

# 基于腔衰荡光谱技术的光纤微腔温度传感器

尚佳彬 张伟刚 魏石磊

(南开大学现代光学研究所光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

**摘要** 提出并实现了一种基于腔衰荡光谱(CRDS)技术的光纤微腔温度传感器。利用高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲技术在 1060 nm 单模光纤上直接刻蚀光学微腔,将其作为传感单元接入到光纤环谐振腔中,通过测量脉冲激光衰荡时间实现了温度传感。在 24 °C~93 °C 温度范围内,光纤微腔温度传感器灵敏度达到 83.36 ns/°C,实验测量结果具有良好的线性度。

**关键词** 光纤光学;腔衰荡光谱技术;光纤微腔;温度传感

**中图分类号** TN247;TP212.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0905004

## Temperature Sensor of Fiber Micro-Cavity Based on Cavity Ring-Down Spectroscopy Technology

Shang Jiabin Zhang Weigang Wei Shilei

(Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract** A temperature sensor of fiber micro-cavity based on the cavity ring-down spectroscopy (CRDS) technology is proposed and implemented. The micro-cavity on single mode 1060 nm fibers is achieved by direct writing with high-frequency CO<sub>2</sub> laser pulses. As a sensor unit, the fiber micro-cavity is accessed to the fiber-loop resonator. Temperature sensing is realized by measuring the ring-down time of the pulsed laser. In the temperature range of 24 °C~93 °C, the sensitivity of the temperature sensor is up to 83.36 ns/°C. Experimental results show good linearity.

**Key words** fiber optics; cavity ring-down spectroscopy technology; fiber micro-cavity; temperature sensing

**OCIS codes** 060.2370; 140.4130; 280.6780

## 1 引 言

腔衰荡光谱(CRDS)技术起源于 20 世纪 80 年代,它是一种基于测量稳定光学谐振腔内光强衰减速率原理的光谱吸收技术,也是目前最灵敏、功能最强大的光谱无标探测技术之一,已广泛应用于光谱测量、痕量分析、气相化学反应动力学、燃烧化学、半导体制造工业、环境监测以及医学诊断等方面<sup>[1]</sup>。

2001 年,Stewart 等<sup>[2]</sup>首次将光纤技术应用于 CRDS 之中。此后,光纤腔衰荡光谱(FCRDS)技术

受到了广泛关注,其研究和应用对吸收光谱检测和传感领域产生了很大的影响,新的研究成果不断出现。2006 年,Wang 等<sup>[3]</sup>将光纤布拉格光栅(FBG)作为温度传感部件接入光纤环中,实现了对环境温度的检测;2007 年,刘波等<sup>[4]</sup>采用 FBG 作为腔镜,利用 FCRDS 技术实现了对 FBG 之间弱调制长周期光纤光栅(LPFG)温度传感信号的解调;2009 年,张绮等<sup>[5]</sup>利用飞秒激光蚀刻光纤微腔,将微腔引入 FCRDS 系统进行流体检测,但未对温度进行感测;

**收稿日期**: 2011-02-14; **收到修改稿日期**: 2011-05-05

**基金项目**: 国家自然科学基金(10974100,10674075,60577018)、天津市应用基础与前沿技术研究计划重点项目(10JCZDJC24300)和光电信息技术科学教育部重点实验室开放课题资助课题。

**作者简介**: 尚佳彬(1976—),女,博士研究生,主要从事光子技术及光通信方面的研究。E-mail: shangjb@nankai.edu.cn

**导师简介**: 张伟刚(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事光子技术与现代光传感、新型光电子器件等方面的研究。

E-mail: zhangwg@nankai.edu.cn

2010年, Yang等<sup>[6]</sup>采用飞秒激光刻蚀微孔的方法写制布拉格光纤光栅, 并进行了温度传感测量, 其传感灵敏度为  $12.5 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ; 2010年, 张伟刚<sup>[1]</sup>提出引入外微腔结构可以实现新的 FCRDS 系统设计和传感功能。

