

doi:10.3788/gzxb20184703.0306001

# 基于低增益低噪声光纤腔衰荡技术的湿度测量方法

王芳,杨亚萍,王旭,刘玉芳

(河南师范大学 电子与电气工程学院,河南 新乡 453007)

**摘 要:**提出了一种基于腔内带有低增益低噪声掺铒光纤放大器的光纤环形腔衰荡光谱技术测量湿度的方法,并进行了实验证明.比较分析了光纤环形腔中是否有掺铒光纤放大器对衰荡脉冲数量的影响.在掺铒光纤放大器中使用长度为 2 m 的低增益和低噪声掺铒光纤来减少波形失真并补偿腔内噪声衰减.利用光纤环腔衰荡光谱技术对空气相对湿度进行测量,记录分析环形腔中光脉冲的衰减时间  $\tau$  得到相对湿度的变化.结果表明:相对湿度和衰减时间  $\tau$  在相对湿度 30%~100% 的范围内满足良好的线性关系,并且光纤环腔衰荡系统的灵敏度和线性拟合度分别为 3.826 79  $\mu\text{s}/\text{RH}$  和 0.994 77.采用腔内带有低增益低噪声掺铒光纤放大器的光纤腔衰荡技术在工业检测、环境检测以及医学诊断等领域进行湿度测量将具有良好的应用前景.

**关键词:**光纤腔衰荡;低增益低噪声;掺铒光纤放大器;气体室;湿度测量

中图分类号:O433.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)03-0306001-6

## Humidity Measurement Based on Low Gain and Low Noise Fiber Cavity Ring-down Spectroscopy

WANG Fang, YANG Ya-ping, WANG Xu, LIU Yu-fang

(College of Electronic and Electrical Engineering, Henan Normal University, Xin'xiang, Henan 453007, China)

**Abstract:** A humidity measurement method based on a fiber loop cavity ring-down spectroscopy system with low gain and low noise erbium-doped fiber amplifier is proposed and experimentally demonstrated. The influence of an erbium-doped fiber amplifier placed inside and outside the fiber ring on the pulse curve and the number of pulse peaks in the annular cavity is analyzed. A length of 2 m low-gain and low-noise erbium-doped fiber in an erbium-doped fiber amplifier is used to reduce waveform distortion and compensate for the noise attenuation of the cavity. Measurement of relation humidity is performed with the fiber loop cavity ring-down spectroscopy system, and the change of relation humidity is gained by recording the ring-down time  $\tau$  of light pulse in the fiber loop. Results indicate that a good linear relationship is met between relation humidity and  $\tau$  in the range of 30% to 100%. The sensitivity and accuracy of the fiber loop cavity ring-down spectroscopy system are 3.826 79  $\mu\text{s}/\text{RH}$  and 0.994 77 respectively. So it can be employed for the fields of industrial detection, environmental inspection and medical diagnosis.

**Key words:** Fiber cavity ring-down; Low gain and low noise; Erbium-doped fiber amplifier; Gas cell; Humidity measurement

