

文章编号: 0253-2239(2010)04-0971-05

利用光纤环腔衰荡技术测量单模光纤的弯曲损耗

姜亚军 赵建林 汤大卿 杨德兴

(西北工业大学理学院光信息科学与技术研究所陕西省光信息技术重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要 提出用光纤环腔衰荡技术研究单模光纤的弯曲损耗及其随弯曲半径和温度变化的振荡特性。光纤弯曲时, 从基模辐射出去的一部分能量在包层-涂敷层或涂敷层-空气界面处发生反射形成回音壁(WG)模, 当满足同向耦合条件时, WG模又重新耦合回纤芯与基模发生干涉, 使光纤的弯曲损耗产生振荡。实验结果表明, 在弯曲半径为9.33~27.63 mm的范围内, 单模光纤的弯曲损耗除了随弯曲半径的减小呈指数增大外, 还伴随有振荡现象, 且WG模与纤芯基模之间还会发生二阶耦合, 导致次级振荡的存在; 弯曲损耗随温度的变化也存在振荡现象, 振荡周期随温度的升高和弯曲半径的减小而减小。实验得到的振荡峰的位置和幅值及振荡周期与理论分析结果一致。

关键词 光纤光学; 弯曲损耗; 光纤环腔衰荡技术; 弯曲半径

中图分类号 TN252 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103004.0971

Measurement of the Bending Loss of Single-Mode Fibers by Use of Fiber Loop Cavity Ring-Down Technique

Jiang Yajun Zhao Jianlin Tang Daqing Yang Dexing

(Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, Institute of Optical Information Science and Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract The oscillations of the bending loss for single-mode fibers with the bending radius and the temperature are investigated experimentally by use of fiber loop cavity ring-down technique. When the fiber is bent, the light ejects from the fundamental mode to form whispering gallery (WG) modes produced by reflection at the cladding-coating interface, or at the coating-air interface. On the synchronous coupling condition, the light from the WG modes will couple back and interfere with the fundamental mode, which leads to bending loss oscillations. The experimental results demonstrate that the bending loss follows an oscillatory and exponential growth trend when the bending radius decreases from 27.63 mm to 9.33 mm. In addition, the secondary oscillations are observed because of the secondary coupling between the fundamental mode and the WG modes. Change of the bending loss with temperature is oscillated, and the oscillatory period decreases with the decrease of the bending radius and the increase of the temperature. The locations and the amplitudes of the loss peaks and the oscillatory period are consistent with the theoretical results.

Key words fiber optics; bending loss; fiber loop cavity ring-down technique; bending radius

1 引言

当单模光纤弯曲时, 基模的一部分光能量有可能辐射到包层中成为包层模, 进而穿过包层成为辐射模向外泄漏, 即发生所谓弯曲损耗。光纤通信系统中, 弯曲损耗对信号的传输质量有较大的影响; 另

外, 利用弯曲损耗特性可制成光纤微弯或温度传感器^[1]。因此研究单模光纤的弯曲损耗特性具有重要意义。

最初人们采用纤芯-无限大包层的结构模型来分析单模光纤的弯曲损耗, 得出弯曲损耗随弯曲半径的减小仅呈指数增加^[2,3]。后来, 在实验中还发现伴随

收稿日期: 2009-04-21; 收到修改稿日期: 2009-06-24

基金项目: 航空科学基金(20080753005)资助课题。

作者简介: 姜亚军(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事光信息处理和光纤传感等方面的研究。E-mail: npujyj@163.com

导师简介: 赵建林(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光信息技术及应用等方面的研究。

E-mail: jlzhao@nwpu.edu.cn(通信联系人)(中国光学学会高级会员; S040420657S)

有振荡现象^[4]。目前已相继提出多种方法来分析单模光纤弯曲损耗的振荡特性。H. Renner^[5]采用等效阶跃折射率法,基于微扰理论和纤芯-包层-无限涂敷层的三层结构模型得到了较为简单的损耗公式;L. Faustini等^[6]对上述理论作了进一步完善,使理论结果与实验结果符合得很好;Q. Wang等^[7]基于微扰理论和标量近似对多层结构单模光纤的弯曲损耗特性进行了理论和实验研究,并基于准矢量近似和三层结构模型,对单模光纤的偏振相关弯曲损耗特性进行了研究^[8]。另外,理论和实验发现,单模光纤的弯曲损耗随波长^[9~11]或温度^[12,13]变化也有振荡现象。本课题组也曾对光子晶体光纤的弯曲损耗振荡特性进行了理论分析^[14]和实验研究^[15]。

