

## 基于 LabVIEW 的空芯光子晶体光纤 CO<sub>2</sub> 气体检测系统

吕淑媛, 杜绍勇

(西安邮电大学 电子工程学院, 陕西 西安 710061)

**摘要:** 为了实现全光纤型高灵敏度气体在线检测系统, 以空芯光子晶体光纤为传感气室, 利用 CO<sub>2</sub> 气体分子在 1572.48 nm 附近吸收谱以及虚拟仪器 LabVIEW 平台搭建了双光路差分 CO<sub>2</sub> 气体近红外检测实验系统。实验中所用空芯光子晶体光纤长度为 1.8 m, 通过对其两端同时充气, 提高了系统响应速度, 0.1 MPa 下充气过程仅需 100 s 左右。以标准浓度 CO<sub>2</sub> 气体对该系统进行了标定, 并对浓度 2%、5%、10% 和 100% 的 CO<sub>2</sub> 气体进行了测量, 结果表明 100 min 内浓度检测相对误差不超过 2%, 标准差最大 3.32%。气体吸收光程为 1.8 m, 系统检测灵敏度达到  $5.9818 \times 10^{-5} \mu\text{W}/\text{ppm}$ 。

**关键词:** CO<sub>2</sub> 检测; 空芯光子晶体光纤; 双光路差分; LabVIEW

**中图分类号:** TP212 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1117002

## Detection system of CO<sub>2</sub> using hollow-core crystal fiber based on LabVIEW

Lv Shuyuan, Du Shaoyong

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** For the purpose of realizing the all-fiber gas detection system with high sensor sensitivity, using the Hollow Core-Photonic Crystal Fiber (HC-PCF) as gas cell, a dual-optical path differential near-infrared carbon dioxide detection experimental system based on virtual instruments LabVIEW and the absorption spectroscopy around wavelength 1572.48 nm of carbon dioxide molecule was developed. The system response time was about 100 s by inflating the HC-PCF of 1.8 m long from two ends under the pressure of 0.1 MPa. The detection system was calibrated with carbon dioxide of standard concentration. Carbon dioxide with known concentration of 2%, 5%, 10% and 100% were tested respectively and the experimental results showed that the detection errors relative to standard concentration were no more than 2% and the maximum standard deviation of measured concentration were 3.32% in 100 minutes. In addition, the optical path of gas absorption reaches 1.8 m and the system detection sensitivity of  $5.9818 \times 10^{-5} \mu\text{W}/\text{ppm}$  was achieved.

**Key words:** CO<sub>2</sub> detection; hollow core-photonic crystal fiber; dual-optical path differential method; LabVIEW

收稿日期: 2018-06-05; 修订日期: 2018-07-03

基金项目: 陕西省教育厅专项科研计划(15JK1681)

作者简介: 吕淑媛(1976-), 女, 副教授, 博士, 主要从事微光学陀螺和光子晶体波导方面的研究。Email: 1159955131@qq.com

通讯作者: 杜绍勇(1983-), 男, 硕士, 主要从事光电传感、测量与检测方面的研究。Email: 36425420@qq.com

## 0 引言

CO<sub>2</sub> 是主要的温室气体之一, 实现对其精确在线检测在大气环境监测与治理以及工农业生产中都有着重要的意义。红外光谱吸收气体检测技术是通过检测待测气体对红外光谱能量吸收来实现气体浓度检测的技术, 这种检测方法具有检测灵敏度高、稳定性好等优点, 且由于光纤通信的发展, 红外波段光源及检测器件技术成熟、价格低廉, 且该波段处于光纤低损耗区, 因此应用红外光谱结合光纤传感技术可以实现目标气体远程实时检测。这种气体检测方法可以应用于石油化工、煤矿坑道等现场有毒有害气体远程在线监测和预警等诸多方面<sup>[1-5]</sup>。