**OCIS Codes:** 060.2320; 220.4830; 230.2285; 230.5160; 240.6380; 300.6360

**基金项目:**国家自然科学基金(No.61475043),河南省高等学校重点科研项目计划(No.14B510014)河南师范大学资助项目(No.201310476046)资助

**第一作者:**王芳(1972—),女,教授,硕导,主要研究方向为光纤传感和光电探测技术.Email: fddd1012@163.com

**通讯作者:**刘玉芳(1963—),男,教授,博导,主要研究方向为激光测量和原子分子碰撞与光物理技术的研究.Email: yf-liu@htu.edu.cn

**收稿日期:**2017-10-09; **录用日期:**2017-11-24

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

随着工农业的发展和科学技术的进步,湿度测量显得越来越重要,国防科技、医药、仓储、农业等行业对湿度都有非常严格的要求,对湿度传感器的环境适应性以及测量范围、响应速度、测量精度等主要指标的要求也越来越高<sup>[1-3]</sup>.光纤湿度传感器有光纤渐逝波湿度传感、光纤光栅湿度传感、光纤法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)腔湿度传感等.光纤渐逝波湿度传感器结构紧凑,体积较小,适于现场测量<sup>[4,5]</sup>.但是空气湿度较大时测量精度较差,且随着湿度上升,需要其它测量方法辅助,因而测量范围还需要进一步研究.光纤光栅湿度传感器灵敏度较高,但是温度、弯曲、应变、折射率等交叉传感影响很大,解调困难,导致测量精度大大降低.光纤 F-P 腔湿度传感器可进行波长解调,但体积庞大、造价较高.而光纤腔衰荡技术湿度测量方法的发展可以克服这些缺点,该方法灵敏度高<sup>[6-8]</sup>、测量范围广、分析速度快、操作简单、成本低、方便实时监测,可用于测量空气相对湿度,为工业监测、环境监测、医学诊断等领域提供方便<sup>[9-12]</sup>.

作为全光纤系统,光纤环腔衰荡技术(Fiber Loop Cavity Ring-down Spectroscopy, FLRDS)的普遍缺点是光脉冲耦合到腔中时的耦合损耗,解决这个问题有效方法通常是采用掺铒光纤放大器(Erbium-doped Fiber Amplifier, EDFA)来补偿损耗并增加系统的衰减时间.目前,已经有带腔内光信号放大的光纤环形衰荡腔<sup>[13-17]</sup>.2010年, Ni N 等用带 EDFA 的腔衰荡长周期光栅对压力进行了测量,腔衰荡结果曲线衰减太快、峰值数量太少、实验测量数据少,测量精度低.2016年, Susana 等研究了光纤腔衰荡和增益放大效应,衰减波形底部出现上翘的问题,降低了测量结果的准确性.为解决这些问题,本文提出了一种基于腔内带有低增益低噪声 EDFA 的腔内放大方法,实现了湿度信号的高灵敏度和低成本测量.对比分析了 EDFA 放置在环形腔的内部和外部对脉冲曲线和脉冲数量的影响,并进行了湿度测量实验.

## 1 湿度测量原理

时域分析法通常是通过监测引入到光纤回路的光脉冲的衰减寿命来确定光纤环路内的光损耗.在 FLRDS 系统中,调制的脉冲光通过耦合器 1 进入光纤环路,然后在光纤环内多次往返,在每次往返过程中,由于腔内损耗少量的光会丢失,其结果是环形腔内的光随时间呈指数衰减<sup>[18]</sup>,光腔衰荡信号可表示为

$$I_t = I_0 \exp(-t/\tau) \quad (1)$$

式中  $I_0$  为初始光强,  $\tau$  为光腔衰荡时间.

指数衰减信号由光电探测器检测记录每次经过耦合器 2 的少量泄漏光得到.在湿度测量实验中,腔内衰减随着相对湿度的变化而变化,当环形腔内的损耗越低,衰减时间  $\tau$  越大.因此  $\tau$  反映了由相对湿度变化引起的损耗,并且可以通过测量  $\tau$  获得.光腔的衰减时间  $\tau$  被定义为光衰减到其初始强度的  $1/e$  所需的时间,该表达式为

$$\tau = \frac{nd}{cA} \quad (2)$$

式中,  $d$  为光纤环腔的长度,  $c$  为光速,  $n$  是光纤环腔的折射率,  $A$  是每次腔衰荡过程中的总损耗,包括衰荡腔固有损耗和水分子的吸收损耗.在光纤环形腔内,腔的固有损耗主要来自光纤环腔的吸收、光纤耦合器的插入损耗、光纤的散射损耗和光纤的连接损耗.