$\text{CO}_2$  激光具有输出光束的光学质量高、相干性好、线宽窄、工作稳定等优点, 在长周期光栅写制、微米量级精度的精细加工及器件制备等方面得到了广泛应用<sup>[7]</sup>。本文利用高频  $\text{CO}_2$  激光脉冲技术在普通  $1060 \text{ nm}$  单模光纤上刻蚀光学微腔, 将其作为传感单元接入到光纤环谐振腔中, 成功地实现了一种基于 CRDS 的光纤微腔温度传感器。在  $24^\circ\text{C} \sim 93^\circ\text{C}$  温度范围内, 光纤微腔温度传感器灵敏度最高可达  $83.36 \text{ ns}/^\circ\text{C}$ , 实验测量结果具有良好的线性度。

## 2 $\text{CO}_2$ 激光脉冲刻蚀光纤微腔

高频  $\text{CO}_2$  激光脉冲刻蚀光纤微腔装置如图 1 所示。实验采用的  $\text{CO}_2$  激光器为深圳市大族激光科技股份有限公司生产的  $\text{CO}_2\text{-H10}$  型  $\text{CO}_2$  激光器。该激光器输出波长为  $10.6 \mu\text{m}$ , 最大输出功率为  $10 \text{ W}$ , 重复频率为  $5 \text{ kHz}$ , 激光光束经过  $\text{ZnSe}$  透镜聚焦后的光斑直径为  $50 \mu\text{m}$ 。微腔刻蚀采用激光器振镜线性扫描标记法打标实现, 实验打标次数为

2 次, 相应的激光器扫描速度为  $16.667 \text{ mm/s}$ , 能量密度为  $0.5 \text{ J}/\text{m}^2$ 。

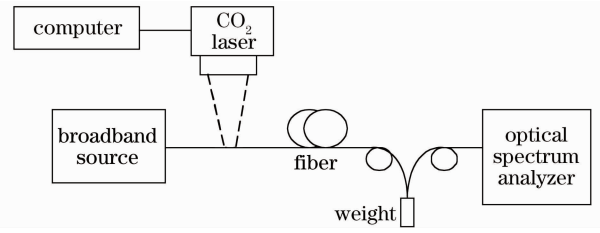


图 1 高频  $\text{CO}_2$  激光脉冲刻蚀光纤微腔装置

Fig. 1 Schematic diagram of etching the fiber micro-cavity with high-frequency  $\text{CO}_2$  laser pulses

光纤微腔刻蚀方法如下: 首先, 将  $1060 \text{ nm}$  单模光纤长约  $20 \text{ mm}$  的一段涂覆层剥掉, 水平放置在激光器聚焦透镜的焦平面上。然后, 将光纤的一端与宽带光源输出尾纤熔接在一起, 另一端通过活动接头与光谱仪相连以监测微腔谱线的变化; 由于光纤在  $\text{CO}_2$  激光加热过程中可能产生物理延长, 因此需悬挂重物以保证光纤在刻蚀过程中处于平直状态。最后, 通过设定释放时间的大小控制激光束的能量密度, 即可在线完成不同深度微腔的刻蚀。图 2 为实验刻蚀的光纤微腔, 这是在光学显微镜下放大 400 倍的显微照片。显然, 光纤表面被刻蚀的凹槽为弧形浅腔, 属于一种外微腔结构, 其深度约  $10 \mu\text{m}$ , 弧形开口最大处宽度为  $50 \mu\text{m}$ 。

