

文章编号: 0258-7025(2010)06-1450-06

碳纳米管涂覆的光纤环衰荡腔检测技术的初步研究

姜 萌 张伟刚 颜爱东 陶魁园 尚佳彬 李晓兰

(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 基于倏逝波理论,设计了一种不受温度影响的衰荡腔探测系统,对碳纳米管和光纤的集成进行了探索性研究。利用碳纳米管物理吸附特性及高温解吸附特性,实现了对气体及易挥发溶剂的在线测量。利用移除包层的方法,根据倏逝波理论适当地选择移除包层的尺寸,避免了系统损耗过大,同时又增大了对外界折射率的灵敏度。利用偏振相关锁模激光器提供了 2.5 ns,重复频率为 400 kHz 的短脉冲激光输入,实现了不受温度影响的高精度衰荡腔气体传感测量。

关键词 测量; 衰荡腔; 倏逝波; 气体传感; 碳纳米管; 浓度

中图分类号 TN253; TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103706.1450

Tentative Measurement Researches on Fiber Loop Ring-Down Cavity Coated with Carbon Nanotubes

Jiang Meng Zhang Weigang Yan Aidong Tao Kuiyuan Shang Jiabin Li Xiaolan

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

Abstract According to the evanescent wave absorption theory, a cavity ring-down spectroscopy detection system which is immune to temperature perturbation is presented. Study has been done to explore the integration of carbon nanotubes and optical fiber apparatus. The physical absorption and desorption characteristic of carbon nanotubes is utilized to realize the measurement of gas or volatile organic solvent (VOS). When fiber cladding is partially removed, the evanescent wave theory is utilized to select the appropriate diameter of fiber cladding, thus the system is sensitive to ambient refractive index and loss can be controlled. A pulsed laser beam with width of 2.5 ns according to the nonlinear polarization dependent mode locking technique is introduced into the ring-down system, and hence, our principle is validated by the highly-sensitive temperature-insensitive measurement of evanescent wave absorption loss.

Key words measurement; ring-down cavity; evanescent wave; gas sensing; carbon nano-tubes; concentration

1 引 言

腔衰荡光谱 (CRDS) 技术是近几十年发展起来的一种新型吸收光谱检测技术,具有极高的灵敏度和分辨率,且不受光源光强波动的影响,适用于微弱吸收光谱的测量,因而受到了广泛的关注和研究。1984 年 Anderson 等^[1]首次运用 CRDS 技术,成功地

在两个高反射镜形成的光学谐振腔中测量了低损耗高反射膜的反射率。其后,国内外研究者进一步发展了腔衰荡光谱技术并将其应用于原子、分子和团簇等吸收光谱的测量,分子反应动力学的研究,大气环境监测等领域,并获得了很好的研究成果^[2~4]。为了保证谐振腔的高反射低损耗特性,需要对两个

收稿日期: 2010-03-22; **收到修改稿日期**: 2010-04-22

基金项目: 国家自然科学基金(10674075, 10974100, 60577018)、天津市应用基础与前沿技术研究计划重点项目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: 姜 萌(1982—),女,博士研究生,主要从事光电子器件检测及传感等方面的研究。

E-mail: abobojm@hotmail.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、新型光电子器件等方面的研究。

E-mail: zhangwg@nankai.edu.cn

反射镜进行高反射率涂覆并保证精确对准。如此高的加工工艺和稳定操作要求,在一定程度上限制了该技术在某些特定环境条件下的应用。2001年之后,相继出现了光纤环荡腔(FLRDS)^[5]、纤端涂覆高反射率薄膜的光纤衰荡腔(FCRD)^[6]以及用两个相同共振波长的光纤布拉格光栅(FBG)作反射器的光纤衰荡腔^[7],这些 FCRD 不仅改善了传统衰荡腔的局限性,而且还利用了光纤传输损耗低、易耦合的优良特性。在现代通信传输中,为降低传输损耗,光被限制在纤芯中传播。然而,对于化学传感器,为测量吸收光谱需增加光与外界环境的作用面积。采用倏逝波理论及其方法,可避免上述两种矛盾并充分利用二者的优势。Tarsa 等^[8~10]利用一段双锥形光纤来增大倏逝波吸收,Stewart 等^[11,12]将一段光纤研磨成 D 形作为传感单元,这种方法采用移除部分光纤的包层来增大倏逝波的吸收,但也会使传感单元结构脆弱,并且随着包层逐渐减小,光强发生大量泄漏,增大了系统的损耗。Andachi 等^[13~18]在光纤中引入一段微腔,其优点在于化学吸收过程直接发生在微腔之中,但这会增大系统损耗,需要引入增益也就不可避免地引入了误差。N. Ni 等^[19~21]利用长周期光纤光栅(LPG)谐振峰为包层模式,易受外界环境影响,但插入损耗极低的优势,分别将 LPG 和 LPG 对引入 FLRDS 中,但因 LPG 利用谐振峰波长漂移进行解调^[22],故不可避免地将受到温度的影响。本文利用移除包层的方法,并通过倏逝波理论计算应当移除包层的尺寸,这既增大了系统对外界折射率的灵敏度又避免了其损耗过大对测量的影响。