为了实现待测气体与光波间相互作用, 传统做法是使光波透射通过传感气室, 或使光波在传感气室内多次反射来实现, 典型的有 White 腔和 Herriott 腔吸收池, 但这种传感气室体积大且稳定性差<sup>[6-8]</sup>。而空芯光子晶体光纤是一种纤芯为大空气孔, 包层为周期性排列小空气孔结构的特种光纤, 因此该种光纤在传光的同时还可以充当气体吸收池。文中利用 NKT Photonics 公司生产的 HC-1550-02 型空芯光子晶体光纤(Hollow Core-Photonic Crystal Fiber, HC-PCF)代替传统气体吸收池, 因为该光纤具有弯曲损耗低、传光效率高、端面几乎无非涅尔反射等优点, 从而可以极大地减小传感气室体积, 结合 HC-PCF 与普通单模光纤透镜耦合技术便可实现全光纤型远程在线监测传感系统。对气体吸收光谱的检测有多种方法, 如直接检测法、差分检测法、谐波检测法等<sup>[9-12]</sup>, 该实验系统采用单波长双光路差分检测法。这种方法是通过检测传感光路与参考光路间差分信号来反演气体浓度, 相比于直接检测单光路透射光强, 该方法可以有效地减小或消除因光源输出光功率波动以及检测电路温度漂移等带来的影响。

LabVIEW 是美国国家仪器公司(National Instruments, NI)开发的虚拟仪器软件平台, 可以实现信号处理、仪器控制和数据采集等诸多功能, 还可方便快捷地开发出类似仪器的操作界面, 从而缩短工程技术人员实验系统开发时间。因此文中应用LabVIEW 软件平台, 结合 NI 生产的 PXI 5922 型可变分辨率模数转换卡实现数据采集和信号实时处理。

## 1 实验原理和实验系统

### 1.1 Beer-Lambert 定律

当一束宽谱光源平行透射过具有吸收特性的气体时, 气体分子会选择性地吸收特定波长的光, 从而形成透射吸收谱。Beer-Lambert 定律便描述这种吸收作用的基本定律, 其表达式如下:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)e^{-\alpha(\lambda)LC} \quad (1)$$

式中:  $I(\lambda)$  为经过气体吸收后的透射光强, 单位: mW;  $I_0(\lambda)$  为激光器入射光强, 单位: mW;  $\alpha(\lambda)$  表示一定压力和温度条件下, 单位长度光程单位浓度气体对光的吸收, 也称吸收系数, 单位: cm<sup>-1</sup>;  $L$  为气体与光相互作用的长度, 单位: cm;  $C$  为待测气体体积百分数。

由于吸收系数  $\alpha(\lambda)$  在一定温度和压力下只与入射光波波长有关, 因此只要温度、压力不变, 以待测气体特征吸收波长入射, 且初始入射光光强  $I_0(\lambda)$  一定的情况下, 只需检测出透射光强便可得到待测气体浓度信息。

### 1.2 实验系统

应用 Beer-Lambert 定律, 通过直接检测透射光强得到气体浓度的方法称为直接吸收检测法, 其实验系统简单, 但由于透射光强容易受到光源输出光功率波动、光电转换放大滤波电路和数据采集电路温度漂移的影响, 从而大大降低其检测精度, 为此设计了如图 1 所示的差分吸收间接检测系统。

