Methane Sensing System Based on Frequency-Shifted Interferometry Fiber Cavity Ring-Down Technology*

FAN Dian[1,2*], *CHEN Jiao*[1,2], *WU Zhiyong*[1,2], *ZHOU Ciming*[1,2], *OU Yiwen*[3]

(1. *National Engineering Laboratory of Fiber Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan* 430070, *China*;
2. *Wuhan University of Technology School of Information Engineering, Wuhan* 430070, *China*;
3. *School of Science, Hubei University of Technology, Wuhan* 430068, *China*)

Abstract: Coal mine accidents seriously threaten people's lives and property safety, and gas is the main culprit of coal mine accidents. Its main component is methane. Therefore, choosing a gas sensor with excellent performance and real-time detection of methane concentration is very meaningful for safe production and detection of atmospheric environment. Among many gas sensors, optical fiber gas sensors are favored by scholars and instrument manufacturers because of their advantages of large capacity, low loss, small size, corrosion resistance, and strong anti-interference ability. This article compares several kinds of optical fiber gas sensors. Optical fiber gas sensors based on spectral absorption technology are small in size, low in cost, and low in power consumption, and are most widely used. Based on the spectral absorption technology, a high-sensitivity detection technology, cavity ring-down technology has been developed. Compared with the common spectral absorption technology, the absorption path length is long, the sensitivity is 3~4 orders of magnitude higher, and the requirement for the strength of the light source is not high. However, in order to detect the ringing signal in an efficient and real-time manner, this technique requires a very high speed of the detector. In this paper, the frequency shift interferometric ring-down technique is studied. By combining the cavity ringing technique with the frequency shift interference technique, a frequency-shifting interferometric ring-down ringing methane sensing system is constructed, and the ring-down signal is converted from the time domain to the frequency domain. The requirements for detection equipment have been reduced, and experiments have verified that the system can be used for the measurement of methane gas concentration.

Key words: fiber optical sensing; frequency-shifted interferometry; cavity ring-down; methane; gas cell
EEACC: 7230 **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2019.01.026

基于频移干涉光纤腔衰荡技术的甲烷传感系统*

范 典[1,2*], 陈 矫[1,2], 吴志勇[1,2], 周次明[1,2], 欧艺文[3]

(1.武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 武汉 430070; 2.武汉理工大学信息工程学院, 武汉 430070;
3.湖北工业大学理学院, 武汉 430068)

摘 要: 煤矿事故严重威胁人们的生命和财产安全, 瓦斯作为煤矿事故的罪魁祸首, 其主要成分是甲烷。因此, 选择一种性能优良并且能够实时探测甲烷浓度的气体传感器对安全生产和检测大气环境是十分有意义的。在众多气体传感器中, 光纤气体传感器由于容量大、损耗小、体积小、抗腐蚀、抗干扰能力强等优势受到学者和仪器制造商的青睐。本文对比了几种光纤气体传感器, 基于光谱吸收技术的光纤气体传感器体积小、成本低、功耗小, 其使用最为广泛。在光谱吸收技术的基础上, 发展了一种高灵敏度的探测技术, 腔衰荡 CRD(Cavity Ring-Down)技术。相比于普通的光谱吸收技术, 其吸收光程长, 灵敏度高出 3 个~4 个数量级, 并且对光源强度稳定性要求不高。但是, 为了有效、实时地探测到衰荡信号, 该技术对探测器的速度要求极高。本文研究的频移干涉腔衰荡 FSI-CRD (Frequency-Shifted Interferometry Cavity Ring-Down)技术, 通过将腔衰荡技术结合频移干涉技术, 构建了频移干涉腔衰荡甲烷传感系统, 实现了衰荡信号从时间域到频域的转换, 降低了对探测设备的要求, 并通过实验验证了该系统可以用于甲烷气体浓度的测量。

关键词: 光纤传感; 频仪干涉; 腔衰荡; 甲烷; 气室
中图分类号: S951.41 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2019)01-0150-05