碳纳米管是继富勒烯之后出现的又一种新型碳质纳米材料,从结构上看碳纳米管可视为由石墨片卷曲而成的中空管状结构,其管壁是一种类似于石墨片的碳六边形网状结构,直径在几个纳米到几十纳米之间,长度却可达几十甚至上百微米。高纵横比、分子级光滑的疏水碳壁以及纳米尺度的内径,会引起一种非常独特的现象,即水和气体可以高效地通过这些极窄的分子管道。水和气体分子通过纳米管气孔时,数量级比同样尺寸的气孔高得多。Pisco 等^[23]报道了他们的研究结果,将部分填充且涂覆单壁碳纳米管的空芯光子晶体光纤(PCF)作为光化学传感器,可探测易挥发的有机化合物。本文利用碳纳米管的物理吸附特性以及高温解吸附特性,使碳纳米管与光纤集成,实现了对气体及易挥发溶剂的在线测量。

2 倏逝波吸收原理

当光在光纤中传播时,由于纤芯和包层之间的折射率差,会使得大部分光由于反射在高折射率介质中传播,而另一部分光会渗透到低折射率介质中,并迅速衰减称为倏逝波。传统的三层折射率模型在解决光纤在部分包层移除之后纤芯导波模式方面未能考虑外界折射率和包层尺寸对有效折射率的影响,所以引入复折射率, $\hat{n} = n + i\eta\kappa$, 其中虚部 κ 代表消光系数,与光吸收相对应。

根据比尔-朗伯定律(Bill-Lambert's law),当光被透明介质中的溶液吸收时,吸收系数与溶液浓度成正比,即

$$\alpha = \epsilon C, \quad (1)$$

吸收系数与消光系数之间的关系式为

$$\alpha = 2n\kappa\omega/c = 4\pi n\kappa/\lambda. \quad (2)$$

此处采用有限单元法来分析被移除部分包层的光纤的导波模式。SMF-28 单模光纤参数如下: $a_1 = 4.15 \mu\text{m}$; $a_2 = 62.5 \mu\text{m}$; $n_1 = 1.4504$; $n_2 = 1.4447$ 。标准光纤简并的纤芯基模模式有效折射率为 $\hat{n} = 1.44925 - 5.49416 \times 10^{-12} i$ 。

如图 1 所示,从内到外,第一层为纤芯,第二层为被腐蚀的包层,第三层为圆柱形的吸收层。当光纤包层被腐蚀到直径为 $16 \mu\text{m}$ 时,纤芯基模的有效折射率为 $\hat{n} = 1.44925 - 1.37865 \times 10^{-7} i$,与三层折射率模型中利用最小二分法得到的纤芯基模模式相对应,并且得到了消光系数 κ 的数值。

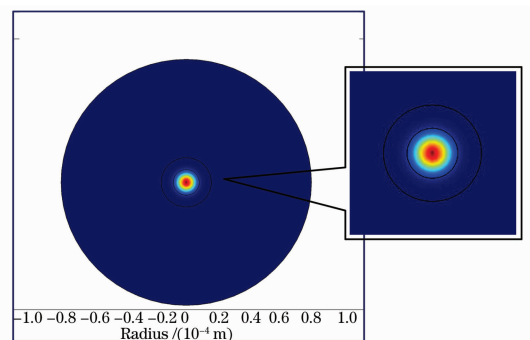


图 1 通过有限元分析得到光纤截面的能量分布

Fig. 1 Energy distribution over the cross section of fiber

将复折射率代入到光的传输速度公式 $c' = c_0/(n - i\eta\kappa)$, 此时电场的表达式可以表示为

$$E(z) = E_0 \exp \left[i\omega \left(t - \frac{z}{c_0} \right) \right] \exp \left(-\frac{\omega n \kappa}{c_0} z \right), \quad (3)$$