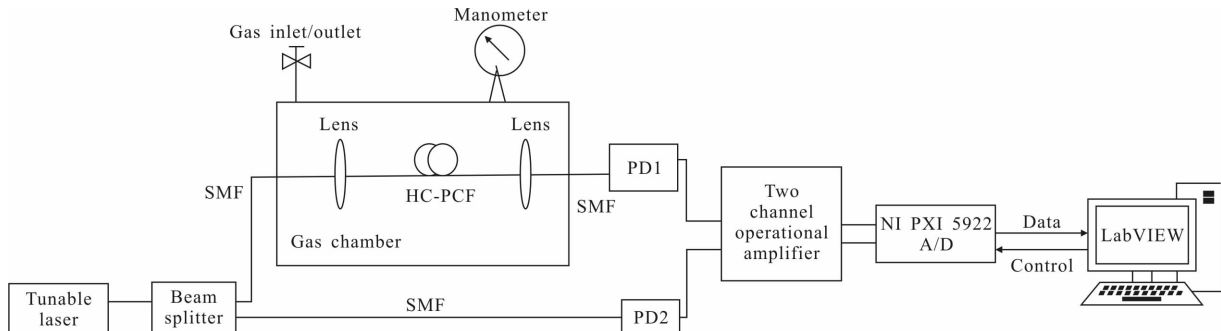


图 1 实验装置

Fig.1 Experimental setup

该实验系统使用气罐为厚 10 mm,直径 250 mm,高 200 mm 的铝质圆柱状结构。HC-PCF 长 1.8 m,其纤芯为直径 10 μm 的大空气孔,包层区是由周期性排列的六边形空气柱组成的光子晶体,包层直径为 120 μm,包层小空气孔间距 3.5 μm。光源为 NETTEST 公司生产的可调谐外腔激光器,型号 Tunics Plus CL。可调谐光源、3 dB 光纤分束器、HC-PCF、聚焦准直透镜以及光纤适配器构成系统光路部分。实验中光源输出光功率一定,经 1×2 的 3 dB 光纤分束器分为两束,一束光经过气罐中 HC-PCF 称为传感光路,另一束光直接到达光电探测器为参考光路。图 2 所示为气罐内 HC-PCF 两端与单模光纤间通过透镜耦合的技术。单模光纤(Single-mode fiber, SMF)和 HC-PCF 分别固定在光纤陶瓷插针内,SMF 和扩束透镜通过套在外周的套筒构成准直光路部分;HC-PCF 和聚焦透镜间通过胶固定构成聚焦光路部分,期间并留有约 1 mm 间隙,气体可由此进入 HC-PCF 内;准直光路和聚焦光路部分被固定在底座上。

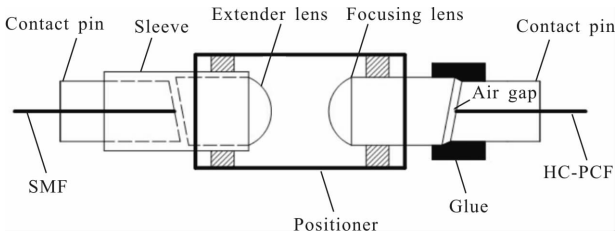


图 2 HC-PCF 和 SMF 透镜耦合连接结构

Fig.2 Structure of lens-coupling connection between HC-PCF and SMF

实验中所用气体为标准浓度 CO<sub>2</sub> 气体,其背景气体为氮气,根据 HITRAN(High-resolution transmission molecular absorption database) 数据库,CO<sub>2</sub> 气体对波长 1 572~1 573 nm 范围的光有强吸收作用,而氮气、氧气、甲烷等常见气体在该波段无吸收作用,因此选择这一波段作为检测 CO<sub>2</sub> 吸收的波段。实测传感光路总损耗小于 4 dB,参考光路总损耗小于 1 dB。传感光路和参考光路的光信号经过砷化镓 PIN 光电探测器进行光电转换,电信号再由双通道增益可调斩波放大滤波电路进行预处理,该预处理电路是基于 Texas Instruments 公司斩波稳零运放 TLC2652 设计的,最大电压增益 3 000,低通滤波截止频率 300 Hz。经过放大滤波的两路电压信号被送入 NI PXI 5922

进行模/数转换。计算机对采集到的数据进行实时信号处理和存储,并对数据采集卡进行实时控制,这两个过程是通过虚拟仪器 LabVIEW 软件编程实现的。

## 2 差分检测法

若以下标 *s* 表示传感信号,*r* 表示参考信号,*I*<sub>0</sub> 为光源输出光功率,*K*<sub>*s*</sub> 和 *K*<sub>*r*</sub> 分别为光纤分束器两路输出分光系数, $\alpha_s$  和  $\alpha_r$  表示两路光电探测器 PIN 的光电转换效率,*A*<sub>*s*</sub> 和 *A*<sub>*r*</sub> 为双通道放大电路对应增益,则斩波放大电路输出电压 *U*<sub>*s*</sub> 和 *U*<sub>*r*</sub> 可分别表示为:

$$U_s = \alpha_s A_s K_s I_0 e^{-\alpha L C} \quad (2)$$

$$U_r = \alpha_r A_r K_r I_0 \quad (3)$$

为了减小由于光源输出功率 *I*<sub>0</sub> 波动以及电路温度漂移等带来的影响,对采集到的电压 *U*<sub>*s*</sub> 和 *U*<sub>*r*</sub> 做如下处理:

$$\ln \frac{U_s}{U_r} = -\alpha L C + k_0 \quad (4)$$

式中: $k_0 = \ln(\alpha_s A_s K_s / \alpha_r A_r K_r)$ ,同时为了使传感光路与参考光路性质尽可能一致,实验中使用的光电探测器 PIN 为同一厂家生产且型号相同,双路斩波放大电路结构对称,所用元件也为同一厂家生产,材料型号参数一致,并调节两路放大倍数一致,即 *A*<sub>*s*</sub> = *A*<sub>*r*</sub>,因此理论上,在一定波长范围内  $k_0 \approx 0$ 。对两路信号做如上处理后得到气体浓度的方法即为差分检测法。

图 3 为温度 24 °C,压力 0.1 MPa,入射光波长 1 572~1 726 nm,CO<sub>2</sub> 气体浓度分别为 2%、5%、10%、100%时差分检测法 CO<sub>2</sub> 吸收谱。

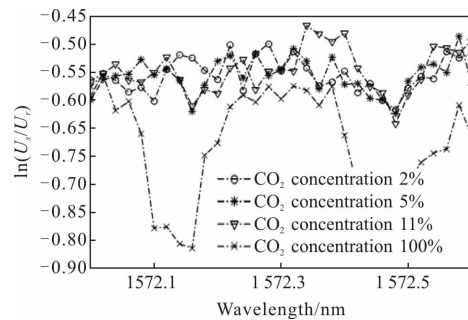


图 3 CO<sub>2</sub> 吸收谱

Fig.3 CO<sub>2</sub> absorption spectrum

由图 3 可知,ln (*U*<sub>*s*</sub>/*U*<sub>*r*</sub>) 值反映了 CO<sub>2</sub> 气体对不同波长光强选择吸收特性,且在波长 1 572.48 nm 处有较明显且稳定的吸收峰,因此以该波长作为 CO<sub>2</sub> 气体浓度检测的特征吸收波长。

### 3 实验过程及结果

以下实验开始前,先向气罐内充入 CO<sub>2</sub> 气体至压力表显示为 0.1 MPa,观察 1 h 测试气罐密封性,并在 LabVIEW 中设置 PXI 5922 数据采集参数,采集速率 10<sup>6</sup> samples/second(分辨率 22 bit),每采集 5×10<sup>5</sup> 个数据取平均。

#### 3.1 HC-PCF 中气体填充实验

由于 HC-PCF 纤芯空气孔尺寸较小,气体在其中的填充速度较慢,从而影响整个传感系统的响应速度,因此实验中将 HC-PCF 置于密封气罐中,使待测气体能从两端同时进入 HC-PCF,从而加速气体在 HC-PCF 中的填充速度。根据 Jes Henningsen 和 Jan Hald 研究成果<sup>[13]</sup>,待测气体在 HC-PCF 纤芯区的填充时间不仅和纤芯直径、光纤长度有关,还和充气压力以及待充气体粘度有关,在充气压力 0.1 MPa 时,纤芯内气体流动应符合动力流模型,结合所使用 HC-PCF 几何尺寸以及 CO<sub>2</sub> 相关参数可得到充气过程约需 100 s。

为了通过实验验证这一过程,固定可调谐光源输出波长为 1 572.48 nm,输出光功率为 0.66 mW,实验 CO<sub>2</sub> 气体浓度 100%,在充气过程中实时存储值  $\ln(U_s/U_r)$ ,如图 4 所示,气体在 HC-PCF 中填充过程的曲线。