甲烷(CH_4)是一种最为常见的工业气体之一, 浓度低于 5%时易遇火燃烧, 高于 5%时即发生爆

项目来源: 国家自然科学基金项目(61775173, 61505152); 预研领域基金项目(6140243010116QT9001)
收稿日期: 2018-06-28 **修改日期**: 2018-09-21

炸,因而甲烷是目前引发矿井事故的主要原因之一。同时甲烷也是一种温室效应影响高于二氧化碳二十倍的有害气体[1]。因此,甲烷浓度的检测对于安全生产、预防灾害、维护生态平衡等具有十分重大的意义和深远的影响。目前应用较为广泛的甲烷浓度传感技术是光谱吸收传感技术[2]。该技术利用气体分子对光信号的吸收损耗与气体浓度成正比的特点来实现甲烷浓度的监测。但该技术测量的是一次吸收的光强,光源的瞬时功率代表光源的输出功率,因此对光源稳定度要求较高。腔衰荡[3] CRD(Cavity Ring-Down)技术与传统的光谱吸收技术类似,都是基于 Lambert-Beer[4] 定律,但腔衰荡技术中气体对信号光并不是一次吸收的,而是在腔内多次反复进行吸收,它测量的是信号光强度衰减的速率,而不是直接测量其衰减了多少。因此,相比与传统的光谱吸收技术,腔衰荡技术不仅使灵敏度得到了大大提升,可达 ppm 量级[5],而且也降低了光源功率的波动对测量误差的影响。然而腔衰荡技术也存在不足,其衰荡信号是随时间变化的信号,需要对光源进行脉冲调制,从而需要高速探测与快速采集。

作为一种新颖的光纤传感技术,频移干涉光纤腔衰荡技术将光纤腔衰荡技术与频移干涉技术融合在一起,利用差分频移干涉信号的相位与光环行距离成正比的特点,通过快速傅里叶变换将衰荡信号从时间域变换到频域,解决了传统腔衰荡技术对探测和采集设备要求过高的问题,同时也获得了灵敏度极高的优势[6]。中国计量学院提出的一种基于 Sagnac/Mach-Zehnder 混合干涉仪原理的光纤传感检测及定位系统[7],通过分布式光纤传感器获取由管道气体泄漏引起的光干涉信号,采用美国 NI 公司的数据采集卡和虚拟仪器软件 Labview 对检测信号进行采集和分析,实现管道气体泄漏检测。

南洋理工大学的 Ni N 等[8]首次提出了一个腔衰荡光纤放大环气体传感系统的精确模型。通过在系统中引入最小均方差适应滤波器,可以减小由引入掺铒光纤放大器(EDFA)而造成的放大器自发辐射(ASE)噪声,提高测量的灵敏度。2011 年,叶飞等人将频移干涉光纤腔衰荡技术应用于光纤弯曲损耗的测量,获得的损耗低达 0.013 5 dB[9]。次年,他们又利用该技术测量 1-辛炔溶液的浓度和折射率,探测极限为 0.29%[10]。2014 年,本课题组将基于磁流体的磁场传感器插入频移干涉光纤衰荡系统中,实现了磁场强度的测量,获得的分辨率为 0.001 05 dB/Gs[11]。2015 年,本课题组又结合频移干涉光纤腔衰荡技术与双波长差分吸收技术的优势,对乙炔气体的浓度进行了测量,测量误差小于 0.29%,分辨率达 7.812 5%/dB[12]。

本文提出将频移干涉光纤腔衰荡技术应用于甲烷气体的浓度检测。通过将光纤衰荡腔接入频移干涉 Sagnac 环中,制作光纤准直镜型微气室并采用快速傅里叶变换算法,实现了 0~4.0%范围内甲烷气体的浓度测量,验证了光纤腔内损耗与甲烷浓度的关系,与理论结果吻合良好。实验结果表明,该系统为甲烷气体的浓度测量提供了一种高灵敏度、简单经济的在线测量方法。