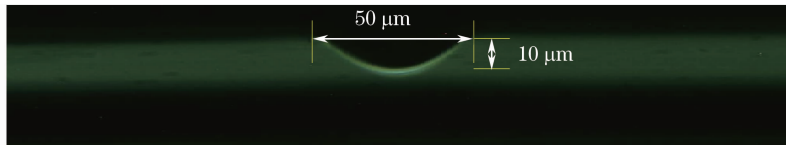


图 2 光纤微腔显微照片

Fig. 2 Picture of the fiber micro-cavity

在实验中, 由于激光器的单脉冲激光能量固定, 对微腔的加热、刻蚀过程是激光释放时间内多脉冲的累积效应, 因此可通过改变激光脉冲的释放时间来控制激光的能量。  $\text{CO}_2$  激光脉冲的偏转由专门的 HAN'S LASER Marking System 软件控制, 采用 CorelDraw 软件预先设计好光束扫描轨迹, 计算机即可自动控制光束进入光纤包层的深度、光斑半径和沿轴向的偏移距离, 因而能够满足各种微加工的需求。这种激光微加工方法还可应用于长周期和超长周期光纤光栅的写制, 其成栅过程表现为物理结构的微扰, 具有温度不敏感特性, 能够克服紫外曝光法写制光栅的性质不稳定缺点<sup>[8]</sup>。

## 3 光纤微腔温度传感器及原理

高频  $\text{CO}_2$  激光器发出的红外激光脉冲通过集中热量来蒸发物质, 由于脉冲持续时间长, 因此其热影响区的面积较大。由图 2 可以看出, 用高频  $\text{CO}_2$  激光脉冲刻蚀的光纤微腔, 其形状近似于高斯型, 由于其热影响区面积大, 不但在光纤表面刻蚀微腔, 还使得腔壁一定范围内的折射率受到调制, 使光纤微腔的热光系数增大, 因此用高频  $\text{CO}_2$  激光脉冲刻蚀的光纤微腔对温度变化更为敏感<sup>[9]</sup>。

基于 CRDS 技术的光纤微腔温度传感器结构如图 3 所示。系统工作波长为  $1060 \text{ nm}$ 。该传感器工作原理如下: 首先, 调节激光二极管(LD)抽运激

光器(LPSJ200),使之输出脉冲宽度为 50 ns、重复频率约为 5 kHz 的脉冲序列。随后,脉冲序列经耦合器 1 的 1%输入端输入由两个 99:1耦合器所构成的光纤环内,光脉冲在光纤环内每绕行一周即会经过用于温度传感的光纤微腔一次,同时载有光纤微腔温度传感信息的脉冲激光从耦合器 2 的 1%输出端输出,窄脉冲序列每绕行一周,其强度都将有所衰减。最后,光电探测器(DET01CFC/M)将探测到的光信号转换成电信号并显示在示波器(YOKOGAWA, DL9140)上,此时接收到的就是一系列衰减的脉冲信号,通过检测衰荡谱即可获得温度变化的详细信息。

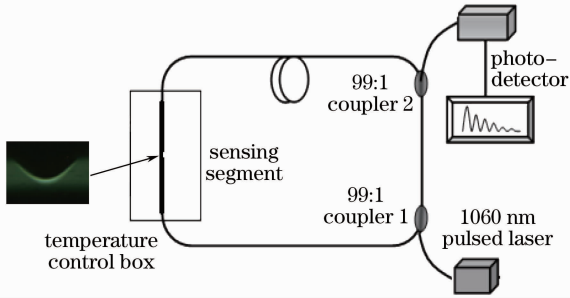


图 3 基于 CRDS 的光纤微腔温度传感器结构图

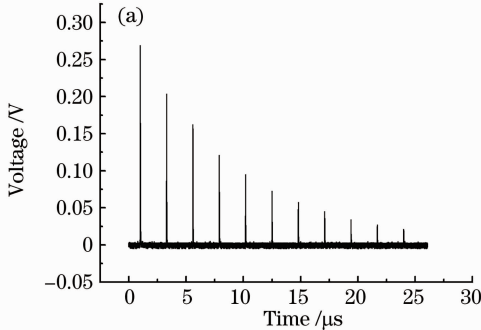
Fig. 3 Schematic diagram of temperature sensor of fiber micro-cavity based on CRDS

