

文章编号: 0258-7025(2009)03-0713-05

飞秒激光蚀刻光纤微腔及其在光纤环衰荡腔中的应用

张 琦 张伟刚 张 健 刘卓琳 姜 萌 刘亚萍 林锦海

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

摘要 为了实现在光纤环衰荡腔(FLRD)系统中的微量气体液体传感,提出了利用飞秒激光微纳加工的方法加工微流体传感装置。利用800 nm的飞秒激光脉冲在普通980 nm,1550 nm的单模光纤上实现了直写光学微腔,微腔的宽度达到4 μm ,深度80 μm 。将在单模光纤刻蚀的光学微腔成功应用于光纤环衰荡腔系统之中。针对光纤环衰荡腔的系统装置,分析了该系统的探测原理,并对该系统应用于微流体吸收探测中所探测的衰荡时间、损耗及待测流体浓度的关系进行理论推导。利用此系统,实现了对微量流体浓度的吸收谱高灵敏度探测。

关键词 传感器; 光学微腔; 飞秒激光; 光纤环衰荡腔光谱

中图分类号 TN247; TP212.14 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093603.0713

Micro-Cavity Fabricated by Femtosecond Lasers and Its Application in Fiber-Loop Ring-Down Spectroscopy

Zhang Qi Zhang Weigang Zhang Jian Liu Zhuolin
Jiang Meng Liu Yaping Lin Jinhai

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

Abstract In order to realize the sensing probe of micro-scale liquid and gas in fiber cavity ring-down spectroscopy system, a new method of fabricating microfluidic sensing devices is proposed. The micro-cavity on single mode 980 nm and 1550 nm fibers by direct writing is achieved with a focused near-IR 800 nm femtosecond laser beam. The width of the cavity is 4 μm , with the depth of 80 μm . The micro cavity directly written by femtosecond laser is successfully applied into fiber-loop ring-down (FLRD) spectroscopy, and its detection principle is analyzed. It is used in micro-cavity liquid absorb detection, and the relation between the detected ring-down time, the loss and the liquid concentration is deduced. With this micro-cavity, FLRD spectroscopy can realize gas and fluidic absorption measurement on micro-scale.

Key words sensors; optical micro cavity; femtosecond laser; fiber-loop ring-down spectroscopy

1 引言

近年来,腔衰荡光谱(CRDS:Cavity Ringdown Spectroscopy)技术由于具有极高灵敏度及分辨率,且不受光源波动的影响^[1],这项新型光谱吸收技术

已经得到了广泛的关注与应用。CRDS技术不仅可以用于在气体强吸收带内进行气体的微量探测,也可以通过部分加压,实现对分子弱吸收的测量。同时CRDS系统结构也在不断发展。起初,CRDS系

收稿日期: 2008-12-10; 收到修改稿日期: 2008-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(10674075,60577018)资助课题。

作者简介: 张 琦(1984—),女,硕士研究生,主要从事光子技术及光通信方面的研究。

E-mail: miranda.cheung0501@gmail.com

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、新型光电子器件研究。

E-mail: zhangwg@nankai.edu.cn

统是由两个高反射镜组成的光学谐振腔建立的起来的^[2],通过探测腔内光强的衰落从而得到腔内的损耗信息。随后,利用光纤及光纤器件所实现的衰荡腔系统逐步发展起来。2002年,M. Gupta等^[3]提出了利用光纤布拉格光栅对形成高反射率腔进行气体吸收衰荡光谱检测。2007年,Liu Bo等^[4]应用光栅对衰荡腔技术进行了温度和压力的传感测量。2001年,G. Steward等^[5]第一次提出了光纤环衰荡腔系统,在系统中插入腔结构,用于吸收测量。Z. G. Tong以及H. P. Loock等^[6~8]利用光纤环衰荡腔系统并在系统中插入微流体器件,实现了对微流量液体高灵敏度检测。近期,又将光纤环衰荡腔系统与毛细电泳法相结合,利用光纤环衰荡腔系统进行吸收探测^[9]。H. P. Loock等应用毛细十字管、微十字管、光纤接头或光纤透镜作为微流体腔插入系统中,然而这些器件因准直困难,制作麻烦,不易一次成型等缺点,因此不适用于大批量标准化生产。