式中第一个 e 指数项与相位相关可以忽略,第二个 e 指数项表示电场的衰减。根据光纤辐射模场的公式以及功率的归一化条件,则推导出经过 z 长度之

后的电场强度为

$$E(z) = 2\pi E_0 \left[\int_0^{\rho} ru(r) dr + \exp\left(-\frac{\omega n \kappa}{c_0} z\right) \int_{\rho}^{\infty} ru(r) dr \right], \quad (4)$$

经过长度 l 后光纤透射率可以表示为

$$T = \frac{P(l)}{P(0)} = \left| \frac{E(l)}{E(0)} \right|^2. \quad (5)$$

将通过有限单元法计算得到的被移除包层光纤的复折射率代入到(5)式,可以推导出被腐蚀的不同半径光纤经过相同长度之后的透射率 T 。将 SMF-28 光纤涂覆层剥离光纤 2 cm,浸泡在盛有 HF 酸液体的 PVC 容器中。光纤被腐蚀后,光纤包层尺寸越小,透射率越低,则损耗增大,降低了实验分辨率。但是与之相矛盾的是,包层移除尺寸越大,对外界折射率变化越敏感。选择光纤直径为 $16 \mu\text{m}$ 时,有效折射率中消光系数的值 $\kappa = 1.37865 \times 10^{-7}$,传输损耗 $-\ln T = 0.1 \text{ dB}$ 。逐渐腐蚀光纤直径至 $12 \mu\text{m}$,有效折射率中消光系数的值 κ 增大,则系统传输损耗 $-\ln T > 0.3 \text{ dB}$ 。当将被腐蚀的光纤放置在折射率匹配液中时,系统会引入吸收损耗 αl 。为了降低系统总损耗 $R = -\ln T + \alpha l$,提高对液体和气体吸收测量的分辨率,选择光纤直径为 $16 \mu\text{m}$ 。

3 碳纳米管的预处理

碳纳米管具有特殊的导电性能、力学性质及物理化学性质等,自问世以来即引起广泛关注,近年来广泛应用于众多科学研究领域。碳纳米管以其表面积大,孔径比高,具有较强物理吸附能力能够形成分子级的疏水管道等特性,在固相和气相萃取领域有着广泛的应用前景。目前已有文献报道碳纳米管对有机化合物、金属离子和有机金属化合物等环境污染物均具有较高的富集能力并且实现纳米管储氢。如

何将碳纳米管与光纤集成是目前研究的热点。

首先采用化学修饰的方法,提高了碳纳米管的纯度并且使原本封闭的碳纳米管实现开口,这样就可以提高碳纳米管的储存气体的能力和纯净度。不同的化学修饰方法导致开口碳纳米管片段的尺寸和所带的基团不同,把经过浓硝酸预处理过的开口单壁碳纳米管粉末,经过超声波的预先准备分散在 DMF 溶剂中,形成质量浓度为 20 mg/mL 的悬浊液。再把等份的碳纳米管悬浊液涂覆在光纤表面,加热至 $160 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,DMF 溶液挥发并由于其具有黏性,碳纳米管就留在了光纤的沉积区域。图 2 为显微镜下的光纤侧面图,对此过程进行重复,直到碳纳米管的厚度达到 $37.5 \mu\text{m}$ 。在气体吸收实验之前先将光纤在 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 下预热 30 min ,使碳纳米管中的气体逸散。

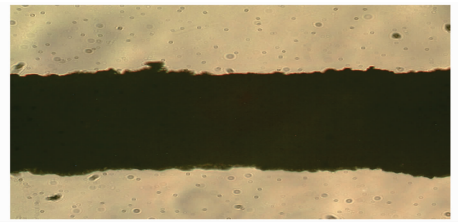


图 2 显微镜下涂覆了单壁碳纳米管的光纤侧面图
Fig. 2 Lateral figure of fiber deposited with single wall carbon nanotubes in microscope