上述实验研究中均是光纤在不同半径的芯轴上缠绕多圈来增大损耗,利用光电探测器测量光纤弯曲前后输出光功率的比值来得到光纤的弯曲损耗。因此,测量结果受光源强度起伏的影响较大,且仅适用于对大损耗的测量。光纤腔衰荡技术是光腔衰荡光谱法^[16~18]的发展,其特点是将对绝对强度的测量转化为对光纤腔衰荡时间的测量,测量结果不受光源强度起伏的影响,并且光束在光纤腔内不断绕行,对损耗进行多次放大,因而测量精度高,特别适用于测量微弱损耗。T. von Lerber等^[19]和D. E. Vogler等^[20]分别在一段单模光纤的两端面镀制反射率达99.9%的高反膜形成光纤腔,基于光纤腔衰荡技术对单模光纤的弯曲损耗进行了测量,但要在光纤端面镀制如此高反射率的反射膜,对镀膜工艺要求较高,且反射膜很容易损坏。因此提出采用光纤环腔衰荡技术^[21]研究单模光纤的弯曲损耗及其随弯曲半径和温度变化的振荡特性。

2 实验原理

当光纤环内光纤的弯曲半径较大时,光纤环的衰荡时间可表示为^[21]

$$\tau_0 = 4.343 \frac{t_r}{S}, \quad (1)$$

式中 $t_r = n_{\text{eff}}L/c$ 为光束在光纤环内绕行一周所用的时间, n_{eff} 为室温下纤芯的有效折射率, L 为光纤环的长度, c 为真空中的光速, S 为光纤环内的总损耗,单位为 dB。

当光纤环内长为 l 的光纤发生小曲率半径弯曲时,会在环内引入新的损耗 L_b , 此时衰荡时间可表示为

$$\tau = 4.343 \frac{t_r}{S + L_b}. \quad (2)$$

由(1)式和(2)式可得光纤弯曲引入的损耗系数 α_b 为

$$\alpha_b = \frac{L_b}{l} = 4.343 \frac{t_r}{l} \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} \right), \quad (3)$$

式中 α_b 的单位为 dB/m。

对(1)式两边取微分可得

$$\frac{\Delta\tau_0}{\tau_0} = \frac{\Delta S}{S}, \quad (4)$$

式中 $\Delta\tau_0/\tau_0$ 为衰荡时间的相对误差, ΔS 为该光纤环最小可探测的损耗。

3 实验装置

光纤环腔衰荡技术的实验装置如图1所示。由两个分光比为99:1的1×2光纤耦合器和一段单模光纤(SMF-28)组成光纤环。采用分布反馈激光二极管(DFBLD)作光源,其中心波长为1550 nm,输出功率为20 mW,线宽小于5 MHz,利用数字信号发生器产生周期为1 kHz、幅值为2 V、占空比为0.2%的脉冲波,对DFBLD的输入电流进行调制,使其输出一束脉冲宽度为2 μs的脉冲光。将该束脉冲光由入射端耦合进上述光纤环内,从出射端输出的光信号经可变增益InGaAs探测器探测,用数字存储示波器对探测器输出的电信号进行采集,数据采集和处理过程由一LabVIEW程序控制。

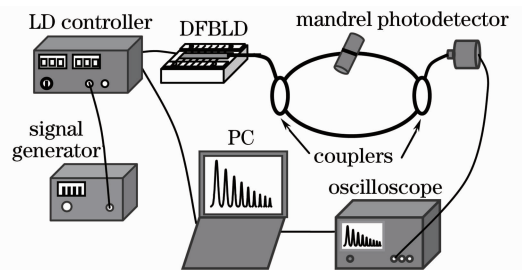


图1 光纤环腔衰荡技术的实验装置图

Fig.1 Experimental setup for fiber loop cavity ring-down technique

4 实验结果与分析

4.1 弯曲损耗与弯曲半径之间的关系

当光纤发生弯曲时,基模的一部分能量便会泄漏出去,但并不是所有泄漏出去的能量都损耗掉,其中一部分能量在光纤的分界面(包层-涂覆层或涂覆层-空气界面)处发生反射,形成回音壁(WG)模^[22]。因此,在同一光纤中构成类似马赫-曾德尔干涉光路,基