## 2 系统设计

### 2.1 实验结构

基于腔内放大的 FLRDS 系统湿度测量原理图如图 1.该系统的组成部分有:两个标准  $2 \times 2$  单模光纤耦合器(耦合比为 90:10)、一段长度约为 3.6 km 的单模光纤、一个掺铒光纤放大器用来提供增益,补偿光纤内部回路的损耗、两个隔离器、一个光纤对准气室,通过改变光纤对准室的内部湿度来观测衰减信号.一个中心波长为 1550 nm、带宽为 1 MHz 的蝶形分布反馈式半导体激光器作为激光源,激光二极管控制器的输出电流和温度分别设置为 101 mA 和 25 °C,然后由数字波形发生器产生的一系列脉冲波(1 kHz, 2 V, 14  $\mu$ s)通过“模拟调制输入”端口输送到激光二极管控制器调制成脉冲光,光电探测器和示波器用于监测每次往返的衰减信号和记录分析数据.

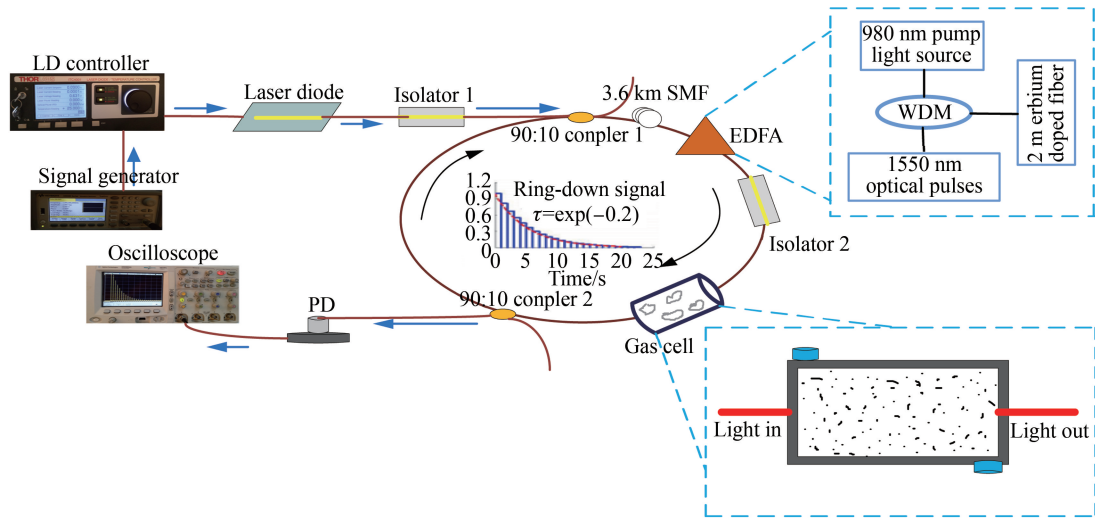


图 1 腔内放大的腔衰荡测量湿度系统实验结构

Fig.1 Schematic diagram of humidity measurement of FLRDS system based on cavity amplification, in which the inset

经过调制的脉冲光通过耦合器 1 的 10% 臂耦合到光纤环路中,围绕光纤环路循环,然后通过耦合器 2 的 10% 臂耦合到光纤环路外,而大多数光脉冲被保持在环形腔内,并继续在其中传输.衰减脉冲的输出周期性序列被光电探测器转换成电信号,最终显示在数字示波器上.在该衰荡系统中,隔离器用于确保信号单向传输,避免光源损坏.由于对准室中湿度的变化,腔内损耗增大,导致脉冲信号的衰减时间发生改变.为了提高衰减时间的测量精度,有必要增加脉冲峰值的数量.因此,使用掺铒光纤放大器补偿光纤回路内的损耗.

### 2.2 掺铒光纤放大器

掺铒光纤放大器在实验室采用掺铒光纤和 980 nm 泵浦激光器(LC962UF74P-20R/750mW, 974 nm Oclaro)通过 980/1 550 WDM 耦合器制作而成.图 2(a)是 EDFA 的增益谱.光谱仪(AQ6370C)的扫描范围是 600~1 700 nm,分辨率为 0.02 nm,且 EDFA 的增益谱在 1 550 nm 处比较平坦,不影响相对湿度的测量.通过不同长度掺铒光纤放大器的实验,选用长度为 2 m 的低增益低噪声的掺铒光纤(峰值吸收为 20.04 dB/m@980 nm).与常规光纤放大器所用铒纤相比,这种低增益低噪声的掺铒光纤,明显解决了衰荡腔内部增益不平衡的问题,即当增益过大时,衰荡腔会产生激光;增益过小时,衰减速度太快、脉冲个数少,降低了衰荡时间的测量精度,影响湿度的精确测量.