4 实验装置与结果讨论

实验采用两个偏振控制器 PC1, PC2 和隔离度为 55 dB 的偏振相关隔离器 PD-ISO (KISO-D-P-1550-900 L) 组成非线性偏振相关锁模激光器作为脉冲输入单元^[24~29],通过调节两个偏振控制器可以实现稳定的皮秒量级的脉冲输入光。为了实现衰荡腔系统低重复频率,系统接入了 500 m 单模光纤,降低了重复频率,但色散造成脉冲一定程度的展宽,最终实现了如图 3 所示的脉冲间隔为 400 kHz ,脉

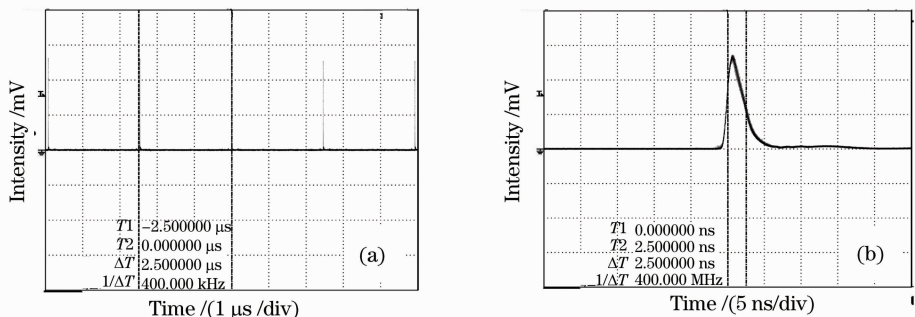


图 3 示波器中显示的激光窄脉冲。(a)脉冲间隔为 400 kHz ; (b)脉冲宽度为 2.5 ns

Fig. 3 Narrow band laser pulse displayed in oscilloscope. (a) pulse interval is 400 kHz ; (b) pulse width is 2.5 ns

冲宽度为 2.5 ns, 波长为 1560 nm, 半峰全宽为 10 nm 的稳定脉冲激光输入。

如图 4 所示, 光纤环衰荡腔系统由两个耦合比为 99:1 的耦合器充当反射镜形成衰荡腔系统, 耦合器的损耗小于 0.1 dB。脉冲激光从 1% 端输入, 其中 99% 和 100% 端分别相连, 最终从 1% 端输出, 其余 99% 的光仍在环内循环, 如此反复直到脉冲强度衰减到探测器的阈值以下。此时, 光探测器接收

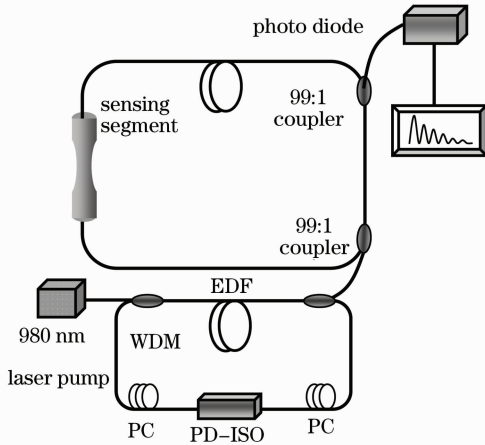


图 4 光纤环衰荡腔系统的结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the fiber loop ring-down system

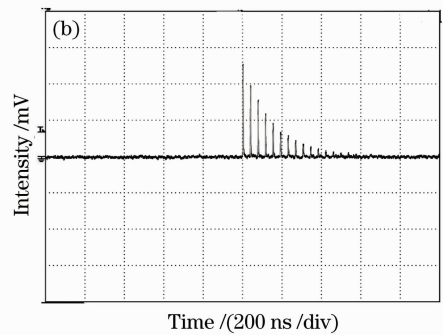
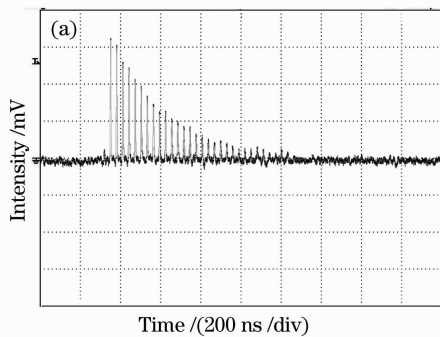