模与 WG 模分别在该干涉光路的两臂中传输。当 WG 模与基模满足同向耦合条件,即相位差 $\Delta\phi=2\pi$ 时, WG 模又重新耦合回纤芯与基模发生干涉,使光纤的弯曲损耗产生振荡。

单模光纤的弯曲损耗与弯曲半径的理论关系曲线如图 2 所示。可以看出,单模光纤的弯曲损耗随弯曲半径的减小总体上呈指数增加,并伴有振荡现象,且随着弯曲半径的减小,振荡频率增大。

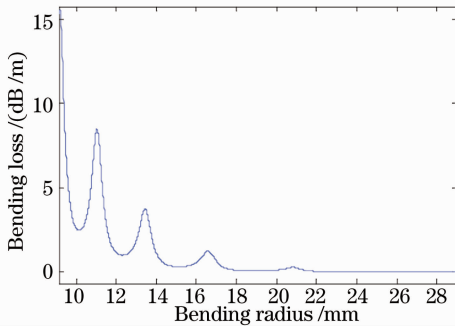


图 2 SMF-28 弯曲损耗的理论计算结果

Fig. 2 Theoretical results of bending loss for SMF-28

利用图 1 所示的光路测出光纤环的衰荡时间 τ_0 , 再将光纤分别在不同半径的芯轴上缠绕一周, 测出不同弯曲半径分别对应的光纤环的衰荡时间 τ , 由(3)式即可得到单模光纤的弯曲损耗与弯曲半径之间的关系。设芯轴半径为 R , 光纤半径为 r_{coat} , 则光纤的弯曲长度 $l = 2\pi(R + r_{\text{coat}})$ 。图 3 所示为实验得到的 SMF-28 的弯曲损耗与弯曲半径之间的关系曲线。可以看出, 当弯曲半径从 27.63 mm 减小到 9.33 mm 时, 相应的光纤环的衰荡时间从 $46.05 \pm 0.08 \mu\text{s}$ 减小到 $13.83 \pm 0.07 \mu\text{s}$, 相对误差从 0.17% 增大到 0.50%, 因此光纤弯曲引起的弯曲损耗从 $0.0045 \pm 0.0001 \text{ dB}$ 增大到 $18.75 \pm 0.09 \text{ dB}$ 。且弯曲损耗在 9.33, 13.13 和 17.13 mm 处出现损耗峰, 对应的损耗值分别为 18.75 ± 0.09 , 2.21 ± 0.03 和 $0.135 \pm 0.007 \text{ dB}$, 这与图 2 中的理论结果及文献[20]中的实验结果一致。另外, 在 10.13 mm 和 11.13 mm 处还发现存在次级振荡的现象, 在 9.5~11.5 mm 范围内经多次重复实验结果均是如此, 这主要是包层-涂覆层界面处产生的 WG 模与纤芯基模发生二阶耦合所致^[10], 即第一次同向耦合时, WG 模只有一部分能量耦合回基模, 其余能量还会以 WG 模的形式在涂覆层中继续传输, 当 WG 模与基模的相位差再次达到 2π 时, 会发生二阶耦合, 从而使光纤的弯曲损耗发生次级振荡现象。但由于耦合损耗、反射损耗和传输损耗的影响, 高阶耦合的作用会随着耦合级次的增大迅速减小, 三阶以上的耦合对弯曲损耗的调制作用已

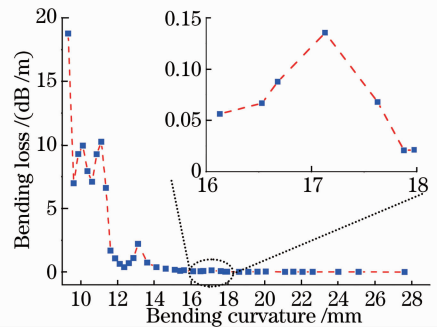


图 3 SMF-28 弯曲损耗的实验测量结果

Fig. 3 Experimental results of bending loss for SMF-28 非常小。

测量过程中, 衰荡时间的相对误差会随着衰荡时间的减小而增大。不过, 该误差可通过增加衰荡时间的平均次数得到改善。

4.2 弯曲损耗与温度之间的关系

光纤弯曲半径一定时, 由于温度的变化, 光纤发生热膨胀效应和热光效应, 使基模与 WG 模之间的相位差 $\Delta\phi$ 发生变化, 从而使弯曲损耗随温度产生振荡现象。依据图 3, 在弯曲损耗的波峰、波谷和平缓处选取对应的弯曲半径 12.63, 13.13 和 15.13 mm, 令 $\Delta\phi=2\pi$, 波长 $\lambda=1550 \text{ nm}$, 结合 SMF-28 的参数, 当光纤的弯曲角度为 360° 时, 由文献[11]中的理论可得在上述三种弯曲半径时, SMF-28 的弯曲损耗随温度振荡的周期的理论值分别约为 8.1°C , 8.4°C 和 8.5°C 。

