm 的 DFB 激光器,本设计中采用 LabVIEW 调控平台产生 5 kHz 正弦波叠加 10 Hz 锯齿波,该信号经由数据采集卡(DAQ)及外部硬件电路对 DFB 激光器进行驱动。激光器发射的光经过光分束器(FOBS)后分为待测光线及参考光线,待测光线经光准直器后进入光环形器,然后进入空芯光子晶体光纤被待测气体吸收,参考光线经过光衰减器(OA)模拟气体浓度为 0 情况下的光衰减情况,最终两路光线被 InGaAs 探测器探测,并对其进行处理,最终得到包含待测气体浓度信息的电压信号。采用自主研发的数字正交锁相放大器提取二次谐波信号,就可以得到待测气体的浓度。

光纤气室近光源端与普通光纤熔接,空芯光子晶体光纤的中间被截断,并用 C 型套环进行连接,作为外界待测气体扩散接口,远光源端镀银对待测信号进行全反射,反射信号经光环形器后被送入探测器,以避免对激光器光源造成影响。

#### 3.1 激光器驱动设计

根据 DFB 激光器的工作原理,其输出波长随光栅反射区折射率的改变而发生变化,改变工作温度在改变激光器发射波长的同时可引起光功率的变化<sup>[20]</sup>。温度控制性能是否稳定直接决定了检测系统在工作环境变化的情况下是否会发生中心波长的

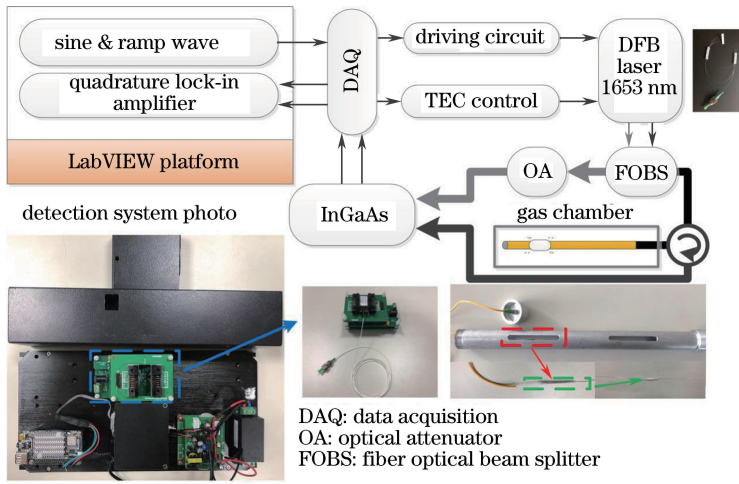


图 2 近红外甲烷探测系统结构图

Fig. 2 Structural diagram of near-infrared methane detection system

漂移。设计中采用 DAQ 对温度反馈信号进行采样,并将采样结果传输至 LabVIEW 调控平台,模糊 PID 控制器的输入分别为设定温度与实际温度的差值以及温度变化率,输出为经模糊规则整定后的 PID 参数,使 PID 调控效果具有更强鲁棒性,进而优化半导体致冷器(TEC)温度调节效果,形成闭环调控系统。

本设计采用 LabVIEW 提取温度值,模糊 PID 输入变量包括实测温度与设定温度之差( $T$ )以及温度变化率( $T_c$ )。模糊控制算法实现如下:首先利用模糊化模块对  $T$  与  $T_c$  进行模糊化处理,并进行归一化,根据温度实际变化范围定义模糊集(NB、NS、ZO、PS、PB),确定模糊子集的隶属度,完成模糊化;随后在实验室环境下根据多次实测结果确立 PID 参数的模糊规则(在实际应用中,该模糊规则应根据实际应用环境进行优化,本设计中共设立了 25 条模糊规则);最后通过重心法进行解模糊化处理,完成 PID 参数的模糊整定过程。

为了验证温控性能,进行了超过 12 h 的长时间测试,测试环境温度为 24.62 °C,结果如图 3 所示。激光器温度可在 11 s 内进入稳定区间( $\pm 5\%$ ),波动范围不超过  $\pm 0.018$  °C。与传统 PID 温度调控方法相比,模糊 PID 温度调控耗时更短,波动范围更小。

