

光纤型空芯光子晶体光纤低压 CO₂ 气体腔的制备

王海宾 刘 晔 王进祖 毛庆和

(中国科学院安徽光学精密机械研究所安徽光子器件与材料重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要 报道了一种低损耗小型化高纯度高稳定性的光纤型空芯光子晶体光纤(HC-PCF)低压 CO₂ 气体腔。通过采用高压待充气体对 HC-PCF 进行气体置换、利用高压填充的 HC-PCF 进行尾纤耦合, 确保了腔内填充气体的纯度; 通过熔接单模光纤(SMF)作为输入端、经陶瓷插芯套管准直对接多模光纤(MMF)作为输出端, 有效降低了插入损耗; 通过对 HC-PCF 的实时监控降压与胶封, 制备出压强低至 10 kPa 的光纤型 HC-PCF 低压 CO₂ 气体腔。该 HC-PCF 低压腔的插入损耗约为 3.5 dB, 且具有长期气密性与稳定性。这种 HC-PCF 低压气体腔在光纤气体传感、激光稳频、高分辨光谱等方面具有广泛应用前景。

关键词 光纤光学; 全光纤型低压气体腔; 空芯光子晶体光纤; 微管管流; 吸收光谱

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0706007

Preparation of All-Fiber Low-Pressure CO₂ Gas Cell Based on Hollow-Core Photonic Crystal Fiber

Wang Haibin Liu Ye Wang Jinzu Mao Qinghe

(Anhui Provincial Key Laboratory of Photonics Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract A low-loss, compact, miniaturized and stable low-pressure CO₂ cell is proposed based on hollow-core photonic crystal fiber (HC-PCF). In order to ensure the gas purity, the HC-PCF is firstly flushed with high-pressure high-purity CO₂, and then connected with conventional optical fibers under the high-pressure environment. The insertion loss of HC-PCF gas cell is reduced efficiently by splicing one end of the HC-PCF to single-mode fiber (SMF) and connecting the other end of HC-PCF to multi-mode fiber with ceramic ferrule sleeve. By placing the HC-PCF into a vacuum chamber to decompress its pressure and subsequent sealing process, a HC-PCF low-pressure CO₂ gas cell with the pressure less than 10 kPa is obtained. The insertion loss of this gas cell is approximately 3.5 dB, and the good air-tightness and long-term stability are observed. This kind of low-pressure HC-PCF gas cell may find broad applications in optical fiber gas sensing, laser frequency stabilization, and high resolution spectroscopy.

Key words fiber optics; all-fiber low-pressure gas cell; hollow-core photonic crystal fiber; micro-pipe flow; absorption spectrum

OCIS codes 060.2340; 230.1150; 300.6390

1 引 言

空芯光子晶体光纤(HC-PCF)可将光波限制在其中央大孔中传输, 具有低非线性、低散射与低传输损耗等优点^[1-3], 因而受到普遍关注。通过在 HC-PCF

中充入气体, 并将其两端分别与普通光纤密封连接, 可构成气体腔结构, 以有效增强光与气体分子间的相互作用, 并为研究气相材料的非线性与光谱特性提供了新平台^[4-8]。HC-PCF 气体腔通常可分为高

收稿日期: 2012-12-26; 收到修改稿日期: 2013-02-26

基金项目: 国家 863 计划(2011AA030203)、国家自然科学基金(11104282, 61275186, 61250017)

作者简介: 王海宾(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事光子晶体光纤器件方面的研究。

E-mail: fiber-optics@aiofm.ac.cn

导师简介: 毛庆和(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事纤维光学、激光物理和激光器件等方面的研究。

E-mail: mqinghe@aiofm.ac.cn(通信联系人)

压和低压两种,研究已表明,利用 HC-PCF 高压气体腔可有效降低气体的受激拉曼阈值^[4],在气体拉曼激光与光纤传感等方面具有潜在应用前景;而 HC-PCF 低压气体腔则具有气体吸收谱线宽窄且稳定的优点,在高分辨光谱^[9]、激光稳频^[10-13]及气体检测^[14]等方面具有重要应用前景。