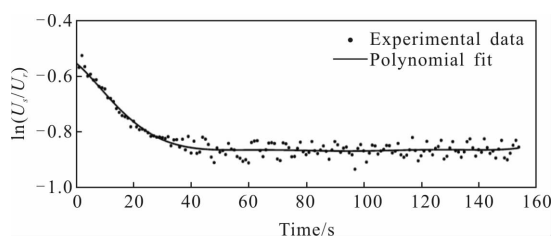


图 4 100% 浓度 CO<sub>2</sub> 气体在 HC-PCF 中填充过程

Fig.4 Filling process in HC-PCF with CO<sub>2</sub> concentration 100%

因为实验中随着气罐充气开始,HC-PCF 中气体填充过程也随即开始,为了能实时监测 HC-PCF 在恒压 0.1 MPa 的填充过程,气罐应尽可能快地充气至 0.1 MPa,由于实验所用气罐体积较大,该过程用时约 8 s。因为 HC-PCF 两端与陶瓷插针间存在微小间隙,若气罐充气速度较快,即使在气罐压力达到 0.1 MPa 后关闭了气罐进气阀,其内部气流也会继续

对 HC-PCF 两进气端产生冲击,从而导致 HC-PCF 与 SMF 间光耦合效率发生变化,最终引起出射光强相对值产生波动。因此气罐充气速度过快是引起该实验数据波动的直接原因,所以短时间内监测的实验数据波动并未明显减弱。

#### 3.2 标定实验

为了确定实验  $\ln(U_s/U_r)$  值与气体浓度间关系,分别采用浓度为 2%、5%、10%、100% 的标准 CO<sub>2</sub> 气体对系统进行标定实验。考虑到气罐充气速度较快时,气流扰动会引起实验数据波动,标定实验中气罐充气采用缓慢均匀充气,10 min 使气罐充气至实验压力 0.1 MPa。由于每次气罐充气压力可能与 0.1 MPa 存在偏差,而气体压力的改变会引起气体吸收峰值中心波长的漂移<sup>[10]</sup>,所以以下通过检测不同浓度 CO<sub>2</sub> 气体在波长 1 572.30~1 572.60 nm 范围内吸收谱,并以该波段范围内吸收峰值作为某一浓度 CO<sub>2</sub> 气体的相对吸收值,以此实现系统标定。

实验首先设置可调谐激光器波长调节步长为 0.02 nm,输出光功率 0.66 mW,之后按如下步骤进行实验。

Step 1: 气罐抽真空至负压 0.06 MPa,排除空气干扰;

Step 2: 缓慢向气罐充入某一浓度 CO<sub>2</sub> 气体,10 min 气罐压力至 0.1 MPa,后关闭气罐进气阀并等待约 100 s;

Step 3: 以 0.02 nm 为间隔,可调谐激光器输出波长由 1 572.30 nm 变化至 1 572.60 nm,每个波长存储  $\ln(U_s/U_r)$  值,如此重复 10 次;

Step 4: 气罐泄压后,更换另一浓度 CO<sub>2</sub> 气体重复 Step 1~Step 3。

以上实验温度为 23~25 °C。实验结果表明:在波长 1 572.30~1 572.60 nm 范围内, $\ln(U_s/U_r)$  的峰值均在波长 1 572.48 nm 附近。对每个浓度值下 10 组吸收谱提取峰值  $\ln(U_s/U_r)$  并计算其平均值,对所得平均值与相应 CO<sub>2</sub> 气体浓度值作线性最小二乘拟合,结果如图 5 所示,实验数据和拟合数据对应点误差平方和 SSE=4.1299×10<sup>-6</sup>,说明线性拟合精度较高。

在检测未知浓度 CO<sub>2</sub> 气体浓度时,只需检测出波长 1 572.48 nm 附近峰值  $\ln(U_s/U_r)$  按拟合的线性模型就可计算出气体浓度。