衰荡时间  $\tau$  被定义为光脉冲强度减小为其经光电探测器探测初始光强的  $1/e$  时所用的时间。FCRDS 系统探测到的输出光脉冲随时间  $t$  的变化规律为<sup>[5]</sup>

$$I_{\text{out}}(t) = I_0 \exp(-t/\tau), \quad (1)$$

式中  $I_0$  为初始光强。 $\tau$  由光纤环衰荡腔系统的损耗所决定,包括光纤传输损耗和耦合器插入损耗;当腔内加入传感介质后,其插入损耗也要考虑在内。于是,衰荡时间  $\tau$  又可以表示为

$$\tau = T/A, \quad (2)$$



式中  $T$  表示光脉冲绕光纤环一周所用的时间, $A$  表示光纤环衰荡腔的总损耗,可表示为

$$A = \alpha L - \ln T_{\text{sens}} - \ln T_{\text{conn}}, \quad (3)$$

式中  $\alpha L$  表示光纤对光的吸收损耗, $\alpha$  为纤芯材料与波长相关的衰减系数; $T_{\text{sens}}$  为系统中引入传感机制后光强透射率; $T_{\text{conn}}$  为耦合器的耦合比(即耦合器的透射率)。

理论分析表明,光纤环内的损耗与耦合器的耦合比、光纤的传输损耗以及传感机制引入的损耗有关<sup>[10]</sup>。因此,当光纤环路中接入传感机制(光腔)后,系统中光强透射率  $T_{\text{sens}}$  会有所改变,进而将光纤衰荡腔总损耗的改变通过衰荡时间的变化体现出来。随着温度的升高,腔壁附近的折射率发生变化,耦合到包层的一部分光耦合回纤芯,使系统的总损耗变小,衰荡时间增加。后面一系列对比实验的结果也验证了这一观点。

#### 4 光纤微腔温度传感实验结果

利用上述制作的微腔,在  $24\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 93\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度范围内进行了温度的衰荡谱传感测量。在同样的实验条件下,将光纤微腔置于温控箱中进行温度传感实验,重复测量经历 2 个过程:首先从  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$  慢升至  $93\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,然后再从  $93\text{ }^{\circ}\text{C}$  慢降至  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。期间,每  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  为一温度档,每个温度档采集 3 个数据,且每改变一次温度,均在温度相对稳定后停留 5 min 以上采集数据,以使光纤温度与环境温度基本一致,往复两次的实验结果重复性较好。

图 4 为光纤微腔温度传感的实验结果。其中,图 4(a)是由探测器探测到的衰荡谱,图 4(b)是根据(1)式对图 4(a)中的衰荡脉冲进行  $e$  指数拟合后获得的曲线,经计算可得衰荡时间  $\tau = 8707.03\text{ ns}$ ,其相关系数为  $R^2 = 0.99956$ ,显示出拟合曲线与测量

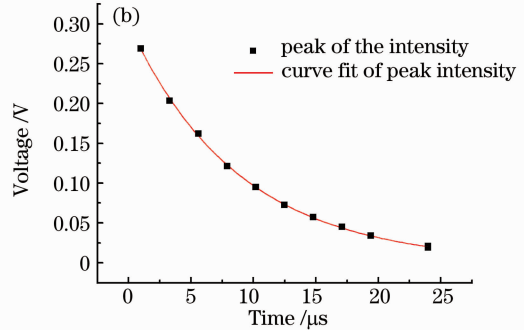


图 4 光纤微腔温度传感的实验结果。(a)探测器采集的衰荡谱信号;(b)衰荡谱信号峰值拟合结果

Fig. 4 Experimental results of the temperature sensor of fiber micro-cavity. (a) Intensity decay curves of CRDS probed by detector; (b) exponential decay curve fitting on the peak intensity