英国巴斯大学于 2005 年首次成功制备了低压 HC-PCF 气体腔^[10],腔压低至数千帕,但 HC-PCF 与普通单模光纤熔接密封工艺复杂,熔接过程破坏了 HC-PCF 的微结构^[15],导致气体腔插入损耗高达 10 dB 以上,并且,开放的熔接环境造成了腔内外气体间的交换,使得 HC-PCF 气体腔中的气体腔压上升、纯度降低,不利于光谱学应用;Cubillas 等^[9,11]又采用在密闭等压室内通过 V 型槽等准直手段实现 HC-PCF 与普通光纤间的对接耦合,构建 HC-PCF 低压气体腔。然而,这种等压室密封不利于 HC-PCF 低压气体腔的小型化。国内 HC-PCF 气体腔的工作主要集中在高压腔制备与应用方面,如本课题组已成功制备出全光纤型高压气体腔^[14],并观察到了氢气的拉曼效应^[5],但对光纤型 HC-PCF 低压气体腔制备的研究报道较少。

本文研制了一种低损耗、小型化、高纯度、稳定可靠的 HC-PCF 低压 CO₂ 气体腔。通过利用高压待充气体对 HC-PCF 进行气体置换,采用高压气体填充的 HC-PCF 进行尾纤耦合,以保证腔内填充气体的纯度;通过熔接单模光纤(SMF)作为输入端,经陶瓷插芯套管准直对接多模光纤(MMF)作为输出端来降低损耗;最后再通过合理降压和胶封研制出气压达 10 kPa 的小型化 HC-PCF 低压 CO₂ 气体腔。

2 空芯光子晶体光纤低压气体腔的研制

制备光纤型 CO₂ 低压腔所采用的 HC-PCF 为丹麦 NKT 公司的 HC-1550-02 型光纤,其横截面结构如图 1 所示,中央大孔直径为 10 μm,包层孔间距为 3.8 μm,多孔区域直径为 70 μm,模场直径为 7.5 μm^[16]。为满足光长程吸收的要求,选取光纤长度 20 m。

为确保 HC-PCF 气体腔内的气体纯度,在制备前,首先采用如图 2 所示的高压 CO₂ 气体冲洗装置对 HC-PCF 内的杂质气体进行置换。将 HC-PCF 的一端与真空室密封连接,另一端与单模光纤熔接(密封),对真空室抽真空。因 HC-PCF 的孔径仅为微米量级,孔内气压沿轴向传递极其缓慢,使得即使

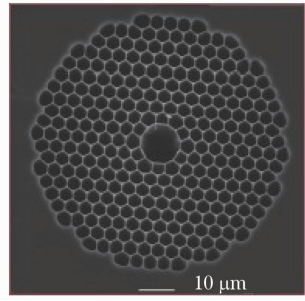


图 1 HC-PCF 截面图

Fig. 1 Cross section of HC-PCF

当真空室的真空度很高时,HC-PCF 内还残存着少量剩余气体。鉴于此,在采用高极限真空度(6×10^{-2} Pa)的真空泵将真空室的气压抽至小于 0.1 Pa (10^{-6} 个大气压)后,再往真空室 1 内持续充入 3~4 个大气压的高纯度 CO₂ 气体(质量分数为 99.9999%),当气压稳定后,断开 HC-PCF 端口 2,这时,在压差的作用下,真空室内的高纯高压 CO₂ 气体将进入 HC-PCF 中,并逐渐地将 HC-PCF 中的残存杂质气体置换出。经过 9 h 后^[14,17],高压 CO₂ 将把 HC-PCF 中空气完全置换,且 HC-PCF 内 CO₂ 气体的平均压强也达 3~4 个大气压。此时,利用光纤熔接机(Ericsson, FSU-975)将 HC-PCF 端口 2 与 SMF 熔接,其中 SMF 为康宁公司的 HI-1060 Flex 单模光纤,其模场直径约为 6.5 μm,与 HC-PCF 的模场基本匹配,通过优化熔接参数^[18],可将 SMF 至 HC-PCF 的熔接损耗控制在 2 dB 以下。

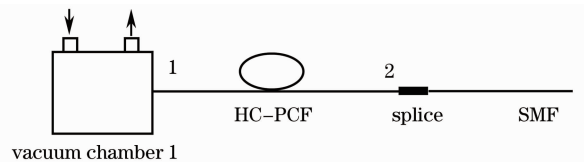


图 2 高压高纯度气体冲洗 HC-PCF 装置图

Fig. 2 Experimental setup for flushing HC-PCF with high pressure high purity CO₂

为降低全光纤型 HC-PCF 低压 CO₂ 气体腔的插入损耗,对 HC-PCF 的另一个端口则采用与多模光纤进行耦合的方案,所用 MMF 的直径为 50 μm。对接耦合时,将 HC-PCF 和 MMF 均置于内径合适的陶瓷插芯中,并将两只陶瓷插芯通过精密陶瓷套管准直对接,且两陶瓷插芯端面预留小于 20 μm 的间隙,以利于后续低压腔制备。需要指出的是,上述 HC-PCF 和 MMF 耦合对接过程需约 1 h,但是,由于 SMF 熔接后 HC-PCF 腔内气压为 3~4 个大气压,当截断端口 1 后,其本身孔径所决定的腔内高压 CO₂ 气体向外扩散速度极为缓慢^[14],使得即使制备