图 5 光纤环腔衰荡谱。(a)未引入损耗的光纤环衰荡谱;(b)包层被移除的光纤环衰荡谱

Fig. 5 Intensity decay curves of cavity ring-down spectroscopy before (a) and after (b) the loop is etched

如图 6 所示, 将采集到的数据点输入计算机可以得到绘制的光纤环衰荡谱, 在小范围内对光谱进行放大, 可以看到清晰的窄脉冲衰荡峰。如图 7 所示, 根据衰荡谱的峰值点对曲线进行指数拟合, 计算得到衰荡时间为 $\tau = 3.816 \times 10^{-7}$ s, 方差 $R^2 = 0.99866$ 。

实验中, 利用 DMSO 溶液易挥发, 折射率为 1.469 接近纤芯折射率的特性, 将 DMSO 溶液置于温控箱中保持其温度为 80 °C 使其充分挥发(溶液中水分未被挥发), 逐渐改变溶液浓度可得到不同浓度

到的就是一系列衰减的脉冲信号。光电探测器 (Thorlabs FGA04) 将探测到的光信号转换成电信号并显示在示波器 (YOKOGAWA, DL9140) 上。

探测器得到的透射光强是一系列按指数函数衰减的脉冲序列。定义透射光强衰减到初始光强的 $1/e$ 所需的时间为衰荡时间, 令其为 τ , 则空腔的衰荡时间可表示为

$$\tau_0 = \frac{nL}{cA} = \frac{nL}{c(1-R)}. \quad (6)$$

可见, 衰荡时间只与腔本身的物理参数 n, L, c 和 R 有关, 与入射光强无关。若在腔内引入吸收样品, 则由朗伯-比尔吸收定律(1)式可知, 样品吸收所引起的损耗为 al , 其中 l 为样品的吸收长度。将其代入(6)式可知此时的衰荡时间变为

$$\tau_0 = \frac{nL}{c(1-R+al)}. \quad (7)$$

根据实验得到的衰荡谱可以根据公式

$$\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} = \frac{c}{nL} (-\ln T + al) \quad (8)$$

得到衰荡时间与腔外损耗的关系, 根据(5), (8)式计算出损耗与外界折射率和浓度的对应关系, 实时的监测外界折射率和浓度的变化。图 5 为示波器显示的光纤环衰荡谱。

下的衰荡时间。测量前, 通过高温光源将涂覆碳纳米管的传感区域瞬间升温到 160 °C, 使碳纳米管中的气体充分逸散, 然后开始测量。依次重复进行测量, 直到获得足够的测量数据为止, 折射率的测量范围为 1.4~1.5。由图 8 可见, DMSO 溶液浓度逐渐升高, 外界折射率大于纤芯折射率, 光纤中的光大量被泄露, 系统总损耗值较大。在一定浓度范围内, 衰荡时间倒数的差值与浓度成近似线性关系。当 DMSO 溶液浓度增大到一定范围时, 系统损耗增大到超过系统的测量范围。

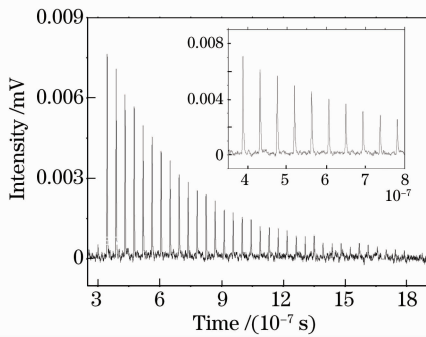


图 6 根据采集到的数据点绘制的光纤环衰荡谱曲线

Fig. 6 Intensity decay curves of cavity ring-down spectroscopy according to the data

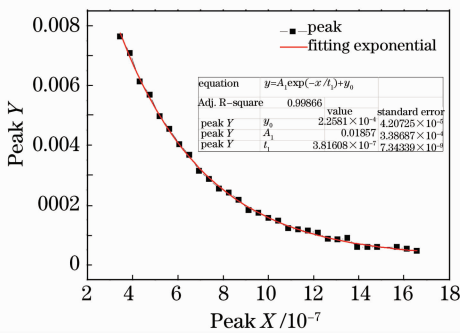


图 7 对衰荡谱峰值点进行 e 指数拟合,并计算得到衰荡时间

Fig. 7 Exponential decay curve fitting on the peak intensity, ring-down time can be calculated