1　气体传感系统原理

基于频移干涉光纤腔衰荡技术的甲烷气体传感系统如图 1 所示。

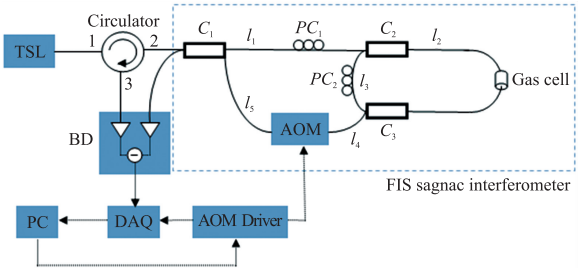

图 1　频移干涉腔衰荡传感系统框图

该系统包含光纤腔衰荡频移干涉干涉仪,可调谐激光器(TSL)、光纤环形器、声光调制器(AOM)及其驱动、平衡探测器(BD)、数据采集卡(DAQ)和计算机八个部分。其中,光纤腔衰荡频移干涉仪本质上属于光纤 Sagnac 干涉仪,通过在 Sagnac 环中不对称地一个插入频移器(这里为 AOM)、并且插入一个光纤衰荡环而构成,如图 1 中的虚线框所示。其中,C_1 为 50/50 光纤耦合器;C_2 和 C_3 是 99.5/0.5 的光纤耦合器;Gas cell 为微型气室。PC_1、PC_2 为偏振控制器。光纤耦合器一般用于光器件的连接或是用于实现光信号的分路、合路。本实验采用的是 2×2 单模光纤耦合器和两个 1×2 单模光纤耦合器,分别采用了分光比为 50∶50 和 99.5∶0.5 的两种耦合器。衰荡环内采用高分光比的耦合器,光进入衰荡环内大部分光在环内继续传输,小部分被气室吸收,增加了光在环内传输的圈数,使得实验结果更易于测量。

连续波光源发出频率为 ν 的激光经过环形器和耦合器 C_1 后,分成沿顺时针和逆时针方向传播的两束光。顺时针方向的传输光经过 l_1 先到达衰荡环,在环内经过气室到达 C_3,其中的大部分光经 l_3 继续在环内传输,小部分光从环内泄露出、由 l_4 经过 AOM 发生频移+f,最后到达 C_1。而逆时针方向的传输光则先经过 AOM 再到达衰荡腔,同样每转一圈

其中的大部分光在衰荡腔内继续传播,小部分光从 C_2 处输出经 l_2 到达 C_1。虽然两个方向上经过相同圈数的光束有着相同的光程,但是由于发生频移的位置不同,两者之间产生恒定的相位差从而形成干涉。在平衡探测器处,差分干涉信号的强度 ΔI 为

$$\Delta I \propto = \sum_{m=0}^{\infty} I_m \cos\left[2\pi \frac{n(md+l)}{c} f\right] = \sum_{m=0}^{\infty} I_m \cos(2\pi F_m f) \tag{1}$$

式中:$m(m=0,1,2,\cdots)$ 为光在衰荡腔内传播的圈数,n 为光纤纤芯的有效折射率,c 为真空中的光速,f 为声光调制器产生的频移量,I_m 为环行 m 圈后光信号的强度。由式(1)可知,差分干涉强度 ΔI 是关于 $F_m=\frac{n(md+l)}{c}$ 的余弦函数,其中 $L=md+l$ 是光在衰荡腔内传播的距离。通过对 ΔI 做 FFT 变换便可得到光强随传播距离 L 变化的空间域衰荡信号。定义光强衰减为初始光强 $1/e$ 时对应的距离为衰荡距离 L_τ,则可表示为:

$$L_\tau = \frac{d}{\alpha - \ln\kappa'} \tag{2}$$

式中:α 为气体的吸收损耗系数,$-\ln\kappa'$ 为无气体充入时衰荡腔的损耗系数(包含气室的插入损耗),即空腔传输系数。因此,空腔衰荡距离为:

$$L_0 = \frac{d}{-\ln\kappa'} \tag{3}$$

结合式(2)和式(3)可得气体的吸收损耗系数 α 为:

$$\alpha = \frac{1}{\zeta}\left(\frac{d}{L_\tau} - \frac{d}{L_0}\right) \tag{4}$$