飞秒激光出现以来,人们利用其脉冲时间短、功率密度高以及可实现冷加工等特点,进行了飞秒激光超微细加工的理论与技术研究,实现了多种材料的亚微米级精度的精细加工和器件制备^[10~12]。在生物、化学、材料等领域中,经常需要对流体进行操作,如DNA样品的制备、聚合酶链式反应、电泳检测等操作都是在液相环境中进行的。如果要将样品制备、生化反应、结果检测等步骤集成到生物芯片上,则实验所用流体的量就从毫升、微升级降至皮升或纳升级,这时功能强大的微流体装置就显得必不

可少了^[13]。2007年,Haiyi Sun等^[14]应用飞秒激光加工技术在光波导上刻制微流体腔,并提出在腔内注入液体进行微流体传感。本文结合飞秒激光微加工技术,提出在普通单模光纤上制作微型光纤腔的方法。该方法有效地克服了以往光纤环衰荡腔技术中微流体器件制作的不足。利用飞秒激光直写方法,可制作腔长可控的微腔,操作简便,适于批量制作。并且,将制作的光纤微腔成功地应用于光纤环衰荡腔检测系统之中。

2 微腔加工系统

实验装置如图1所示。其中,激光中心波长为800 nm,脉冲宽度50 fs,重复频率为1 kHz,最大输出功率2 W,对应单脉冲能量为2 mJ。实验中使用了多个可变中性衰减片以降低脉冲能量,从而达到最佳实验结果。光束经显微物镜聚焦至样品。使用物镜为10×,NA为0.25,三维平移台移动精度1 μm。实验中使用的样品为980(The No. 46 Institute of CETC),1550单模光纤。通过计算机程序控制三维平移台,使飞秒激光在光纤上直接蚀刻微腔。

3 微腔加工过程

在微腔加工之前,首先研究了飞秒激光输出功率以及刻写速度对微腔腔长及刻写深度的影响。根据飞秒激光加工的阈值模型理论,飞秒激光加工的过程,主要是利用飞秒激光对材料的烧蚀作用,将飞

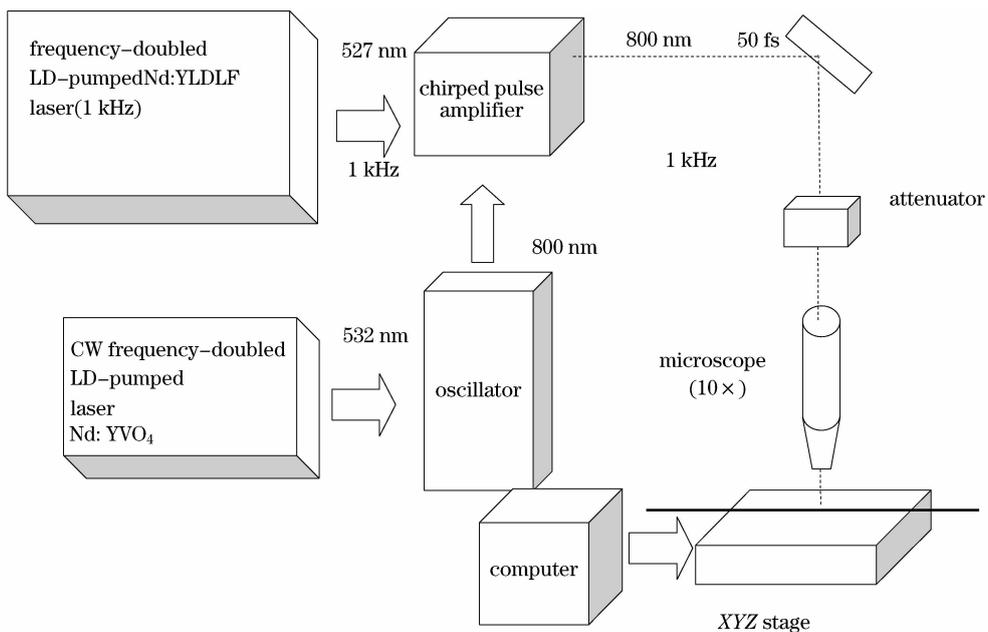


图1 飞秒激光直写金属反射光栅装置示意图

Fig. 1 Schematic setup of femtosecond laser direct writing

秒激光聚焦在被加工材料的表面或体内产生烧蚀,以便达到加工目的。研究表明,从连续波到几十皮秒脉宽,烧蚀过程是离子雪崩,且始于内部电子。在该脉冲范围内,烧蚀阈值常常有很大偏离,能量在很大范围内均可引起烧蚀。然而,对于给定的材料,飞秒脉冲的烧蚀阈值则是一个确定的值。飞秒激光只要能量密度达到一定值,就会发生烧蚀现象;低于该阈值,则不会。烧蚀从一个统计属性变为一种确定行为。因此,对于飞秒激光脉冲,可以适当控制其激光能量密度,使脉冲中心在很小区域的能量超过烧蚀阈值,得到比激光聚焦焦点还要小的特征结构^[15]。