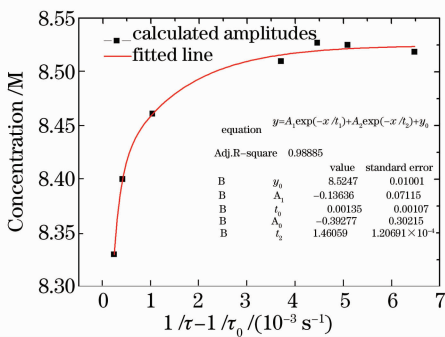


图 8 光纤损耗与 DMSO 溶液浓度对应的关系曲线

Fig. 8 Fiber losses as a function of the concentration of DMSO solution

5 结 论

光纤环衰荡腔谱探测技术因其不受光源波动影响,被广泛应用于微流量液体或固体薄膜无标探测。在流体测量中,对液体的测量发展比较完善,但是对于气体测量需要用严格密封的气室和分子计数器等技术来实现气体的测量。利用碳纳米管的物理吸附特性以及高温解吸附特性,使碳纳米管与光纤集成,

实现了对易挥发溶剂的测量。并且利用被移除包层的单模光纤,避免了光纤光栅谐振波长随外界温度变化的影响,可进行多次重复测量。根据倏逝波原理,光纤包层被移除后,纤芯中传输的基模发生了泄露,当外界环境的折射率发生改变时,系统的传输损耗随吸收系数的改变而改变。反之,可以根据测量到的衰荡时间的变化来计算出系统损耗,从而实现对流体浓度的实时感测。而且倏逝波系统不以波长作为解调的参量,避免了外界温度变化对测量结果的影响。

一些危险性气体如 CO₂, C₂H₂ 等吸收峰在 1560 nm附近,对比 980 nm^[30~32]系统,采用本文提出的方法,能够对气体、易挥发的有机溶剂和易富集的有机环境污染物进行测量,可望实现更加精密的流体感测。

参 考 文 献

- 1 D. Z. Anderson, J. C. Frisch, C. S. Masser. Mirror reflectometer based on optical cavity decay time [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(8): 1238~1245
- 2 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
- 3 T. von Lerber, M. W. Sigrist. Cavity-ring-down principle for fiber-optic resonators: experimental realization of bending loss evanescent-field sensing [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(16): 3567~3575
- 4 M. Gupta, H. Jiao, A. O'Keefe. Cavity-enhanced spectroscopy in optical fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(21): 1878~1880
- 5 C. Vallance. Innovations in cavity ringdown spectroscopy [J]. *New J. Chem.*, 2005, **29**(7): 867~874
- 6 J. J. Scherer, J. B. Paul, A. O'Keefe *et al.*. Cavity ringdown laser absorption spectroscopy: history, development, and application to pulsed molecular beams [J]. *Chem. Rev.*, 1997, **97**(1): 25~51
- 7 G. Berden, R. Peeters, G. Meijer. Cavity ring-down spectroscopy: experimental schemes and applications [J]. *Int. Rev. in Phys. Chem.*, 2000, **19**(4): 565~607
- 8 P. B. Tarsa, K. K. Lehmann. Cavity ringdown strain gauge [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(12): 1339~1341
- 9 P. B. Tarsa, P. Rabinowitz, K. K. Lehmann. Evanescent field absorption in a passive optical fiber resonator using continuous-wave cavity ring-down spectroscopy [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2004, **383**(3-4): 297~303
- 10 P. B. Tarsa, P. Rabinowitz, K. K. Lehmann. Single-cell detection by cavity ring-down spectroscopy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(19): 4523~4525
- 11 G. Stewart, K. Atherton, B. Culshaw. Cavity enhanced spectroscopy in fiber cavities [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(5): 442~444
- 12 G. Stewart, P. Shields, B. Culshaw. Development of fibre laser systems for ring-down and intracavity gas spectroscopy in the near-IR [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2004, **15**(8): 1621~1628
- 13 M. Andachi, T. Nakayama, M. Kawasaki *et al.*. Fiber-optic ring-down spectroscopy using a tunable picosecond gain-switched diode laser [J]. *Appl. Phys. B*, 2007, **88**: 131~135