激光器输出谱段调节过程如下:首先将温度激光器的中心波长粗调至尽量靠近待测波段,随后锁定激光器温度,通过改变激光器的驱动电流进行波长调制。在设计中,驱动电流由 LabVIEW 调控平台生成,通过 DAQ 完成数字至模拟量的转换。控制激光器的驱动电流为 50 mA,温度调控区间为

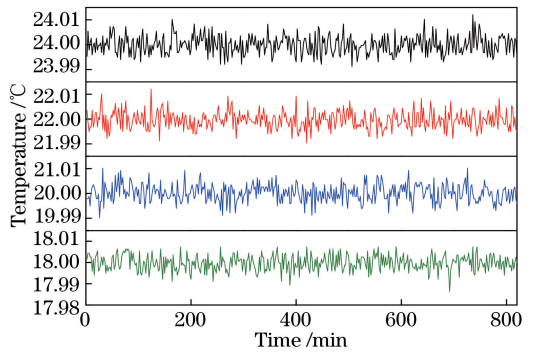


图 3 激光器温控稳定性实验结果

Fig. 3 Experimental result of temperature controlled stability of laser

16~24 °C,步进为 2 °C,使用 Thermo Scientific 公司的傅里叶红外光谱仪(NICOLET 6700 FT-IR)测量得到的光谱图如图 4(a)所示。激光器输出的中心波长随温度线性红移。随后测试不同温度与驱动电流下,激光器输出的中心波长,驱动电流以 10 mA 为步进,从 30 mA 增加到 80 mA,激光器输出的中心波长如图 4(b)所示。恒温下改变激光器的注入电流,可使激光器输出的中心波长红移,且输出功率随之增大。在确定温控及恒流驱动调控效果后,调节工作温度及驱动电流为固定值,激光器的温度为 18 °C,注入电流为 55 mA,检测激光器发射光谱的重复性及稳定性。共测试 5 次输出光谱,结果如图 5 所示。激光器的输出光谱几乎无漂移,光谱强度峰峰值波动小于 2%,重复性良好。

### 3.2 信号采集

在信号处理部分,InGaAs 探测器输出的电压信号首先被 DAQ 采集,LabVIEW 平台的数字正交锁相放大器提取二次谐波信号,建立电压信号与待测

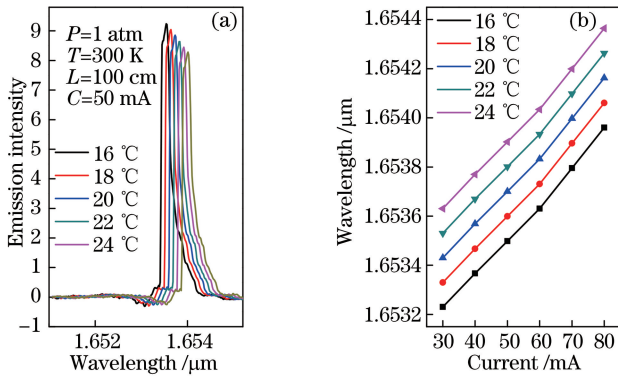


图 4 激光器输出光谱测试结果(驱动电流为 50 mA,驱动温度变化范围为 39~44 °C)。(a)光谱;(b)中心波长  
Fig. 4 Testing results of output spectra of laser (driving current is 50 mA and change range of driving temperature is 39~44 °C). (a) Spectra; (b) central wavelength

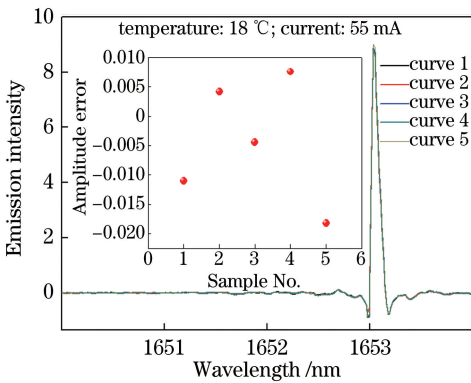


图 5 激光器输出光谱的重复性测试结果

Fig. 5 Repeatability test result of laser's output spectrum

气体浓度的数学关系。为了验证正交锁相放大器对二次谐波的提取能力,采用气体质量流量计配制体积分数为 10% 的甲烷样品气体,激光器的温度设为 18 °C,锯齿波以 0.1 s 为周期扫过待测波长。采用示波器对差分信号进行检测,结果如图 6(a) 所示,图中的两种曲线分别为参考与探测通道信号,为数字锁相放大器的输入。经过差分运算后提取二次谐波,结果如图 6(b) 所示,二次谐波提取的误差小于