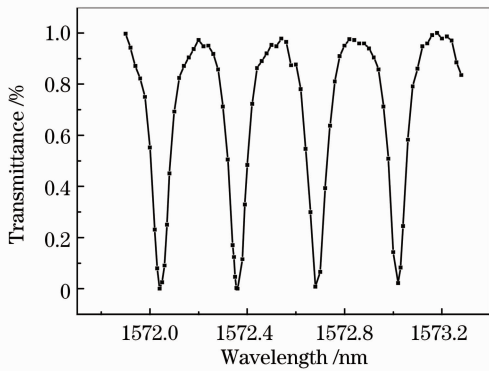


图 3 端口 1 断开 1 h 后 HC-PCF 腔内 CO₂ 吸收光谱

Fig. 3 Absorption spectrum of the HC-PCF gas cell filled with CO₂ after port 1 of HC-PCF is opened for one hour

HC-PCF 和 MMF 耦合对接端口需近 1 h, 外界空气也不会进入到 HC-PCF 腔中造成气体污染。图 3 为实验监测的完成耦合对接后 HC-PCF 气体腔内的 CO₂ 吸收光谱, 可见谱线的线宽(半峰全宽)约为 0.1 nm, 大于高分辨率光谱谱线(HITRAN)数据库

给出的常压下 CO₂ 谱线宽度 0.075 nm^[19], 表明腔内 CO₂ 的气压仍高于常压。

将与 SMF 和 MMF 连接好的 HC-PCF 高压 CO₂ 气体腔再放入如图 4 所示的真空室 2 中, 该真空气室配有充、抽气端口及压强检测仪, 在放置 HC-PCF 高压 CO₂ 气体腔前, 该真空室已进行过抽真空, 并充入了高于常压的高纯 CO₂ 气体。放入 HC-PCF 高压 CO₂ 气体腔后, 再对真空腔 2 抽低压, 其中真空腔为 HC-PCF 气体腔降压装置由于 HC-PCF 的空气孔较小, 其腔内气压与低压真空室气压达到平衡所需的时间长达数小时甚至数十小时^[17], 且该过程中 HC-PCF 腔的实际压强与真空气室 2 中仪表显示的压强有差别。为确定 HC-PCF 气体腔内的真实压强, 采用了如图 4 所示的光谱分析技术来实时监测腔内气压。所用激光源为线宽 30 MHz 的可调谐激光器(Agilent 8164B), 通过将实验测得的吸收光谱与 HITRAN 数据库结果对比, 得出 HC-PCF 气体腔的气压值。

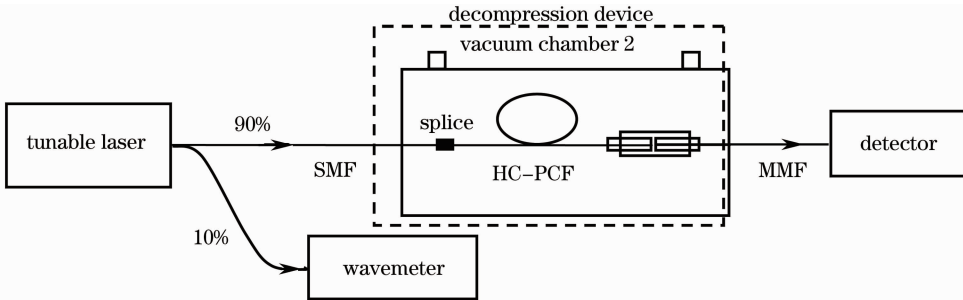


图 4 HC-PCF 气体腔腔压实时光谱检测系统

Fig. 4 Real-time spectral detection system for determining the pressure of the HC-PCF gas cell