在相同条件下,放置在腔内和腔外的 EDFA 的衰减光谱如图 2(b).当 EDFA 放置在腔外时,衰减光谱的灵敏度为 0.016 31 V/μs,衰减速度快、峰值个数较少、脉冲曲线上升,不利于检测 τ;当 EDFA 放置在腔内时,衰减光谱的灵敏度为 0.028 57 V/μs,从图 2(b)中很容易地观察到放置在腔内的 EDFA 比腔外的脉冲信号的峰值强度更大、数量更多,更有利于检测到 τ,且解决了脉冲曲线上升的情况.EDFA 中 980 nm 泵浦光源功率的大小对衰荡结果影响较大,功率较小时衰荡信号非常微弱,功率较大时衰荡信号不稳定,经反复调试,采用 5 mW 的泵浦功率.与常规的腔衰荡信号处理相比,腔内带有 EDFA 的衰荡系统对湿度测量灵敏度的提高有很大改善.

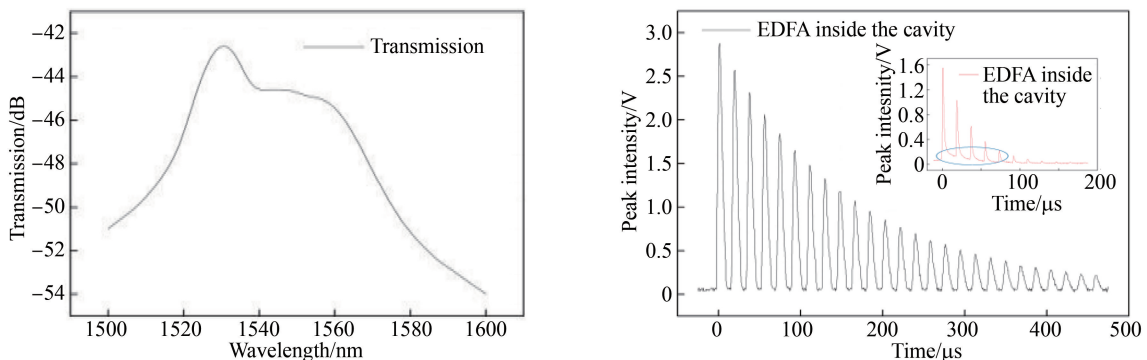


图 2 EDFA 增益谱和衰荡光谱

Fig.2 Gain spectrum and the ring-down spectrum of the EDFA

### 3 结果和讨论

基于对腔内和腔外信号放大的对比,采用腔内放大进行了湿度测量实验.实验测量过程中需要用到固定湿度环境测量,这里制作了不同浓度的饱和盐溶液来产生固定的湿度环境.由于湿度是温度的函数,温度的变化决定性地影响着湿度的测量结果,所以测试环境采用的实验室恒温 28 °C,能够避免温度带来的不必要的误差,提高测量准确性<sup>[19]</sup>.为了得到稳定的衰减波形,保持泵浦功率为 4.7 mW,通过示波器观察不同的输出脉冲,获得衰减时间  $\tau$ .由于环境湿度原因,仅对 30% 到 100% 相对湿度范围进行了实验.在气体室中放入温湿度计(工作电压 DC9-24 V,工作电流 110 ma(aver)@5 V)的外接探头,随着气体室中相对湿度的变化,温湿度计显示屏上相