因此,以 dB 为单位的气体吸收损耗可写成:

$$\delta_{\text{gas}} = 10\lg e \cdot \alpha = 10\lg e \cdot d\left(\frac{1}{L_\tau} - \frac{1}{L_0}\right) \tag{5}$$

由于气体的吸收损耗与气体的吸收系数 ζ、气体浓度 C 及气室的长度 l_0 成正比,即

$$\delta_{\text{gas}} = 10\log e \cdot \zeta C l_0 \tag{6}$$

气体的浓度可以表示为:

$$C = \frac{\delta_{\text{gas}}}{10\lg e \cdot \zeta l_0} \tag{7}$$

2 甲烷吸收峰及吸收系数

由光谱吸收的基本原理 Lambert-Beer 定律:

$$I_0(\lambda) = I_i(\lambda)\, e^{-\alpha(\lambda) l} \tag{8}$$

由式(8)可知,光强衰减快慢与气体的吸收系数 μm 相关,不同的气体分子有不同的特征 μm。并且,同一气体在不同波长下的吸收系数也不同。为了更显著地得到气体吸收的衰荡信号,更精确地测量气体的浓度,波长地选择也就至关重要。

甲烷气体的振动基频为 $\nu_1=1\ 305.9\ \text{cm}^{-1}$、$\nu_2=1\ 533.3\ \text{cm}^{-1}$、$\nu3=3\ 018.9\ \text{cm}^{-1}$、$\nu_4=2\ 913.0\ \text{cm}^{-1}$,对应光谱吸收区的波长为 $\lambda_1=7.66\ \mu\text{m}$、$\lambda_2=6.52\ \mu\text{m}$、$\lambda_3=3.31\ \mu\text{m}$、$\lambda_4=3.43\ \mu\text{m}$,在这些波长处有较强的吸收。但由于该波段是光纤的高损耗区,而未被用于实用当中。通过利用其泛频带 $2\nu_1$ 和组合带 $2\nu_1+\nu_2$,虽然它们的吸收要比基频带低很多,但它们位于石英光纤的低损耗区,更易于在光纤中传输,光源更常见、便于实现而被广泛地采用。通过上面的分析,我们选取波数范围为 4 000 cm^{-1}~10 000 cm^{-1}作研究分析。通过在 Hitran 数据库[13]下载波数范围为 4 000 cm^{-1}~10 000 cm^{-1}的数据,利用 javaHawks 软件模拟出在温度 300 K,标准大气压下甲烷的吸收强度谱线图。Hitran 数据库是由美国空军为军事目的研究大气的红外特性而开发的。其研究成果在气体遥感测量、大气微量气体弱吸收研究、雷达、激光传输研究等诸多方面有着广泛的应用。它由分子谱线的光谱参数组成的数据库以及基于这些参数的仿真软件 javaHawks 两部分组成。利用该数据库结合 javaHawks 软件,可以准确的模拟光在特定环境中的特性。

由波数和强度的关系图我们可以看出,在光纤通信窗口的波段 1 330 nm 和 1 650 nm 处,甲烷分子有较强的吸收谱。但在 1 330 nm 处,水分子对该波长也会有吸收作用。因此,可能会对实验结果造成一定影响。因此我们重点对 1650 nm 附近波段进行了研究。由 Hitran 数据库给出甲烷分子在波数范围为 6 000 cm^{-1}~6 100 cm^{-1}、温度 300 K,标准大气压下对应的谱线强度如图 2 所示。

根据 Hitran 数据库中提供的数据,最后我们选择的吸收峰为 1 653.722 nm。利用 MATLAB 模拟波长从 1600 nm 到 1 680 nm 范围处甲烷的吸收系数,最后得到吸收峰处甲烷的吸收系数为 0.19。