数据具有良好的-致性。图 5 为衰荡时间  $\tau$  与温度  $T$  的传感测量结果及其拟合曲线。其中,图 5(a)为没有接入光腔时衰荡时间与温度的关系图,实验结果表明,没有接入任何传感机制时的 CRDS 系统对温度变化是不敏感的,将深度为  $10\ \mu\text{m}$  的光腔接入

后,衰荡时间随温度升高线性增加,实验测量结果具有良好的线性度,线性拟合曲线与取样点的相关系数为  $R^2=0.996$ ,光纤微腔温度传感器灵敏度达到  $45.19\ \text{ns}/^\circ\text{C}$ 。

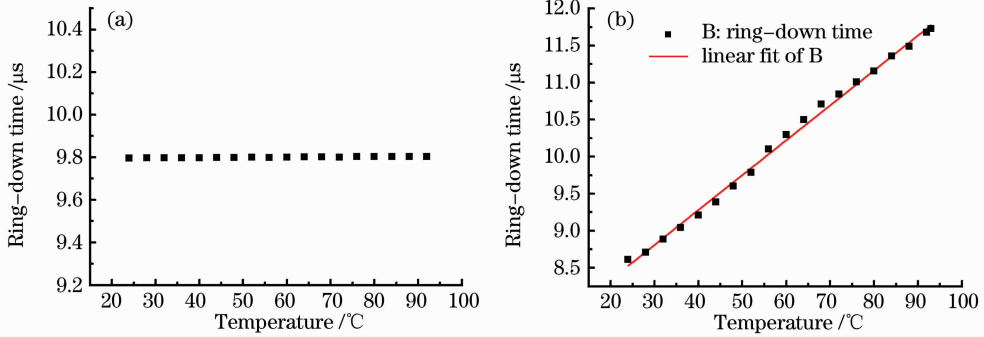


图 5 衰荡时间  $\tau$  与温度  $T$  的传感测量结果及其拟合曲线。(a)未接入光腔温度传感结果;  
(b)接入深度为  $10\ \mu\text{m}$  光腔温度传感结果

Fig. 5 Results and fitting curves of the ring-down time  $\tau$  and the temperature  $T$ . (a) Result without the fiber micro-cavity; (b) result with fiber micro-cavity depth of  $10\ \mu\text{m}$

在上述实验的基础上,又撰写了若干个光纤微腔,其弧形开口最大处宽度均为  $50\ \mu\text{m}$ 。将其中深度分别为  $19$ 、 $25$  和  $33\ \mu\text{m}$  的 3 个典型的微腔,分别接入 CRDS 系统中进行温度传感实验,其测量结果如图 6 所示。由图 6 可见,随着光腔深度的加深,能量损耗加大,衰荡时间明显减小,即同一温度下光腔深度越大,衰荡时间越短;但衰荡时间随温度升高线性增大的性质并未改变,且随光腔深度的加深,温度传感灵敏度亦逐渐加大。接入这 3 个微腔的光纤 CRDS 系统温度传感灵敏度分别达到  $59.77$ 、 $75.09$  和  $83.36\ \text{ns}/^\circ\text{C}$ 。线性拟合曲线与取样点的相关系数分别为  $0.998$ 、 $0.999$  和  $0.998$ ,结果显示线性度良好。

## 5 结 论

利用高频  $\text{CO}_2$  激光脉冲微加工技术,在  $1060\ \text{nm}$  单模光纤上刻蚀光学微腔,将其作为传感单元接入到光纤环谐振腔中,实现了一种基于 CRDS 技术的光纤微腔温度传感器。该传感器在  $24\ ^\circ\text{C}\sim 93\ ^\circ\text{C}$  温度范围内具有良好的线性度,温度灵敏度最高可达  $83.36\ \text{ns}/^\circ\text{C}$ 。该光纤微腔刻蚀方法具有高重复性、一次成型、制作简便、易于检测等特点,设计并刻蚀的光纤微腔不仅可用于温度传感,亦可应用于微流体的吸收检测,在环境监测、医疗诊断等方面具有广泛的应用前景。