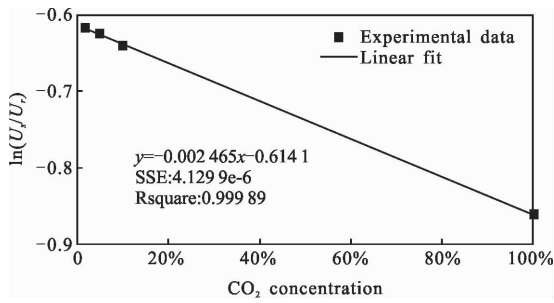


图 5 差分检测法 CO<sub>2</sub> 气体吸收曲线

Fig.5 CO<sub>2</sub> absorption curve by differential detection methods

### 3.3 检测稳定性和相对误差

在与标定实验相同的条件下，按标定方法间隔 10 min 对每个浓度 CO<sub>2</sub> 气体进行检测，表 1 为不同浓度 CO<sub>2</sub> 气体检测值和平均值。设第 *i* 次检测的浓度为 *c<sub>i</sub>*，10 次浓度检测平均值为  $\mu$ ，则可由如下公式(5)计算的标准差  $\sigma$  值衡量在 100 min 内系统检测稳定性。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} (c_i - \mu)^2} \quad (5)$$

式中： $\mu = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} c_i$

设标准 CO<sub>2</sub> 气体浓度 *C<sub>s</sub>*，检测相对误差可由公式(6)的  $\delta_r$  表示：

$$\delta_r = \left| \frac{C_s - \mu}{C_s} \right| \quad (6)$$

不同二氧化碳浓度的  $\sigma$  值  $\delta_r$  值如表 2 所示，由该表可知在 100 min 内系统检测最大相对误差为 2%，最大标准差为 3.32%。

表 1 CO<sub>2</sub> 浓度实验数据

Tab.1 Experimental data of CO<sub>2</sub> concentration

<i>C<sub>s</sub></i>	2%	5%	10%	100%
1	1.41	4.73	10.03	101.2
2	2.18	4.77	10.36	99.42
3	2.1	4.85	10.56	99.26
4	2.1	4.97	10.44	99.75
5	2.02	5.05	10.48	100.51
6	2.02	5.01	10.36	103.02
7	2.18	4.97	10.03	100.6
8	2.18	4.93	9.75	98.45
9	2.22	5.37	9.59	98.86
10	1.98	5.5	9.79	98.29
Average	2.04	5.01	10.14	99.94

表 2 系统检测性能

Tab.2 Performance of system detection

<i>C<sub>s</sub></i>	2%	5%	10%	100%
$\mu$	2.04%	5.01%	10.14%	99.94%
$\sigma$	0.23%	3.32%	0.33%	1.37%
$\delta_r$	2.00%	0.20%	1.40%	0.06%

### 3.4 检测灵敏度

定义传感器的灵敏度为传感器输出增量与被测输入增量之比，该系统为传感光路出射光强变化与气体浓度变化的比值。

在近红外波段，由于气体吸收系数较小，满足  $\alpha LC \ll 0$ ，由公式(1)Beer-Lambert 定律可得：

$$I \approx I_0(1 - \alpha LC) \quad (7)$$

对公式(7)两端取微分后可得灵敏度为：

$$s = \frac{\Delta I}{\Delta C} \approx -I_0 \alpha L \quad (8)$$

传感光路输入光功率为 0.33 mW，标定实验拟合直线斜率  $\alpha L = 0.2465$ ，截距为 0.6141，而由公式(4)知理论截距  $k_0 \approx 0$ ，这种差异主要是因为相比于参考光路，传感光路中 HC-PCF 两端与 SMF 间光耦合损耗引起的，由  $10 \times \log_{10}(e^{-0.6141}) \approx 2.67$  知，这一损耗至多为 2.67 dB，且认为 HC-PCF 两端光耦合损耗相同，则 HC-PCF 入射端光耦合损耗为 1.335 dB。因此可得检测灵敏度为  $330 \times 10^{-1.335/10} \times 0.2465 \times 10^{-6} = 5.9818 \times 10^{-5} \mu W/ppm$ 。

## 4 结论

文中以空芯光子晶体光纤为传感气室，应用 CO<sub>2</sub> 气体在 1572.5 nm 附近吸收线，基于近红外光谱吸收原理搭建了双路差分气体浓度检测实验系统。使用 1.8 m 长 HC-PCF 使系统检测灵敏度达  $5.9818 \times 10^{-5} \mu W/ppm$ ，采用 HC-PCF 两端同时充气，提高了系统响应速度。通过对不同标准浓度 CO<sub>2</sub> 气体进行多次测量，100 min 内系统检测相对误差不超过 2%，检测最大标准差为 3.32%。虽然该实验系统通过双路差分降低了因光源输出光功率波动以及检测电路温度漂移的影响，但由于气体吸收系数也会受被测气体温度以及压力的影响，且系统也无法消除气体分子对光的散射引起吸收的影响，这些