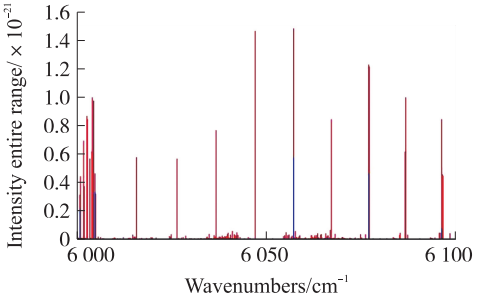

图 2 波数范围为 6 000 cm^{-1}~6 100 cm^{-1} 的谱线强度

3　实验过程及结果分析

实验系统框图如图 1 所示。TSL 光源(Santec TSL-510)的输出功率和波长分别设置为 8 mW 和 1 653.722 nm,其工作模式设置为窄线宽的相干模式。AOM(Brimrose AMM-100-20-25-1550-2FP)在 AOM 驱动器的控制下进行频率扫描,扫描的范围为 90 MHz~110 MHz,步进 0.02 MHz,对应的扫描时间间隔为 1 ms。平衡探测器(New Focus Model 2117)采用差分探测技术,可有效抑制背景噪声从而提高信噪比,其增益设置为 1×104。计算机内嵌的 Labview 程序用于实现 TSL 波长扫描、AOM 频率扫描与数据采集卡采集之间的同步,同时对采集卡(NI USB-6361)采集的数据做后续处理。由于干涉光的偏振态容易受到外界环境(如温度、震动、声音及压力等)的影响,实验过程中始终保持室温的稳定,使用两个偏振控制器调节偏振态,并将频移干涉衰荡腔密封起来,以隔绝外界因素的影响。

衰荡腔中插入的气室由一对间隔 5 cm 的渐变型光纤准直镜制作而成,如图 3 所示。其插入损耗约为 0.39 dB。该气室采用圆柱体型有机玻璃进行固化与封装,以保证气体的通行顺畅。为了获得不同浓度的甲烷气体,本实验中将浓度为 4% 的甲烷气体和纯氮气体一齐充入混气仪中,通过设置不同的流量比而获得。根据 HITRAN 数据库提供的信息可知,甲烷在 1 653.722 nm 吸收峰处的吸收系数 ζ 为 0.19 cm^{-1},故由式(6)可得甲烷吸收损耗与甲烷浓度关系的理论值为:

$$\delta_{gas}=10\lg e\times 0.19\times 5\times C\times\%=0.041\ 258\ 5C$$

这个理论值体现了甲烷浓度和腔内损耗之间的变化,即浓度每变化 1%,腔内损耗 0.041 258 5 dB。

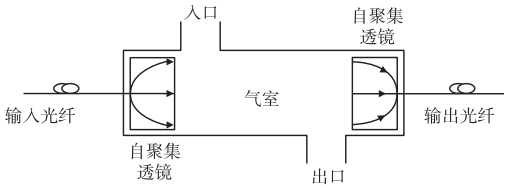

图 3　自聚焦透镜构成的气室结构

气室中每次充入一种浓度的气体时,都要持续充气 3 min 以上,以保证最近浓度气体的完全排除从而不影响其测量精度。测试每种浓度的气体时,重复测量 5 次后取其平均值,以进一步提高系统的测试精度。图 4 所示的即为一个平均之后所获得的时域干涉信号。可见干涉信号基本上随时间按照余弦规律变化。时域干涉信号经过一系列快速傅里叶变换、寻峰与拟合等处理,可以得到按指数规律衰减的衰荡曲线以及对应的衰荡距离,再结合式(5)便可以获得气体的吸收损耗。