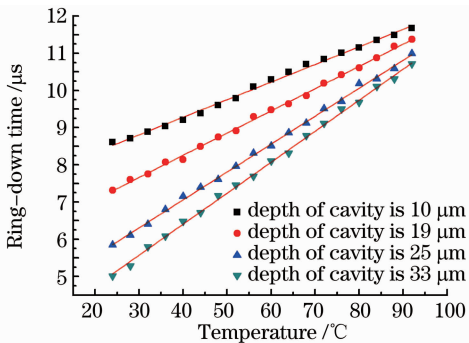


图 6 不同深度光腔衰荡时间  $\tau$  与温度  $T$  的传感测量结果及其拟合曲线

Fig. 6 Results and fitting curves of the ring-down time  $\tau$  and the temperature  $T$  with fiber micro-cavities of different cavity depths

## 参 考 文 献

- Zhang Weigang. Design on fiber cavity ring-down spectroscopy system and investigation on liquid sensing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(3): 030601  
张伟刚. 光纤腔衰荡谱系统设计及流体传感研究[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(3): 030601
- G. Stewart, K. Atherton, H. Yu *et al.*. An investigation of an optical fibre amplifier loop for intra-cavity and ring-down cavity loss measurements [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2001, **12**(7): 843~849
- Chuji Wang, A. Mbi. An alternative method to develop fibre grating temperature sensors using the fibre loop ringdown scheme [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2006, **17**(2): 1741~1751
- Liu Bo, Zhang Jian, Luo Jianhua *et al.*. Research on fiber grating sensing characters using fiber cavity ring down demodulation technique [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2007, **18**(9): 1043~1045  
刘波, 张键, 罗建花等. 基于光纤腔衰落解调技术的光纤光栅传感研究[J]. 光电子·激光, 2007, **18**(9): 1043~1045

- 5 Zhang Qi, Zhang Weigang, Zhang Jian *et al.*. Micro-cavity fabricated by femtosecond lasers and its application in fiber-loop ring-down spectroscopy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 713~717  
张 琦, 张伟刚, 张 健 等. 飞秒激光刻蚀光纤微腔及其在光纤环衰荡腔中的应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 713~717
- 6 Minwei Yang, D. N. Wang, C. R. Liao. Micro-holes integrated fiber Bragg grating for simultaneous and independent refractive index and temperature measurement[C]. Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP) 2010 Asia, 2010. 649~650
- 7 Zhu Tao, Rao Yunjiang, Mo Qiuju *et al.*. Study on characteristics of a CO<sub>2</sub>-laser-induced ultra-long-period fiber grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(9): 5287~5292  
朱 涛, 饶云江, 莫秋菊 等. 高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写入超长周期光纤光栅特性研究[J]. *物理学报*, 2007, **56**(9): 5287~5292
- 8 T. Zhu, Y. J. Rao, J. L. Wang. Characteristics of novel ultra-long-period fiber gratings fabricated by high-frequency CO<sub>2</sub> laser pulses[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **277**(1): 84~88
- 9 Yan Liu, Bo Liu, Hao Zhang *et al.*. Mach-Zehnder interferometer based on core-cladding mode coupling in single mode fibers[J]. *Frontiers of Optoelectronics in China*, 2010, **3**(4): 364~369
- 10 Liu Yaping, Zhang Weigang, Jiang Meng *et al.*. Fiber cavity ringdown spectroscopy and the latest progress[J]. *Progress in Physics*, 2008, **28**(4): 76~83  
刘亚萍, 张伟刚, 姜 萌 等. 光纤腔衰荡光谱技术及其最新进展[J]. *物理学进展*, 2008, **28**(4): 76~83