都是引起系统检测误差存在的主要因素。可以通过光源调制和谐波检测技术减小气体分子散射以及光源输出光强波动带来的影响,从而提高系统检测精度。

#### 致 谢:

文中空芯光子晶体光纤与单模光纤间透镜耦合技术由武汉光迅科技有限公司提供,感谢武汉光迅科技有限公司给予的技术支持和帮助。

#### 参 考 文 献:

- [1] Du Juan, Sun Yanguang, Chen Dijun, et al. Frequency-stabilized laser system at 1572nm for space-borne CO<sub>2</sub> detection LIDAR[J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(3): 88–92.
- [2] Wang J, Zheng L, Niu X, et al. Mid-infrared absorption-spectroscopy-based carbon dioxide sensor network in greenhouse agriculture: development and deployment [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(25): 7029–7036.
- [3] Spachos P, Hatzinakos D. Real-time indoor carbon dioxide monitoring through cognitive wireless sensor networks [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 16(2): 506–514.
- [4] Tang D L, He S, Dai B, et al. Detection H<sub>2</sub>S mixed with natural gas using hollow-core photonic bandgap fiber [J]. *Optik*, 2014, 125(11): 2547–2549.
- [5] Zheng Lingjiao, Niu Xintao, Wang Jianing, et al. Development and agricultural application of a mid-infrared carbon dioxide sensor system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(8): 150–157. (in Chinese)  
郑玲娇, 牛新涛, 王嘉宁, 等. 中红外二氧化碳传感器的研制及在农业中的应用[J]. *光子学报*, 2017, 46(8): 150–157.
- [6] Robert C. Simple, stable and compact multiple-reflection optical cell for very long optical paths [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(22): 5408–5418.
- [7] Anderson B L, Yu S. Robert cell-based optical delay elements for white cell true-time delay, devices [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(7): 1006–1014.
- [8] Nwaboh J A, Hald J, Lyngs J K, et al. Measurements of CO<sub>2</sub> in a multipass cell and in a hollow-core photonic bandgap fiber at 2 μm[J]. *Applied Physics B*, 2013, 110(2): 187–194.
- [9] Numata K, Chen J R, Wu S T, et al. Frequency stabilization of distributed-feedback laser diodes at 1 572 nm for lidar measurements of atmospheric carbon dioxide [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(7): 1047–1056.
- [10] Shao Junyi, Lin Zhaoxiang, Liu Linmei, et al. Measurement of CO<sub>2</sub> absorption spectrum around 1.572 μm [J]. *Acta Phys Sin*, 2017, 66(10): 130–137. (in Chinese)  
邵君宜, 林兆祥, 刘林美, 等. 1.572 μm 附近 CO<sub>2</sub> 吸收光谱的测量[J]. *物理学报*, 2017, 66(10): 130–137.
- [11] Li Lifeng, Yang Qing, Zhu Linquan. Detection of gas concentration based on infrared differential absorption [J]. *Mechanical Engineering and Automation*, 2010 (2): 203–205. (in Chinese)  
李利锋, 杨青, 朱林泉. 基于红外差分吸收法的瓦斯浓度检测研究[J]. *机械工程与自动化*, 2010(2): 203–205.
- [12] Xu Kang, Lv Shuyuan, Yang Yi. Research of CO<sub>2</sub> gas sensors based on photonic crystal fiber[J]. *Laser Technology*, 2017, 41(5): 693–696. (in Chinese)  
徐康, 吕淑媛, 杨祎. 光子晶体光纤 CO<sub>2</sub> 气体传感器的研究[J]. *激光技术*, 2017, 41(5): 693–696.
- [13] Henningsen J, Hald J. Dynamics of gas flow in hollow core photonic bandgap fibers [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(15): 2790–2797.