实验中先测出光纤环的衰荡时间 τ_0 , 光纤在一芯轴上绕行一周后, 再将芯轴及弯曲的光纤浸入一恒温水浴中, 通过温控仪并结合 PT100 铂热电阻对水温进行控制, 温控精度为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$, 测出不同温度时对应的衰荡时间 τ , 由(3)式即可得到单模光纤的弯曲损耗与温度之间的关系。改变芯轴的半径, 重复以上实验。还选取光纤的弯曲半径为 12.63, 13.13 和 15.13 mm, 则对应的弯曲长度分别为 79.36, 82.50, 和 95.06 mm。图 4(a), 图 4(b) 和图 4(c) 所示分别为在上述三种弯曲半径时, 弯曲损耗随温度的变化曲线。可以看出, 几种情况下弯曲损耗均随温度的变化出现振荡现象, 且随着光纤弯曲半径的减小, 弯曲损耗的振荡周期减小, 幅值增大, 原因是 WG 模在涂敷层中传输的光程减小, 且耦合增强。对同一弯曲半径来说, 振荡周期随温度的升高而减小。振荡幅值的微小变化, 主要是受到在包层-涂敷层界面处产生的 WG 模的慢速调制作用, 由于纤芯和包层的热膨胀系数与热光系数相等, 该 WG 模随温度的变化对弯曲损耗的调制作用较弱, 且调制周期大于 300°C ^[11]; 另外, 温控仪的温控精度只有 $\pm 0.2^\circ\text{C}$, 这会对振荡幅

值的测量带来误差。实验中发现弯曲损耗振荡波峰处较尖锐,弯曲损耗随温度变化较大,在波谷处较为缓和,随温度变化较小。从图 4(a),图 4(b)和图 4(c)中可以看出,振荡周期分别为 $8.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $9.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和

$9.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。可见实验测量值与理论值基本一致,误差主要源于 SMF-28 的双涂敷层结构以及芯轴和光纤置于水中而不是空气中。

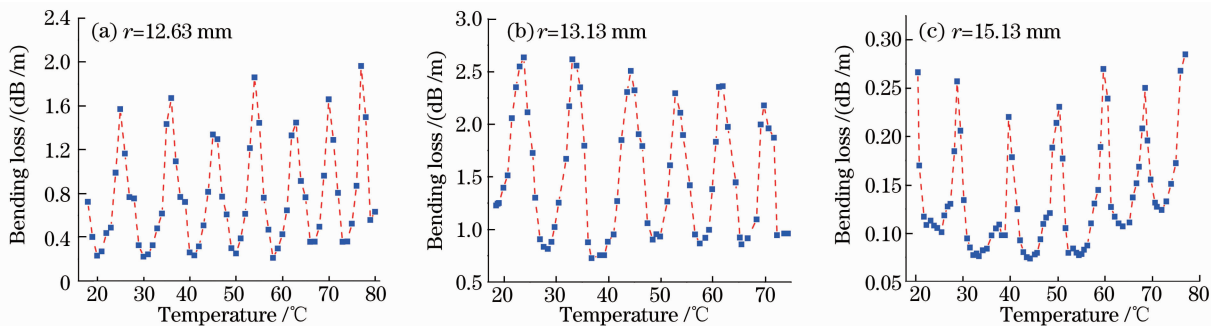


图 4 不同弯曲半径时 SMF-28 的弯曲损耗与温度的关系

Fig. 4 Relation between bending loss and temperature at different curvature radii for SMF-28

由于受示波器的带宽、采样点数和垂直分辨率的限制,衰荡曲线的尾部数据点的信噪比较低,会对拟合结果带来较大误差,以上实验数据处理过程中,均只对约 4 倍于衰荡时间之内的数据点进行拟合。当光纤未弯曲时,实验测得光纤环的衰荡时间为 $\tau_0 = 46.40 \pm 0.07\text{ }\mu\text{s}$, 相对误差 $\Delta\tau_0/\tau_0 = 0.15\%$ 。衰荡信号中相邻两个次脉冲之间的时间间隔 $t_r = 4.893 \pm 0.0001\text{ }\mu\text{s}$, 由(1)式可得此时光纤环内的总损耗 $S = 0.4580 \pm 0.0007\text{ dB}$ 。将 $\Delta\tau_0/\tau_0$ 和 S 代入(4)式,得到该光纤环最小可探测的损耗 $\Delta S = 0.0007\text{ dB}$ 。可见,采用光纤环作为光纤腔时,其测量精度比文献[20]中的结果至少提高了约 2.5 倍。