在微腔加工过程中,首先将光纤涂敷层剥掉后将光纤固定在模板上,随后将模板固定在 3 维位移平台上;调整好刻蚀光路,使飞秒激光的焦点在模板表面,通过计算机控制三维平台移动,对光纤进行刻蚀。最后,通过调整激光功率及刻蚀次数,加工不同宽度及不同深度的微腔。实验中,飞秒激光系统加工参数如下:选择数值孔径 0.25,放大倍数 10× 的物镜;光纤直径 130 μm;计划刻蚀深度 70~80 μm。实验发现,在保持其他条件不变的情况下,不断降低激光输出功率或提高刻写速度,加工微腔的腔长将减小,刻蚀深度亦逐渐变浅。当激光功率降低到 0.05 μJ 时,显微镜下不能观察到微腔。即在此能量下,飞秒激光已无法对光纤产生烧蚀作用。同时,保持激光输出功率不变,通过增加飞秒激光刻写次数,来增加微腔刻写的深度。

光纤经过飞秒激光烧蚀后,利用光学显微镜,可以观察到刻蚀后的光纤侧面被烧蚀的痕迹。利用上述方法,制作了一个烧蚀深度约 80 μm,纤芯处腔长为 4 μm 的光纤微腔。图 2 为光学显微镜下放大 100 倍的光纤微腔的显微照片。图中黑色部分为光纤,中间凹槽为刻蚀的微腔。

4 光纤微腔感测

4.1 光纤环衰荡腔系统

设计并构建的基于微腔的光纤环衰荡腔系统如图 3 所示,该系统的工作波长为 1550 nm。系统的工作原理如下:首先用电光调制器(Mod 22212)对可调谐激光器(Santec TSL-210)输出的连续光进行调制,使之输出脉冲宽度为 20 ns,重复频率约为 1 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 1:99 耦合器(Lightcomm Technology)所构成的光纤环内,光脉冲在光纤环内

每绕一周,即经过用于流体传感的微腔一次,同时亦经耦合器 2 的 1% 输出端有少部分光脉冲能量被环外的光电探测器(Thorlabs FAG4)以及电流放大器(Conquer Optical Technology)接收。最后,经光电转换后,通过示波器观察衰荡谱,从谱中可以获得关于光纤环内损耗,其中包括用于传感的微腔内所探测物质的吸收损耗等的细致信息。

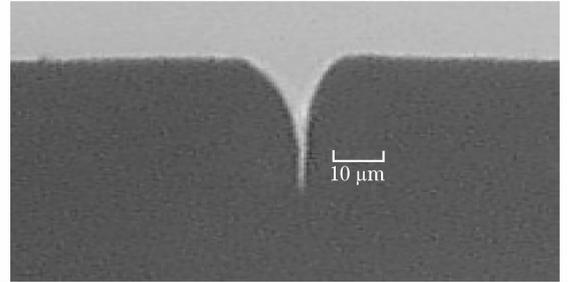


图 2 飞秒激光加工 1550 μm 单模光纤微腔显微照片
Fig. 2 Microgram of micro-cavity written on 1550 μm single mode fiber