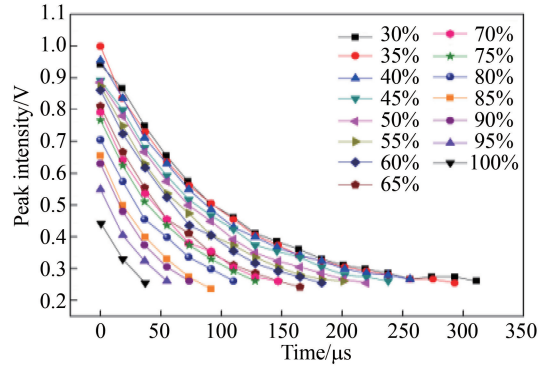
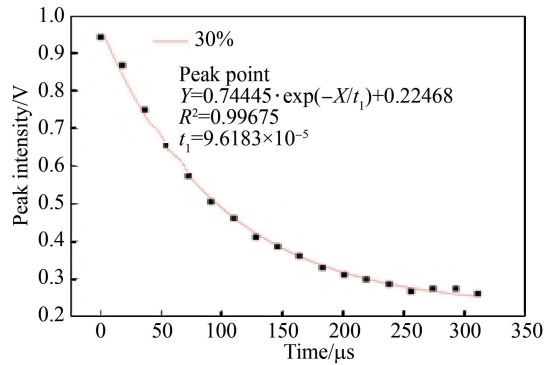
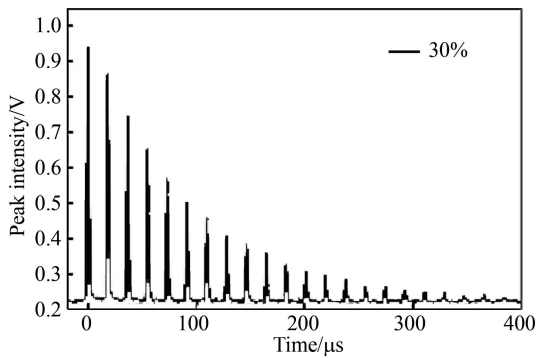


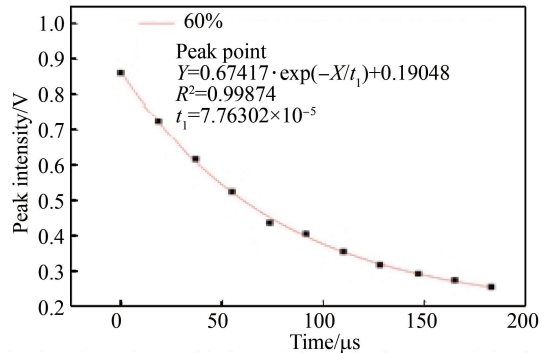
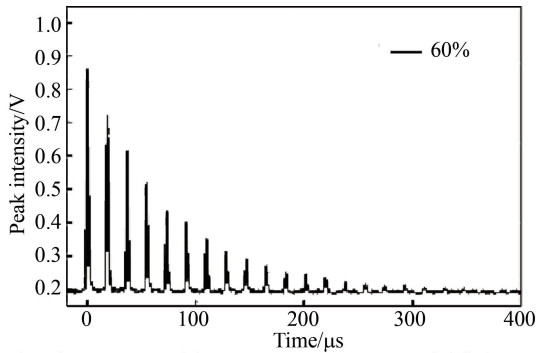
图3 脉冲峰值点的衰减曲线