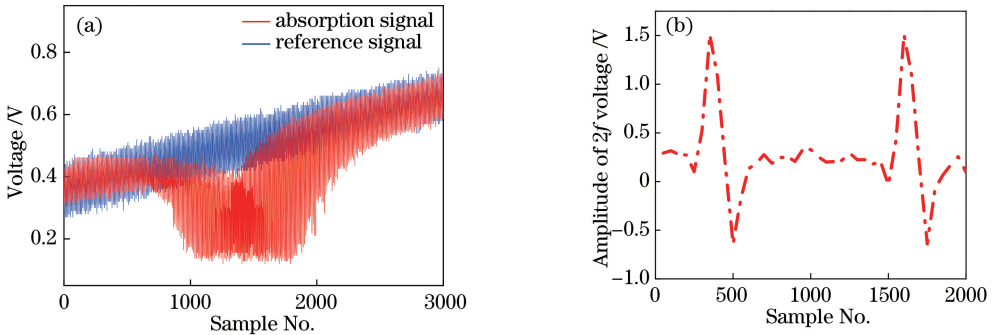


图 6 正交锁相放大器信号提取性能测试结果。(a)差分信号波形;(b)二次谐波信号

Fig. 6 Test results of signal extraction performance of orthogonal phase-locked amplifier.

(a) Waveform of differential signals; (b) second harmonic signal

5.8%,稳定性良好。

### 3.3 对接耦合能量损耗

本设计中采用的空芯带隙型光子晶体光纤为 NKT 公司生产的 HC-1550-02 型光纤,包层直径为 120 μm,包层空气孔间距为 3.8 μm,其有效工作波长范围为 1490~1680 nm,在 1653 nm 处的传输损耗约为 25 dB/km,满足痕量甲烷气体的检测需求。

DFB 激光器光源首先通过普通单模光纤传输至空芯带隙型光子晶体光纤的一端,普通单模光纤熔接空芯光子晶体光纤的结构称为 SMF-PCF 结构。测试得到能量损耗约为 -0.8 dB。随后激光信号经 C 型陶瓷套环耦合进后端空芯带隙型光子晶体光纤,空芯带隙型光子晶体光纤终端镀制了全反射膜,反射信号传输至光环形器,由探测器接收。该结构中的主要能量损耗发生在 C 型陶瓷套环处,此处采用 CFLC126 型陶瓷插芯将两段空芯带隙型光子晶体光纤进行对接,陶瓷插芯的外径为 1.25 mm,内径为 126 μm,陶瓷插芯单侧留有切口,用于外部气体后端的扩散。两陶瓷插芯的外侧采用 ADAL1 型套管进行固定。陶瓷插芯间隙与能量损耗具有一

定的数学关系,仅从能量角度考虑,间隙应控制在  $7\sim 13\ \mu\text{m}$  之间<sup>[21-22]</sup>。但考虑到气体扩散速度的实际应用需要,本设计中的间隙尺寸选择为  $0.15\ \text{mm}$ ,实际耦合损失约为  $3.2\ \text{dB}$ 。

采用有限元求解软件 COMSOL 对该型号光子晶体带隙光纤的模式分布进行仿真,结果如图 7(a) 所示,激光在光子晶体光纤内的绝大多数能量被约束于线芯内。对光纤气室的响应时间进行测试,将 HC-PCF 光纤浸于含有一定甲烷气体的环境中,随后采用气体质量流量计将体积分数为  $0.21\%$  的甲烷标准气体注入气室内,记录其浓度的变化,测试结果