上述结果均是在环境温度为 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时测得。由于热光效应和热膨胀效应,光纤环的长度和纤芯的有效折射率都会随环境温度的升高而增大,使得光束在光纤环内绕行一周所用的时间 t_r 增大。由(1)式可知,衰荡时间 τ_0 也会随温度的升高而增大。因此,环境温度不同时,采用相同的实验装置测量的弯曲损耗不同。考虑到光纤的热膨胀系数 $\alpha \approx 5.5 \times 10^{-7}\text{ K}^{-1}$, 热光系数 $\beta \approx 1 \times 10^{-5}\text{ K}^{-1}$ [13], 两者相差近两个数量级,故可以认为 t_r 主要受热光效应的影响。图 5 给出了环境温度在 $22\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内光纤环的衰荡时间 τ_0 与温度之间的关系,每个 τ_0 均由 50 次测量值平均所得,图中矩形和菱形分别表示理论和实验结果。可以看出, τ_0 主要受拟合和平均过程中的标准偏差影响,故可以通过增加平均次数来减小误差。而环境温度造成的影响与其相比要小,可将纤芯的有效折射率修正为 $n_{\text{eff}}(1 + \beta\Delta T)$, 其中 ΔT 为温度的变化量,相当于给 t_r 乘一校正因子 $(1 + \beta\Delta T)$, 从而对衰荡时间 τ_0 和弯曲损耗的测量结果加以校正。

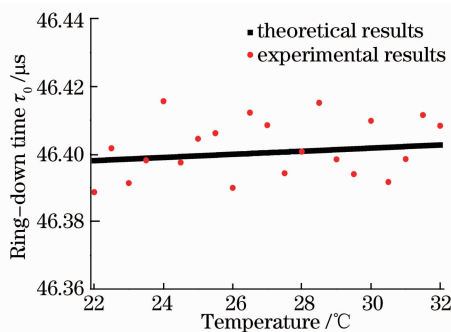


图 5 光纤环的衰荡时间 τ_0 与温度的关系

Fig. 5 Relation between ring-down time of the loop τ_0 and temperature

5 结 论

利用光纤环腔衰荡技术研究了单模光纤 SMF-28 的弯曲损耗及其随弯曲半径和温度变化的振荡特性。实验结果表明,弯曲半径从 27.63 mm 减小到 9.33 mm 时,光纤的弯曲损耗从 $0.0045 \pm 0.0001\text{ dB}$ 增大到 $18.75 \pm 0.09\text{ dB}$, 且在弯曲半径为 $9.33, 13.13$ 和 17.13 mm 处出现损耗峰, 由于 WG 模与基模之间的二阶耦合, 在 $9.5 \sim 11.5\text{ mm}$ 的范围内还观察到次级振荡的存在; 弯曲损耗随温度变化也出现振荡现象, 且随着光纤弯曲半径的减小, 振荡周期减小, 幅值增大, 对同一弯曲半径, 振荡周期随温度的升高而减小。工程中常采用截断法、插入法和背向散射法来测量直光纤的损耗, 其中, 截断法的测量精度最高, 可达 10^{-2} dB [19], 但其缺点是要截断光纤。而采用光纤环腔衰荡技术, 得到衰荡时间的相对误差为 0.15% , 光纤环内总损耗为 0.4580 dB , 因而最小可探测的损耗为 0.0007 dB 。

由此可见,其测量精度比截断法提高了约 15 倍。以上结果表明,光纤环腔衰荡技术可用于测量光纤的弯曲损耗。并且,通过增加衰荡时间的平均次数,可减小相对误差;采用更高垂直分辨率和更多采样点数的示波器,可提高峰值的提取精度;采用更高控温精度的温控仪,可进一步提高测量精度。