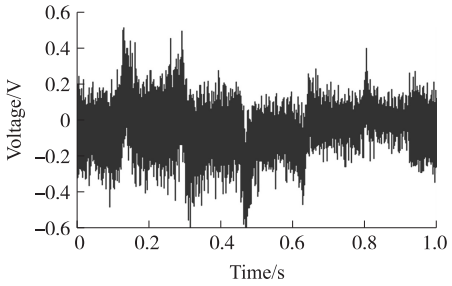

图 4　时域干涉信号图

系统充入纯氮气时所获得的衰荡信号如图 5 所示。由图 5 可知,两个相邻傅里叶峰之间的间隔约为 61 m,这和衰荡腔的实际长度 60 m 吻合良好。

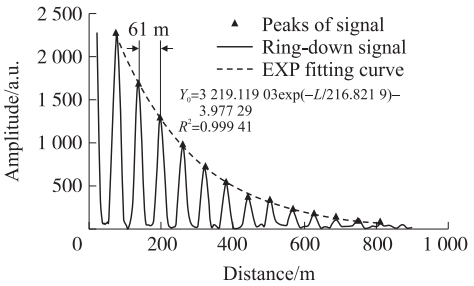

图 5　充入纯氮气时获得的衰荡信号及其拟合曲线

该衰荡曲线中有 14 个清晰可见的傅里叶峰,选取前 13 个峰来进行峰值提取与指数拟合,可得如图 5 中红线所示的指数衰减曲线。通过计算衰荡距离可知,充入纯氮气时的衰荡腔损耗即空腔损耗为 1.221 846 dB。接着依次向气室中通入 0.4%、0.8%,1.2%,…,4.0%等 10 种浓度的甲烷气体,可获得如图 6 所示的一系列指数衰减曲线。可见,浓度越高,信号衰减越快,说明衰荡距离越短,衰荡腔损耗越高。

将不同甲烷浓度下测得的衰荡腔损耗与甲烷浓度作线性拟合,可得到如图 7 所示的关系曲线。由图形可知随着甲烷浓度的增加,腔内损耗也呈线性增大。甲烷浓度和腔内损耗之间线性拟合的公式为,其中 x 为气体的浓度(%),y 为腔内损耗,该曲线的线性拟合度为 0.991 52,对应的该传感系统的灵敏度为 0.041 3 dB/%,这与理论值 0.041 258 5 dB/% 吻合。

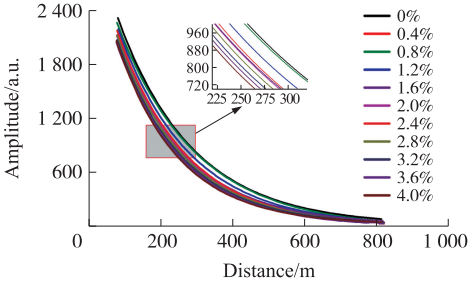

图 6　不同甲烷浓度下衰荡信号幅度随距离的变化

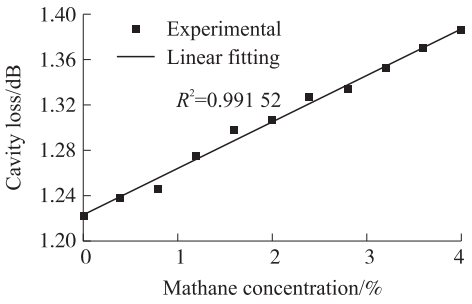

图 7 腔内损耗与甲烷浓度的关系曲线

由前面的分析可知,理论计算出的气体吸收损害和浓度的关系和实际拟合的斜坡度基本上一致。也就验证了该系统可以用于甲烷浓度的测量。

4 结论

本文提出并建立了一种基于频移干涉光纤腔衰荡技术的新型甲烷气体传感系统,并通过实验进行了验证。在众多甲烷气体传感技术中,基于光谱吸收的腔衰荡传感技术由于灵敏度高、对光源幅度涨落不敏感等优点而备受关注。由于光纤材料的优良性能,将光纤结合腔衰荡技术的光纤环形腔衰荡技术应运而生。其相比于传统的高反射镜腔衰荡,它体积小、结构简单、更易于实现。本文提出的频移干涉腔衰荡技术是将光纤环形腔衰荡结合频移干涉技术,实现了时间域到空间域的转换,不需要对连续波进行调制并且降低了对探测设备速度的要求。频移干涉腔衰荡作为一种新技术,能够实现对甲烷气体的传感。通过搭建实验平台,得到不同浓度下甲烷气体的衰荡曲线,对实验结果进行了分析验证。本文的主要工作及成果如下:

①对几种光纤气体传感技术作了比较,分析了其原理及优缺点。根据光谱吸收型技术的发展,重点对腔衰荡技术及频移干涉腔衰荡技术进行了深入的理论分析和研究。从理论上分析了频移干涉腔衰荡系统在光源和探测器上的优势,详细介绍了系统光路,并推导了其损耗的计算方法。