Fig.3 Ring-down curves of the pulse peak points

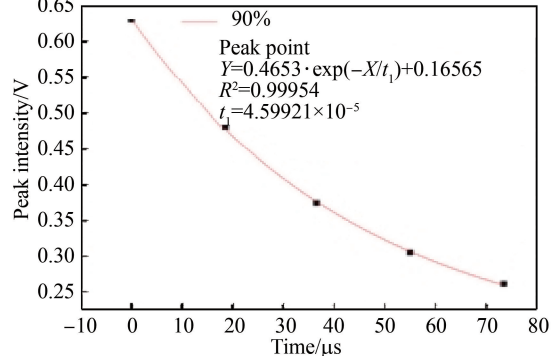
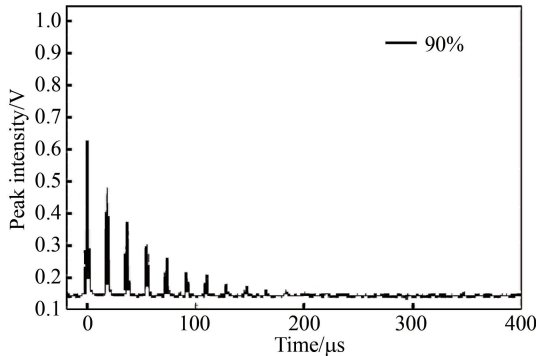
随着气体室中相对湿度的变化,温湿度计显示屏上相



(a) The ring-down curves of the FLRD system, Exponential fitting curves of the ring-down time with the peak intensity for 30% relative humidity



(b) The ring-down curves of the FLRD system, Exponential fitting curves of the ring-down time with the peak intensity for 60% relative humidity



(c) The ring-down curves of the FLRD system, Exponential fitting curves of the ring-down time with the peak intensity for 90% relative humidity

图4 不同相对湿度的 FLRDS 系统的衰减曲线、衰减时间  $\tau$  和峰值强度的指数拟合曲线

Fig.4 The three ring-down curves of the FLRD system, Exponential fitting curves of the ring-down time  $\tau$  with the peak intensity for different relative humidity

对湿度的数据实时显示,示波器显示的衰荡曲线也随之变化.通过拟合相对湿度与衰荡时间  $\tau$  的关系,发现衰荡时间可以反映相对湿度的变化.图 3 显示了 EDFA 在腔内时相对湿度间隔为 5% 的 15 组脉冲衰减曲线.可以很容易地注意到  $\tau$  随着相对湿度增加而减小.因此,根据上述讨论相对湿度能够通过测量对应的  $\tau$  得到.

为了进一步研究相对湿度和  $\tau$  的关系,实验拟合了相对湿度为 30%、60%、90% 的衰减曲线,如图 4 所示,从指数衰减曲线拟合的结果得出:衰减时间  $\tau$  是通过测量指数波形衰减到光强最大值的  $1/e$  得到的,分别为 311、183、73.5  $\mu\text{s}$ .

根据图 4,三个衰减曲线的标准方差( $R^2$ )分别为 0.996 75、0.998 74 和 0.999 54,表明拟合指数衰减曲线与实验数据吻合良好,然后通过测量不同相对湿度对应的衰减时间  $\tau$  获得了良好的线性度,如图 5.

从图 3 可以看出,相对湿度 30%~100% 的衰减时间  $\tau$  分别为 311、292、258、238、219、201、179、156、147、128、110、90.5、73.5、55、37  $\mu\text{s}$ .当 FLRDS 系统的其他参数恒定时,随着相对湿度的变化而导致环形腔内不同的光吸收.最终,所有这些因素都导致了  $\tau$  的变化,然后得到如图 5 所示的衰减时间  $\tau$  与相对湿度的关系,从图 5 可以看出, $\tau$  对应于湿度的变化呈现良好的线性响应,其灵敏度为 3.826 79  $\mu\text{s}/\text{RH}$  线性拟合标准方差 ( $R^2$ ) 为 0.994 77;通过十次重复实验,80% 相对湿度的再现性误差为 0.042 42,如图 6 所示.根据实验结果分析,该湿度最小测量误差可以达到 1% RH.然后对示波器输出的第一个峰值点强度进行数据处理,拟合曲线如图 7,相对湿度与第一峰值点强度呈指数关系,符合 1 550 nm 激光光源对水汽吸收规律,数据处理结果与理论分析相吻合.