图 5 为真空室压强设定值持续减小且静置 2 天后测得的 HC-PCF 低压 CO₂ 气体腔的吸收光谱, 图中也给出了与实测吸收线宽(3 dB)相同时以佛赫特(Voigt)吸收线型通过 Whiting 拟合的 CO₂ 吸收谱线^[20-21], 离散点和实线分别为实测和理论结果。P₀ 为理论拟合得到的 HC-PCF 内的压强, P 为实验中真空气室压强计的读数。由图 5 可见, 随着压强降低, 吸收谱线变窄。当分别将真空室压强设定为 98、51、22、9.8 kPa 并静置 2 天后实测的 HC-PCF 低压 CO₂ 气体腔吸收线宽分别约为 0.082、0.045、0.02、0.011 nm。通过将测量的吸收谱线与 HITRAN 数据库比对, 容易得出 HC-PCF 气体腔的压强分别为 98.1、53、23.5、11.7 kPa, 这与实验中真空室 2 的压强计读数 98、51、22、9.8 kPa 吻合得较好, 这也说明静置 2 天后 HC-PCF 腔与真空室

基本达到了气压平衡。

3 测试结果与讨论

监测确定 HC-PCF 腔内气压稳定后, 打开真空室, 用真空胶迅速将陶瓷套管连接处密封。为确保接头的密封且稳定可靠, 将 HF-PCF 和 MMF 耦合对接端口置入自制铝盒中, 并对铝盒进行二次密封, 最后得到如图 6 所示的 HC-PCF 低压 CO₂ 气体腔。

图 7(a) 为密封前后实验测得的 HC-PCF 低压 CO₂ 气体腔吸收光谱, 由该图可以看出, 密封前后的吸收光谱未发生明显改变。这主要由于密封胶时间短于 1 min, 使得胶封过程中进入腔内的外界气体可忽略, 即密封前后 HC-PCF 气体腔的压强几乎不变。最后, 对该密封后的低压气体腔的稳定性进行了评估。图 7(b) 给出了在不同时间 HC-PCF 低压

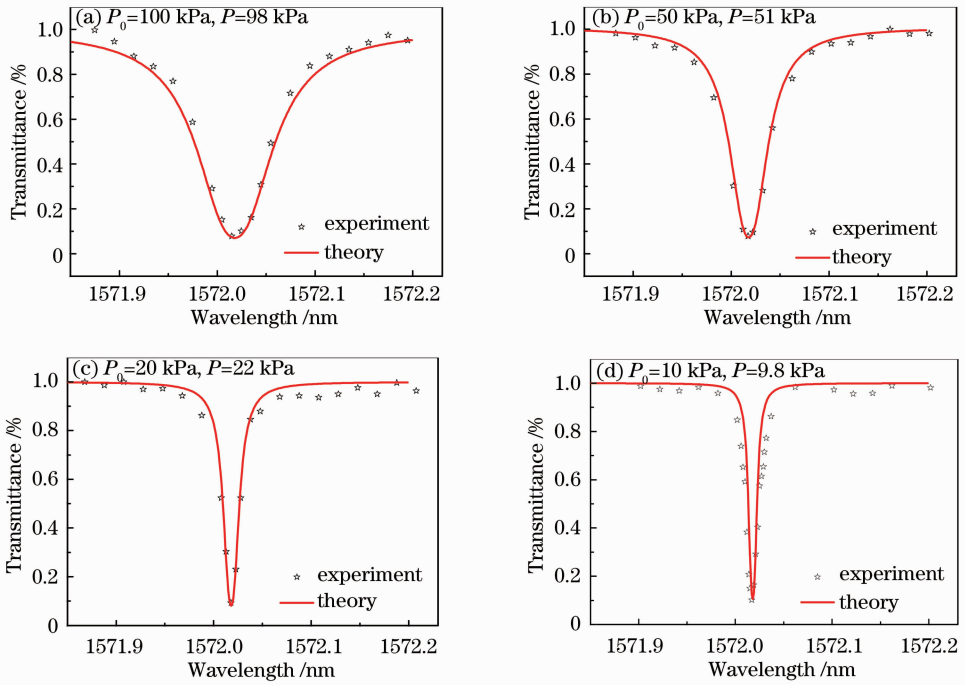


图 5 不同压强下 HC-PCF 低压 CO₂ 气体腔的吸收光谱

Fig. 5 Absorption spectra of HC-PCF CO₂ gas cell at different pressures

CO₂ 气体腔吸收谱的测量结果。图 7 中光谱的细微变化主要来源于测量所用激光光源的可能功率波动及调谐精度限制等因素。可见,在长达一个月的时间后,HC-PCF 低压 CO₂ 气体腔的吸收光谱也基本不变,表明该低压腔具有良好的气密性与稳定性。实验中研制的 HC-PCF 低压 CO₂ 气体腔分别采用了 SMF 和 MMF 作为输入和输出尾纤,这主要是考虑到在大多实际光谱分析应用中,HC-PCF 低压 CO₂ 气体腔均为单向光传输,而通过选用 SMF 和 MMF 分别作为输入和输出光纤则可有效降低这种单向光传输的插入损耗。通过测试发现该气体腔在 1.5 μm 波段的插入损耗约为 3.5 dB(SMF 至