参 考 文 献

- 1 A. S. Lalasangi, V. K. Kulkarni, I. I. Pattanshetti *et al.*. Bend induced loss in single mode fiber for designing simple interferometric temperature sensor [J]. *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, 2006, **8**(5): 1901~1904
- 2 D. Marcuse. Curvature loss formula for optical fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**: 216~220
- 3 C. Vassallo. Scalar-field theory and 2-D ray theory for bent singlemode weakly guiding optical fibers [J]. *J. Lightwave. Technol.*, 1985, **LT-3**: 416~423
- 4 Y. Murakami, H. Tsuchiya. Bending losses of coated single-mode optical fibers [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1978, **QE-14**(7): 495~501
- 5 H. Renner. Bending losses of coated single-mode fibers: a simple approach [J]. *J. Lightwave. Technol.*, 1992, **10**(5): 544~551
- 6 L. Faustini, G. Martini. Bend loss in single-mode fibers [J]. *J. Lightwave. Technol.*, 1997, **15**(4): 671~679
- 7 Q. Wang, G. Farrell, T. Freir. Theoretical and experimental investigations of macro-bend losses for standard single mode fibers [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(12): 4476~4484
- 8 Q. Wang, G. Rajan, P. Wang *et al.*. Polarization dependence of bend loss for a standard singlemode fiber [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(8): 4909~4920
- 9 R. Morgan, J. S. Barton, P. G. Harper *et al.*. Wavelength dependence of bend loss in monomode optical fibers: effect of the fiber buffer coating [J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(17): 947~949
- 10 F. M. Haran, K. Ono, J. S. Barton *et al.*. Bend loss oscillations in single mode optical fibre; higher order recoupling [J]. *Opt. Commun.*, 1994, **108**: 55~59
- 11 R. Morgan, J. D. C. Jones, P. G. Harper *et al.*. Observation of secondary bend loss oscillations arising from propagation of cladding modes in buffered monomode optical fibres [J]. *Opt. Commun.*, 1991, **85**(1): 17~20
- 12 U. S. Raikar, A. S. Lalasangi, V. K. Kulkarni *et al.*. Temperature dependence of bending loss in single mode communication fiber effect of fiber buffer coating [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **273**: 402~406
- 13 P. Wang, Y. Semenova, G. Farrell. Temperature dependence of macrobending loss in all-fiber bend loss edge filter [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(17): 4312~4316
- 14 Cui Li, Zhao Jianlin, Zhang Xiaojuan *et al.*. Analysis of bending loss oscillations in photonic crystal fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1172~1177
崔莉, 赵建林, 张晓娟等. 光子晶体光纤的弯曲损耗振荡特性分析 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1172~1177
- 15 Guo Xiarui, Yang Dexing, Zhao Jianlin *et al.*. Experimental investigation on the bending loss properties of photonic crystal fibers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(10): 1817~1820
郭夏锐, 杨德兴, 赵建林等. 光子晶体光纤弯曲损耗特性研究 [J]. *光子学报*, 2007, **36**(10): 1817~1820
- 16 D. Yang, Y. Jiang, J. Zhao *et al.*. Measurement of low loss and mirrors' reflectivity using cavity ring down spectroscopy with high accuracy [C]. *SPIE*, 2006, **6150**: 615007-1~615007-7
- 17 Wang Chunmei, Li Jiong, Gong Tianlin *et al.*. Determination of the absolute absorption cross section of oxygen forbidden transition by cavity ring down spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 2087~2090
王春梅, 李炯, 龚天林等. 腔衰荡光谱技术测量 O₂ 禁戒跃迁绝对吸收截面 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 2087~2090
- 18 Tan Zhongqi, Long Xingwu, Huang Yun *et al.*. Etaloning effects in continuous-wave cavity ring down spectroscopy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1563~1566
谭中奇, 龙兴武, 黄云等. 连续波腔衰荡光谱技术中的标准具效应 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 1563~1566
- 19 T. von Lerber, M. W. Sigrist. Cavity-ring-down principle for fiber-optic resonators: experimental realization of bending loss and evanescent-field sensing [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(18): 3567~3575
- 20 D. E. Vogler, A. Lorenca, J. M. Rey *et al.*. Bending loss measurement using a fiber cavity ringdown scheme [J]. *Opt. Laser. Engng.*, 2005, **43**: 527~535
- 21 C. Wang, S. T. Scherrer. Fiber loop ringdown for physical sensor development: pressure sensor [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(35): 6458~6464
- 22 Chunhua Dong, Yunfeng Xiao, Yong Yang *et al.*. Directly mapping whispering gallery modes in a microsphere through modal coupling and directional emission [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(4): 300~302