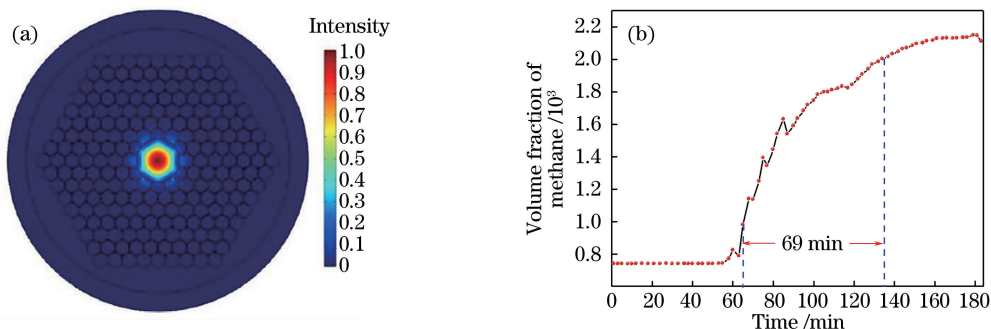


图 7 基于空芯光子晶体光纤的光学气室性能测试结果。(a) HC-PCF 模式分布仿真结果;(b)响应速度测试

Fig. 7 Results of optical chamber performance test based on hollow-core photonic crystal fiber.

(a) Simulated mode distribution of HC-PCF; (b) response speed test

## 4 实验结果与分析

采用误差小于  $2\%$  的质量流量计配制甲烷气体样品,气源由不确定度为  $2\%$  的甲烷标准气和体积分数为  $99.9\%$  的氮气组成。动态配气过程中气体样品以恒定的速率持续冲刷气室,待读数稳定后进行测量,每组测试时间不少于  $10\ \text{min}$ 。

### 4.1 浓度标定实验

标定实验中待测气体甲烷的体积分数为  $10^{-4}\sim 10^{-1}$ ,建立二次谐波信号与气体浓度之间的数学关系。拟合关系理论上可分为低浓度探测范围的线性拟合区间与高浓度探测范围的指数拟合区间,实际测试结果显示可将  $3\times 10^{-3}$  作为分界点,进行间断式线性拟合,测试结果如图 8 所示。分段拟合为

$$C = (V_{2f} - 1.2018)/0.09152, \quad (8)$$

$$C = (V_{2f} - 1.715)/0.00205, \quad (9)$$

式中: $V_{2f}$  为二次谐波提取后的电压值。

### 4.2 稳定性

配制体积分分数分别为  $1\%$ 、 $5\%$  和  $20\%$  的甲烷标准气体,并将其注入气室内,记录检测结果,实验时间超过  $12\ \text{h}$ ,该过程持续以较低流量的标准气体不

如图 7(b) 所示,扩散所需时间约为  $69\ \text{min}$ 。当探测需求为实时响应时,可采用外部气泵或光纤以侧向打孔的方式进一步加快响应时间,此时响应时间可压缩在  $3\ \text{min}$  以内。增加打孔数量可进一步压缩响应时间,但每个通气孔会造成  $0.1\ \text{dB}\sim 0.5\ \text{dB}$  的能量损失,该能量损失与加工工艺有关,探测系统对能量要求不高时可通过进一步开孔压缩响应时间。当需要实时探测时,可采用压力差法对空芯光子晶体光纤的两端施加压力差迫使气体快速流动,这是目前较为可行的方案,可压缩响应时间到十几至几十秒之间。该方法的缺点是需要额外的设备,且功耗较大。

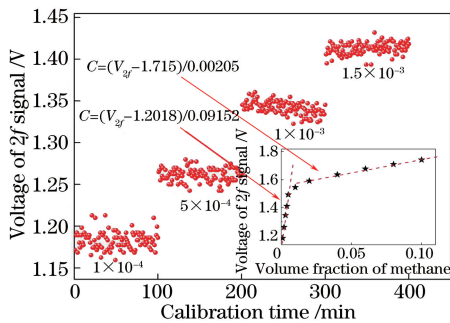


图 8 浓度标定与拟合结果

Fig. 8 Concentration calibration and fitting result

间断地冲刷气室,避免空气对检测结果造成影响,测试结果如图 9 所示。在长时间的工作过程中,检测系统工作稳定,当气体体积分分数为  $1\%$  时,检测结果为  $0.9782\%\sim 1.021\%$ ,波动范围小于  $\pm 2.18\%$ 。

### 4.3 检测下限

Allan 方差是一种识别并量化检测数据中不同噪声项的方法,常用于分析不同噪声在不同积分时间下的变化规律。本实验引入 Allan 方差对检测系统的稳定性及检测下限进行分析。在纯氮气环境中,记录检测系统输出的二次谐波峰峰值,通过计算得到 Allan 方差与积分时间的关系如图 10 所示。