②对频移干涉腔衰荡系统进行了硬件选型和软件设计。制作了用于气体传感的气室,其插入损耗低,性能优良。介绍了相关硬件的原理及参数,并分析了会对实验系统造成影响的因素。介绍了软件流程图,详细介绍了 Labview 程序对数据的采集和处理过程。

③对甲烷气体吸收峰和吸收系数进行了研究,并得到相关数据。搭建实验平台,向气室内通入浓度为 0%、0.4%、0.8%、1.2%、1.6%、2.0%、2.4%、2.8%、3.2%、3.6%、4.0%的甲烷气体,得到衰荡曲线,计算相关损耗。分析其浓度和损耗对应的关系,拟合成一条直线,其斜率满足气体吸收理论,验证该系统可以用于甲烷气体浓度的测量。

参考文献:

[1] D'Amato F, Mazzinghi P, Castagnoli F. Methane Analyzer Based on TDL's for Measurements in the Lower Stratosphere: Design and Laboratory Tests[J]. Applied Physics B, 2002, 75(2): 195-202.

[2] 钟春兰. 光谱吸收型光纤气体传感器的研究和设计[D]. 厦门:厦门大学, 2009.

[3] O'keefe A. Cavity Ring-Down Optical Spectrometer for Absorption Measurements Using Pulsed Laser Sources[J]. Rev Sci Instrum, 1988, 59(12): 2544-2551.

[4] 胡平. 一种新型红外甲烷气体传感器的研究[D]. 上海:华东理工大学, 2015.

[5] Meijer G, Boogaarts M G H, Jongma R T, et al. Coherent Cavity Ring Down Spectroscopy[J]. Chem Phys Lett, 1994, 217(1/2): 112-116.

[6] Ye F. Frequency-Shifted Interferometry for Fiber-Optic Sensing[J]. School of Graduate Studies-Theses, 2014.

[7] 韩玲娟, 王强, 杨其华, 等. 基于分布式光纤传感的水下输气管道泄漏检测与定位分析[J]. 传感技术学报, 2015, 28(7): 1097-1102.

[8] Ni N, Chan C C, Xia L. Fiber Cavity Ring-Down Refractive Index Sensor[J]. Photonics Technology Letters, 2008, 20(16): 1351-1353.

[9] Ye F, Qi B, Qian L. Continuous-Wave Fiber Cavity Ring-Down Measurements Using Frequency-Shifted Interferometry[J]. Optics Letters, 2011, 36(11): 2080-2082.

[10] Ye F, Zhou C, Qi B, et al. Continuous-Wave Cavity Ring-Down Evanescent-Field Sensing with a Broadband Source Based on Frequency-Shifted Interferometry [J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2013, 184(8): 150-155.

[11] Hui Tian, Continuous-Wave Fiber Cavity Ring-Down Magnetic Field Sensing Method Based on Frequency-Shifted Interferometry [J]. Chinese Optics Letters, 2014.

[12] Tian H, Zhou C M, Fan D, et al. Continuous-Wave Frequency-Shifted Interferometry Cavity Ring-Down Gas Sensing with Differential Optical Absorption[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(3): 1-10.

[13] 胡慧铺, 徐晓洁, 张阿宏, 等. HITRAN 数据库在甲烷检测仪开发中的应用[J]. 微计算机信息, 2008, 24(28): 204-205.

范 典(1979-),女,武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室副主任,博士,副教授。2002 年进入武汉理工大学光纤中心开始硕士研究生学习;2005 年留校开始光纤传感方向研究;2009~2010 年美国弗吉利亚理工大学访问研究;2011 年武汉理工大学获得博士学位;2012 年受聘为副研究员,开始主持蓝宝石光纤高温传感研究,参与光栅阵列传感光纤网络研究。完成湖北省支撑技术一项,参与国家自然科学基金重大项目一项。荣获湖北省科技进步三等奖一项,授权发明专利 5 项,核心期刊论文十余篇。