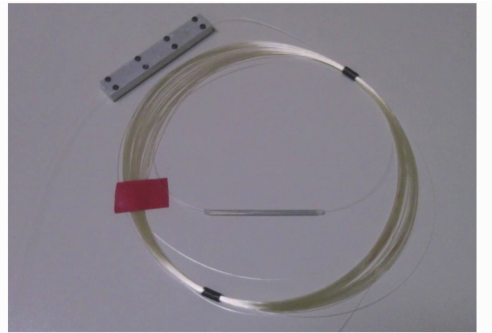


图 6 HC-PCF 低压气体腔实物图

Fig. 6 Sealed low-pressure HC-PCF gas cell (MMF),表明该气体腔具有低插入损耗特性。

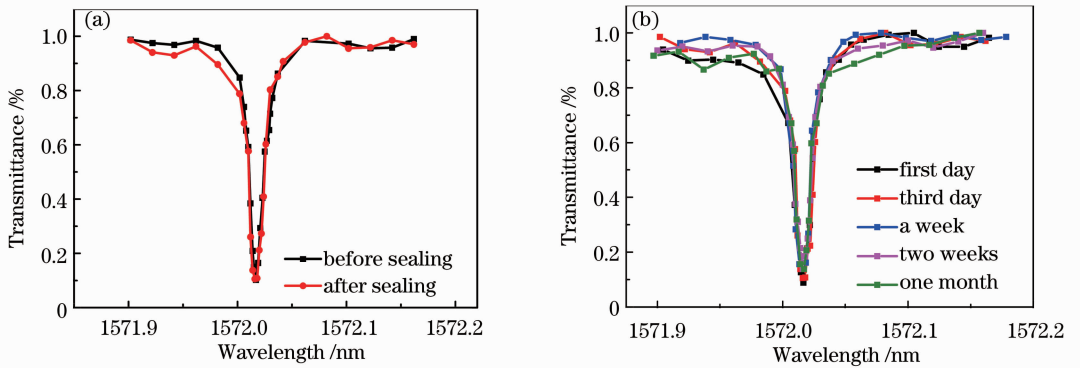


图 7 (a)密封前后测量的 CO₂ 吸收光谱;(b)密封后不同时间测量的 CO₂ 吸收光谱

Fig. 7 (a) Measured CO₂ absorption spectra before and after sealing process; (b) measured CO₂ absorption spectra at different times after sealing

4 结 论

制备了一种全光纤型的低损耗、稳定可靠的 HC-PCF 低压 CO₂ 气体腔,并对其损耗和稳定性等进行了评估。通过对 HC-PCF 进行高压气体置换确保腔内待充气体的纯度;并在高压情况下将 HC-PCF 分别与 SMF 和 MMF 连接,有效避免外界气体对腔内气体的污染;将高压 HC-PCF 放入真空气室中进行降压,并利用实时监测的吸收光谱以确定 HC-PCF 内的气压;最后采用真空胶对腔进行密封,制备得到 HC-PCF 低压 CO₂ 气体腔。测试结果表明,此真空腔的腔压为 10 kPa,插入损耗为 3.5 dB,胶封前后吸收光谱未发生明显改变,且该 HC-PCF 低压腔具有良好的长期稳定性及气密性。这种全光纤型、小型化的 HC-PCF 低压 CO₂ 气体腔在研究光与气体相互作用、光纤气体传感、激光稳频、高分辨光谱等方面具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Cregan R F, Mangan B J, Knight J C, *et al.*. Single-mode photonic band gap guidance of light in air [J]. *Science*, 1999, 285 (5433): 1537—1539.
- 2 Smith C M, Venkataraman N, Gallagher M T, *et al.*. Low-loss hollow-core silica/air photonic bandgap fibre [J]. *Nature*, 2003, 424(6949): 657—659.
- 3 Hansen T P, Broeng J, Jakobsen C, *et al.*. Air-guiding photonic bandgap fibers: spectral properties, macrobending loss, and practical handling [J]. *J Lightwave Technol*, 2004, 22(1): 11—15.
- 4 Benabid F, Knight J C, Russell P St J. Stimulate Raman scattering in hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Science*, 2002, 298(5592): 399—402.
- 5 Chen X D, Mao Q H, Sun Q, *et al.*. An all-fiber gas Raman light source based on a hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber pumped with a Q-switched fiber laser [J]. *Chin Phys Lett*, 2011, 28(7): 074201.
- 6 Ghosh S, Sharping J E, Ouzounov D G, *et al.*. Resonant optical interactions with molecules confined in photonic band-gap fibers [J]. *Phys Rev Lett*, 2005, 94(9): 093092.
- 7 Benabid F, Light P S, Couny F, *et al.*. Electromagnetically-induced transparency grid in acetylene-filled hollow-core PCF [J]. *Opt Express*, 2005, 13(15): 5694—5703.
- 8 Henningsen J, Hald J, Petersen J C. Saturated absorption in acetylene and hydrogen cyanide in hollow-core photonic bandgap