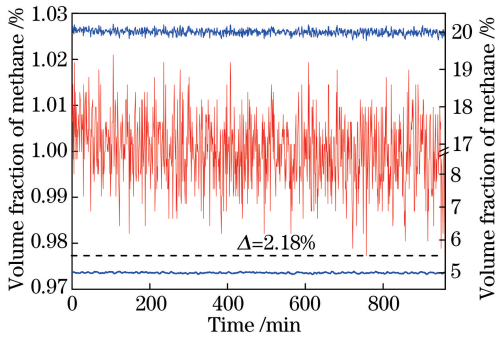


图 9 稳定性测试结果

Fig. 9 Stability test result

默认情况下,激光器以 10 Hz 的频率周期扫过吸收峰,将每 10 组数据的均值作为一次数据输出,积分时间为 1 s,此时检测下限为  $1.498 \times 10^{-4}$ 。随着积分时间延长,当 Allan 方差曲线斜率变为 -1 时,检测系统的白噪声达到最低值,此时积分时间  $\tau$  为 9.5 s,检测下限  $\sigma$  为  $4.6 \times 10^{-5}$ 。随着积分时间进一步延长,系统的检测下限继续降低,当积分时间为 49 s 时,1/2 斜率与 -1 斜率交点处的检测下限达到最低值,约为  $1.92 \times 10^{-5}$ ,此时检测系统的主要噪声来自系统的温度漂移以及外部环境的噪声。当实际应用环境对响应时间的要求并不苛刻时,可适当延长积分时间,提高系统的检测下限。

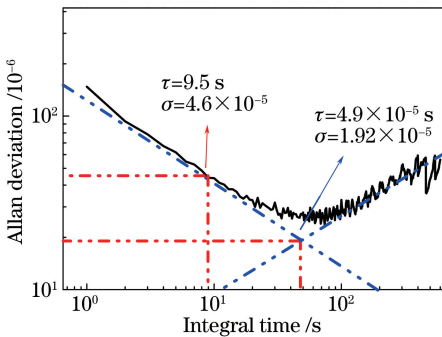


图 10 检测系统的 Allan 方差

Fig. 10 Allan deviation curve of detection system

## 5 结 论

本文选取中心波长位于 1653 nm 的 DFB 激光器作为光源,结合 TDLAS 检测技术,研制了一款同源单端置入式甲烷气体检测仪。该系统的驱动及信号提取功能均基于 LabVIEW 平台实现,激光器调制部分具有较高的调控精度及灵活性,模糊 PID 温控可缩短调控时间至 11 s 以内,且波动范围小于  $\pm 0.018 \text{ }^\circ\text{C}$ ,可以有效提升检测系统的稳定性,使激光器的输出光谱线性度良好,长时间工作稳定性满足实验要求。甲烷探测稳定性波动范围小于

$\pm 2.18\%$ ,当积分时间为 48 s 时,检测下限可达  $1.92 \times 10^{-5}$ 。与现有研究报道相比,本设计采用空芯光子晶体光纤作为光学气室,将单端全反射式结构与光环形器相配合实现了单端置入式同源探测,反射式光学结构在提升有效光程,确保检测精度的同时,为农田、管道、矿井等苛刻环境中甲烷浓度的探测提供了一种新的探测方法。

## 参 考 文 献

- [1] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Climate change 2013-the physical science basis: contribution of working group 1 to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [2] Malyan S K, Bhatia A, Kumar A, et al. Methane production, oxidation and mitigation: a mechanistic understanding and comprehensive evaluation of influencing factors [J]. Science of the Total Environment, 2016, 572: 874-896.
- [3] Min H, Chen M C, Qian Z S. Studies on characteristics of release of methane as well as biological mechanisms in rice paddy soil [J]. Rural Eco-environment, 1993(S1): 28-32, 42, 59. 闵航, 陈美慈, 钱泽澍. 水稻田的甲烷释放特性及其生物学机理 [J]. 农村生态环境, 1993(S1): 28-32, 42, 59.
- [4] Zhang X, Lin M, Wu J K. Common terrestrial greenhouse gas fluxes measurement method comparison [J]. Forest Inventory and Planning, 2013, 38(2): 27-30. 张鑫, 林茂, 吴京科. 常见陆地温室气体通量测量方法比较 [J]. 林业调查规划, 2013, 38(2): 27-30.
- [5] Zheng Z M, Yu G R, Sun X M, et al. Comparison of eddy covariance and static chamber/gas chromatogram methods in measuring ecosystem respiration [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(2): 290-298. 郑泽梅, 于贵瑞, 孙晓敏, 等. 涡度相关法和静态箱/气相色谱法在生态系统呼吸观测中的比较 [J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 290-298.
- [6] Risby T H, Tittel F K. Current status of midinfrared quantum and interband cascade lasers for clinical breath analysis [J]. Optical Engineering, 2010, 49 (11): 111123.
- [7] Du Z H, Han R Y, Wang X Y, et al. Interband cascade lasers based trace gas sensing: a review [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(9): 0911006. 杜振辉, 韩瑞炎, 王晓雨, 等. 采用带间级联激光器的痕量气体检测技术进展 [J]. 中国激光, 2018, 45 (9): 0911006.