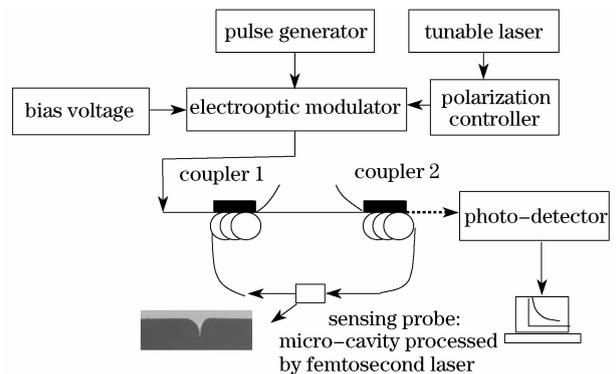


图 3 光纤环衰荡腔实验系统示意图

Fig. 3 Setup of fiber loop ring-down spectroscopy

4.2 衰荡腔系统理论分析

衰荡时间的定义为光脉冲的强度减小为其经光电探测器探测的初始光强的 1/e 时所用的时间。通过计算衰荡谱的衰荡时间来对光纤环内的损耗进行测量,因为衰荡时间仅与腔内损耗有关。可以用单 e 指数函数来表示探测器探测光强衰荡谱

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

其中 I_0, I_{out} 分别表示光脉冲的输入及输出光强, τ 即为衰荡时间,光纤环衰荡腔内总损耗与衰荡时间的关系为

$$\tau = \frac{T}{A} = \frac{L}{c_0 A}, \quad (2)$$

其中 T 为光脉冲经过光纤环一周所需时间, A 表示环内损耗, c_0 为光在光纤中的传播速度。

在衰荡腔内引入飞秒激光加工普通单模光纤形成的微腔作为传感单元,进行微流体传感时,经分析

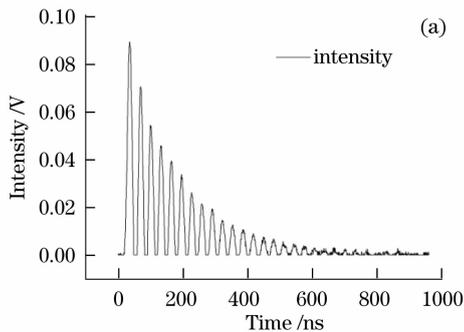
可以得出衰荡腔内的总损耗分为环内的固有损耗 A , 以及外部损耗 B 。其中, 参数 A 主要包括光纤环中两个耦合器的损耗, 光脉冲在长度为 6.67 m 的衰荡环中的传输损耗。外部插入损耗主要是由微腔本身的损耗 $-\ln T$ 以及微腔内的气体和液体对光的吸收所引入的吸收损耗 αd 。因此, (2) 式可表示为

$$\tau = \frac{nL}{c(A+B)}, \quad (3)$$

其中 n 表示单模光纤纤芯折射率 c 表示光在真空中的传播速度, 由朗伯-比尔定律

$$\alpha = \epsilon C, \quad (4)$$

其中 α 为物质的吸收系数, ϵ 为吸收物质的摩尔消光系数, C 为物质的摩尔浓度。于是, (3) 式可改写为



$$\tau = \frac{L + (n - n')d}{c(A - \ln T + \epsilon_{\text{solvent}} C_{\text{solvent}} d + \epsilon_{\text{solute}} C_{\text{solute}} d)}, \quad (5)$$

其中 n' 表示腔内物质的折射率。

综合(2), (5)式, 可以推出液体吸收损耗关系式为

$$\sum \epsilon C d = \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} \right) \frac{L + (n - n')d}{c}. \quad (6)$$

4.3 光纤微腔感测实验

利用上述制作的微腔, 可以进行衰荡谱感测实验。对二甲亚砜(DMSO)中的样品 DDCI 的浓度进行了探测。实验表明, 以 DMSO 作为溶剂, 在 1550 nm 波段其透光率接近 100% , 利用 FLRD 系统可以探测强吸收溶质 DDCI 的浓度。光纤环衰荡腔插入微腔前后衰荡谱的变化如图 4 所示。

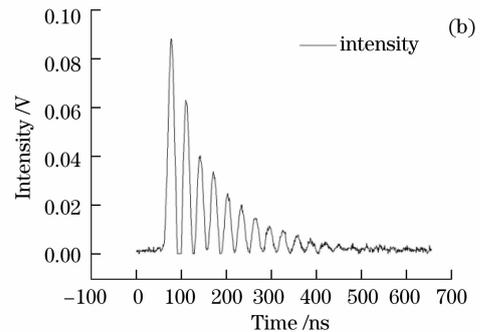


图 4 光纤环衰荡腔插入微腔前后衰荡谱的变化。(a) 光学腔插入前的衰荡谱; (b) 光学腔插入后的衰荡谱
Fig. 4 Ringdown spectroscopy before (a) and after (b) the micro-cavity inserted into the fiber loop of the FLRD system