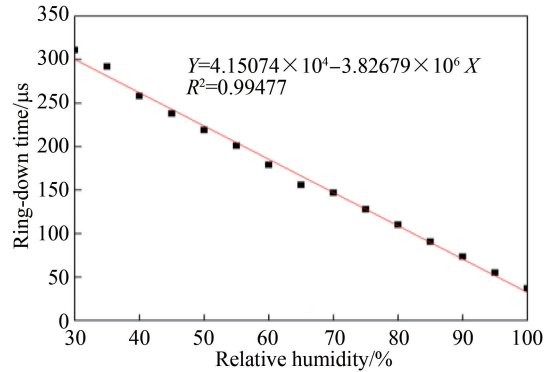


图 5 FLRDS 系统相应的衰荡时间  $\tau$  与相对湿度的关系  
Fig.5 Relationship of the corresponding ring-down time  $\tau$  of FLRDS system to relative humidity

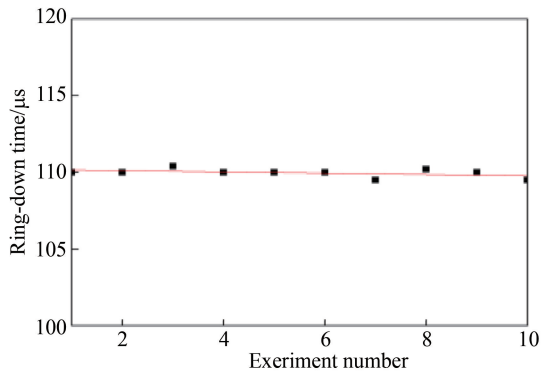


图 6 80% 相对湿度再现性实验曲线  
Fig. 6 Experiment curve of 80% relative humidity reproducibility

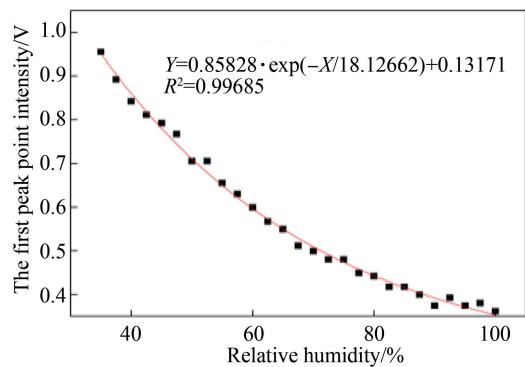


图 7 衰荡曲线第一峰值强度与相对湿度拟合曲线  
Fig.7 Exponential fitting curve of the first peak point intensity with relative humidity

## 4 结论

提出了一种基于腔内带有低增益低噪声 EDFA 的光纤腔衰荡光谱 (FLRDS) 技术进行湿度测量.实验结果表明,加入低增益低噪声掺铒光纤的 EDFA 在衰荡腔内进行信号放大时,能够增加了脉冲个数、提高湿度测量的灵敏度.该 FLRDS 系统的灵敏度为 3.826 79  $\mu\text{s}/\text{RH}$ ,线性拟合系数为 0.994 77,相对于毛发式、干湿球法,湿度测量精度更高,并且解决了光纤式传感测量高湿度中温度、应变等因素交叉传感的问题,提高了测量系统的稳定性.另外,该光纤环形腔衰荡光谱系统结构紧凑、成本低、便于实时测量,可用于测量空气相对湿度,为工业监测、环境监测、医学诊断等领域提供方便.