- fibers [J]. *Opt Express*, 2005, 13(26):10475—10482.
- 9 Cubillas A M, Hald J, Petersen J C. High resolution spectroscopy of ammonia in a hollow-core fiber [J]. *Opt Express*, 2008, 16(6): 3976—3985.
- 10 Benabid F, Couny F, Knight J C, *et al.*. Compact, stable and efficient all-fiber gas cells using hollow-core photonic crystal fibres [J]. *Nature*, 2005, 434(7032): 488—491.
- 11 Tuominen J, Ritari T, Ludvigsen H, *et al.*. Gas filled photonic crystal fibers as wavelength references [J]. *Opt Commun*, 2005, 255(4-6): 272—277.
- 12 Marty P T, Morel J, Feurer T. All-fiber frequency-stabilized erbium doped ring laser [J]. *Opt Express*, 2010, 18 (26): 26821—26827.
- 13 Cui Junhong, Ding Hui, Li Xianli, *et al.*. Acetylene sensing system using hollow-core photonic crystal fiber as gas cell [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2262—2266.
崔俊红, 丁 晖, 李仙丽, 等. 基于空芯光子晶体光纤气体吸收腔的乙炔检测系统[J]. *光学学报*, 2010, 30(8): 2262—2266.
- 14 Sun Qing, Liu Erming, Qin Fenghua, *et al.*. All-fiber high-pressure gas cell based on hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(7):1029—1034.
孙 青, 刘二明, 秦丰华, 等. 全光纤型空芯光子晶体光纤高压气体腔[J]. *中国激光*, 2008, 35(7): 1029—1034.
- 15 Couny F, Light P S, Benabid F. Electromagnetically-induced transparency and saturable absorption in all-fiber devices based on ¹²C₂H₂-filled hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Opt Commun*, 2006, 263(1): 28—31.
- 16 Xiao L, Demokan M S, Jin W, *et al.*. Fusion splicing photonic crystal fiber and conventional single-mode fibers: microhole collapse effect [J]. *J Lightwave Technol*, 2007, 25(11): 3563—3574.
- 17 Henningsen J, Hald J. Dynamics of gas flow in hollow core photonic bandgap fibers [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(15): 2790—2797.
- 18 Thapa R, Knabe K, Corwin K L, *et al.*. Arc fusion splicing of hollow-core photonic bandgap fibers for gas-filled fiber cells [J]. *Opt Express*, 2006, 14(21): 9576—9583.
- 19 Lackner M, Schwarzott M, Winter F, *et al.*. CO and CO₂ spectroscopy using a 60 nm broadband tunable MEMS-VCSEL at ~1.55 μm [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(21): 3170—3172.
- 20 Gordley L L, Marshall B T, Allenchu D. Linepak: algorithms for modeling spectral transmittance and radiance [J]. *J Quantum Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1994, 52(5): 563—580.
- 21 Gao Xiaoming, Huang Wei, Deng Lunhua, *et al.*. Measurement of self-broadening and N₂ broadening coefficients of water vapor molecule near 1.31 μm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(5): 641—646.
高晓明, 黄 伟, 邓伦华, 等. 1.31 μm 附近水汽分子的自加宽系数、氮气加宽系数的测量[J]. *光学学报*, 2006, 26(5): 641—646.

栏目编辑: 王晓琪