由以上实验得到的衰荡谱并根据 e 指数函数(1)式, 拟合得到图 4 中微腔插入前后的衰荡时间分别为 144.6 ns 和 80.3 ns 。在光纤环衰荡腔系统中插入微腔, 导致环内损耗增大。实验表明, 随着 DDCI 浓度的增高, 腔内吸收损耗增大, 而相应的衰荡时间则变小。

5 结 论

利用飞秒激光加工技术, 在光纤上刻蚀了一种可应用于光纤环衰荡腔系统的微流量吸收腔, 制作的腔长可控制在 $5\text{ }\mu\text{m}$ 以内, 从而使光纤环衰荡腔系统可应用于微量流体(气体、液体)的高精度定量检测变为可能。并且, 提出的光纤微腔制作方法具有高重复性、一次成型、制作简便、易于检测等特点, 设计并实施的微腔流体检测系统可应用于微量量级的吸收检测, 这种新方法和新技术可广泛应用于微痕量光传感领域。

致谢 感谢南开大学现代光学研究所朱晓农教授、

刘伟伟教授对本项研究中实验部分的支持。

参 考 文 献

- 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
- A. C. R. Pipino, J. W. Hudgen, R. E. Huie. Evanescent wave cavity ring-down spectroscopy for probing surface process[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 1997, **280**(1-2):104~112
- M. Gupta, H. Jiao, A. O'Keefe. Cavity-enhanced spectroscopy in optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(21):1878~1880
- Liu Bo, Luo Jianhua, Kai Guiyun. Temperature and strain sensor based on weak LPG and fiber ring down[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2008, **50**(1):111~114
- G. Steward, K. Atherton, H. B. Yu *et al.*. An investigation of an optical fibre amplifier loop for intra-cavity and ringdown cavity loss measurement[J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, **12**(7):843~849
- Z. G. Tong, M. Jakubinek, A. Wright *et al.*. Fiber-loop ring-down spectroscopy: A sensitive absorption technique for small liquid samples[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, **74**(11):4818~4826
- M. Jakubinek, Z. G. Tong, S. Manzhos *et al.*. Configuration of ring-down spectrometers for maximum sensitivity[J]. *Canadian*

- Journal of Chemistry-Revue Canadienne De Chimie*, 2004, **82**(6):873~879
- 8 H. P. Loock. Ring-down absorption spectroscopy for analytical microdevices[J]. *Trac-Trends in Analytical Chemistry*, 2006, **25**(7):655~664
- 9 Runkai Li, Hans-Peter Loock, Richard D. Oleschuk. Capillary electrophoresis absorption detection using fiber-loop ring-down spectroscopy[J]. *Anal. Chem.*, 2006, **78**:5685~5692
- 10 Zhu Jiangfeng, Wei Zhiyi. Femtosecond laser micro-nano fabrication[J]. *Physics*, 2006, **35**(8):679~683
朱江峰, 魏志义. 飞秒激光精细微纳加工的研究进展[J]. *物理*, 2006, **35**(8):679~683
- 11 Yang Xichen, Wang Gang, Zhao Youbo *et al.*. Femtosecond laser processing of arrayed micro holes of metal filtration membrane[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(8):1155~1158
杨洗陈, 汪 刚, 赵友博 等. 飞秒激光制备阵列孔金属微滤膜[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8):1155~1158
- 12 Xiaohui Sun, Changhe Zhou, Huayi Ru *et al.*. Laser writing system for fabrication of diffractive optics elements[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(1):4~6
- 13 He Fei, Cheng Ya. Femtosecond laser micromachining: frontier in laser precision micromachining[J]. *Chinese. J. Lasers*, 2007, **34**(5):595~622
何 飞, 程 亚. 飞秒激光微加工: 激光精密加工领域的新前沿[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5):595~622
- 14 Haiyi Sun, Fei He Zenghui Zhou *et al.*. Fabrication of microfluidic optical waveguides on glass chips with femtosecond laser pulses[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(11):1536~1538
- 15 Sun Xiaohui, Zhou Changhe, Yu Bingkun *et al.*. The development of femtosecond laser processing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, **41**(9):37~45
孙晓慧, 周常河, 余曷鲲 等. 飞秒激光加工最新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, **41**(9):37~45