## 参考文献

- [1] MA Zhi-zhen. Research and introduction of optical fiber humidity sensor[J]. *Application of Power Technology*, 2012(10): 31-31.  
马智桢. 光纤湿度传感器的研究和介绍[J]. 电源技术应用, 2012(10):31-31.
- [2] PENG J, WANG W, Qu Y, *et al.* Thin films based one-dimensional photonic crystal for humidity detection[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2017, 263.
- [3] THOMAS P J, HELLEVANG J O. A fully distributed fibre optic sensor for relative humidity measurements[J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2017, 247.
- [4] LIU Ya-ping. Research on optical fiber CRDS technology and LPFG humidity sensor[D]. Nankai University, 2009.  
刘亚萍. 光纤 CRDS 技术及 LPFG 湿度传感研究[D]. 南开大学, 2009.
- [5] ZAHNG Xiang-dong, LI Yu-lin, PENG Wen-da, *et al.* Design and implementation of fiber Bragg grating temperature and humidity sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10): 1166-1169.  
张向东, 李育林, 彭文达, 等. 光纤光栅型温湿度传感器的设计与实现[J]. 光子学报, 2003, **32**(10):1166-1169.
- [6] LIAO Zhao-long, LIU Hong-liang, YANG Ming-hong, *et al.* Research on humidity sensor based on optical fiber F-P cavity[J]. *Science Forum*, 2010(4): 91-92.  
廖招龙, 刘宏亮, 杨明红, 等. 基于光纤 F-P 腔的湿度传感器研究[J]. 科协论坛, 2010(4):91-92.
- [7] CHEN H, KARION A, RELLA C W, *et al.* Accurate measurements of carbon monoxide in humid air using the cavity ring-down spectroscopy (CRDS) technique[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, **6**(4): 1031-1040.
- [8] CHEN B, WANG J, SUN Y R, *et al.* Broad-range detection of water vapor using cavity ring-down spectrometer[J]. *Chinese Journal of Chemical Physics*, 2015, **28**(4): 440-444.
- [9] ZHAN X, WANG Y L, LI L, *et al.* Determining critical relative humidity by measuring air humidity in equilibrium directly[J]. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2010, **41**(2): 383.
- [10] XIONG Y, MENG Q S, GAO J, *et al.* Effects of relative humidity on animal health and welfare[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, **16**(8): 1653-1658.
- [11] NI N, CHAN C C, WONG W C, *et al.* Cavity ring-down long period grating pressure sensor[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2010, **158**(2): 207-211.
- [12] ANDREWS N L P, LITMAN J, STROH D, *et al.* Near-infrared absorption detection in picolitre liquid volumes using amplified fibre loop ring-down detection[J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, **19**(6): 822-827.
- [13] ZHAO Y, CHANG J, NI J, *et al.* Novel gas sensor combined active fiber loop ring-down and dual wavelengths differential absorption method[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(9): 11244-11253.
- [14] ITTIARAH J V, SIDHIK S, GANGOPADHYAY T K. Refractometry using evanescent field based fiber loop ringdown spectroscopy[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2015, **223**: 61-66.
- [15] SUSANA, SILVA, REGINA, *et al.* Fiber cavity ring down and gain amplification effect[J]. *Photon Sensor*, 2016, **6**(4): 324-327.
- [16] ZHOU Sheng, HAN Yan-ling, LI Bin-cheng. Detection of trace water vapor by cavity ring down spectroscopy with 5.2  $\mu\text{m}$  quantum cascade laser[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, **36**(12): 3848-3852.  
周胜, 韩艳玲, 李斌成. 5.2  $\mu\text{m}$  量子级联激光器光腔衰荡光谱技术的痕量水汽检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, **36**(12):3848-3852.
- [17] TU Xiao-bo, CHEN Shuang, SU Tie, *et al.* Uncertainty analysis of OH concentration measurement by optical cavity ring down spectroscopy[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(2): 0239002.  
涂晓波, 陈爽, 苏铁, 等. 光腔衰荡光谱技术用于 OH 浓度测量的误差分析[J]. 红外与激光工程, 2017, **46**(2):0239002.
- [18] SHANG Qiu-feng, MAO Xun, ZHANG Lixin, *et al.* Research on a novel Rayleigh BOTDA system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(1): 0120001.  
尚秋峰, 毛训, 张立欣, 等. 一种新型瑞利 BOTDA 系统的研究[J]. 红外与激光工程, 2017, **46**(1):0120001.
- [19] WILKES A, WILLIAMS D. Measurement of humidity[J]. *Anaesthesia & Intensive Care Medicine*, 2015, **16**(3): 128-131.

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (No.61475043), the Key Projects of Higher Education in Henan Province(No.14B510014)and Funding from the Henan Normal University (No.201310476046)