- 14 R. S. Brown, I. Fozin, Z. G. Tong *et al.*. Fiber-loop ring-down spectroscopy [J]. *J. Chem. Phys.*, 2002, **117** (23): 10444~10447
- 15 Z. G. Tong, M. Jakubinek, H. P. Look. Fiber-loop ring-down spectroscopy: a sensitive absorption technique for small liquid samples[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2003, **74**(11): 4818~4826
- 16 Runkai Li, H. P. Look, P. O. Oleschuk. Capillary electrophoresis absorption detection using fiber-loop ring-down spectroscopy [J]. *Anal. Chem.*, 2006, **78**(16): 5685~5692
- 17 H. P. Look. Ring-down absorption spectroscopy for analytical microdevices [J]. *Trends in Anal. Chemistry*, 2006, **25** (7): 655~664
- 18 Z. G. Tong, A. Wright, H. P. Look. Phase-shift fiber-loop ring-down spectroscopy [J]. *Anal. Chem.*, 2004, **22** (7): 6594~6599
- 19 N. Ni, C. C. Chan, X. Y. Dong *et al.*. Cavity ring-down long-period fibre grating strain sensor [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2007, **18**(7): 3135~3138
- 20 N. Ni, C. C. Chan. Improving the measurement accuracy of CRD fibre amplified loop gas sensing system by using a digital LMS adaptive filter [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2006, **17** (6): 2349~2354
- 21 S. Pu, X. G. Gu. Fiber loop ring-down spectroscopy with a long-period grating cavity [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(12): 1774~1776
- 22 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): 1043~1051
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): 1043~1051
- 23 M. Pisco, M. Penza, A. Sutolo *et al.*. Hollow fibers integrated with single walled carbon nanotubes: bandgap modification and chemical sensing capability [J]. *Sensors and Actuators B*, 2008, **129**(1): 163~170
- 24 Deng Dingheng, Zhan Li, Xia Yuxing. 75 fs all-fiber ultrashort pulsed laser [J]. *Science in China Press*, 2008, **53**(1): 36~39
邓定恒, 詹黎, 夏宇兴. 75 fs 全光纤超短脉冲激光器 [J]. *科学通报*, 2008, **53**(1): 36~39
- 25 Gan Yu, Xiang Wanghua, Zhou Xiaofang *et al.*. Passive Q-switching and mode locking Yb³⁺-doped fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1021~1024
甘雨, 向望华, 周晓芳等. 被动调 Q 锁模掺镱光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1021~1024
- 26 Yang Linzhen, Chen Guofu, Wang Yishan *et al.*. Experimental study of ultrashort pulse Yb³⁺-doped fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2): 153~155
杨玲珍, 陈国夫, 王屹山等. 超短脉冲掺 Yb³⁺ 光纤激光器实验研究 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 153~155
- 27 Song Chuangxing, Xu Wencheng, Luo Zhichao *et al.*. Tunable mode-locked pulsed erbium-doped fiber ring laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1292~1295
宋创兴, 徐文成, 罗智超等. 可调谐锁模脉冲环形腔掺铒光纤激光器 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1292~1295
- 28 Zhao Yu, Liu Yongzhi, Zhao Deshuang *et al.*. Study on side bands in passively mode-locked fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 991~995
赵羽, 刘永智, 赵德双等. 被动锁模光纤激光器光谱边带 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 991~995
- 29 Song Fang, Xu Wengcheng, Chen Weicheng *et al.*. 78 fs passively mode-locked Er³⁺-doped fiber ring laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1174~1177
宋方, 徐文成, 陈伟成等. 78 fs 被动锁模掺 Er³⁺ 光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1174~1177
- 30 Jiang Meng, Zhang Weigang. Investigation on an evanescent wave fiber-optic absorption sensor based on fiber loop cavity ring-down spectroscopy [J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(2): 249~253
- 31 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
张绮, 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
- 32 Liu Yaping, Zhang Weigang, Jiang Meng *et al.*. Development and recent progress of fiber cavity ring-down spectroscopy [J]. *Progress in Phys.*, 2008, **28**(4): 401~409
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): 401~409