- [8] Benabid F, Couny F, Knight J C, et al. Compact, stable and efficient all-fibre gas cells using hollow-core photonic crystal fibres [J]. *Nature*, 2005, 434 (7032): 488-491.
- [9] Cao Y C, Jin W, Yang F, et al. Phase sensitivity of fundamental mode of hollow-core photonic bandgap fiber to internal gas pressure [J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13190-13201.
- [10] Wu B Q, Lu Y, Hao C J, et al. A photonic crystal fiber sensor based on differential optical absorption spectroscopy for mixed gases detection [J]. *Optik*, 2014, 125(12): 2909-2911.
- [11] Yang F, Jin W, Cao Y C, et al. Towards high sensitivity gas detection with hollow-core photonic bandgap fibers [J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 24894-24907.
- [12] Gao S F, Wang Y Y, Wang P. Research progress on hollow-core anti-resonant fiber and gas Raman laser technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46 (5): 0508014.  
高寿飞, 汪滢莹, 王璞. 反谐振空芯光纤及气体拉曼激光技术的研究进展 [J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0508014.
- [13] Lazaro J M, Cubillas A M, Silva-Lopez M, et al. Methane sensing using multiple-coupling gaps in hollow-core photonic bandgap fibers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7004: 70044U.
- [14] Hu L, Zheng C T, Yao D, et al. A hollow-core photonic band-gap fiber based methane sensor system capable of reduced mode interference noise [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 97: 101-107.
- [15] Huang S H, Huang Y J, Chui H C. Trace methane sensor using mid-infrared light emitting diode in hollow-core fiber [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 282: 599-602.
- [16] Sur R, Sun K, Jeffries J B, et al. Scanned-wavelength-modulation-spectroscopy sensor for CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub>O in a high-pressure engineering-scale transport-reactor coal gasifier [J]. *Fuel*, 2015, 150: 102-111.
- [17] Salati S H, Khorsandi A. Apodized 2f/1f wavelength modulation spectroscopy method for calibration-free trace detection of carbon monoxide in the near-infrared region: theory and experiment [J]. *Applied Physics B*, 2014, 116(3): 521-531.
- [18] Xia H, Wu B, Zhang Z R, et al. Stability study on high sensitive CO monitoring in near-infrared [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(21): 214208.  
夏滑, 吴边, 张志荣, 等. 近红外波段 CO 高灵敏检测的稳定性研究 [J]. *物理学报*, 2013, 62(21): 214208.
- [19] Li B, He Q X, Fu Y, et al. Development of near infrared distributed feedback laser temperature control system for CO detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(s2): s214002.  
李彬, 何启欣, 付洋, 等. 用于 CO 气体检测的近红外分布式反馈激光器温控系统 [J]. *光学学报*, 2014, 34(s2): s214002.
- [20] Chen C, Dang J M, Huang J Q, et al. DFB laser temperature control system with high stability and strong robustness [J]. *Journal of Jilin University Engineering and Technology Edition*, 2013, 43(4): 1004-1010.  
陈晨, 党敬民, 黄渐强, 等. 高稳定、强鲁棒性 DFB 激光器温度控制系统 [J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2014, 43(4): 1004-1010.
- [21] Zheng C T, Ye W L, Huang J Q, et al. Performance improvement of a near-infrared CH<sub>4</sub> detection device using wavelet-denoising-assisted wavelength modulation technique [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, 190: 249-258.
- [22] Wang J, Wang H. Near-IR tunable laser based photoacoustic sensor for sub-ppb C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> detections [J]. *Laser Physics Letters*, 2015, 12(5): 055603.