

He气辅助熔接的全光纤型HC-PCF低压气体腔的制备

郝 军¹ 刘 晔^{1*} 李文彩¹ 陈迪俊² 冯素娟¹ 蔡海文² 毛庆和^{1*}

¹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

²中国科学院上海光学精密机械研究所, 空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800

摘要 提出了一种He气辅助熔接的全光纤型空芯光子晶体光纤(HC-PCF)低压气体腔的制备方法。通过用高压待充气体冲洗HC-PCF, 确保了腔内的气体纯度; 通过利用光谱监测系统监测HC-PCF降压过程及He气辅助熔接过程中CO₂吸收光谱的变化, 研究了HC-PCF中气体动力学运动过程; 通过利用He气辅助熔接方法, 制备得到压强为7 kPa、插入损耗小于2 dB、长度为10 m的全光纤型HC-PCF低压CO₂气体腔。该方法也适用于更低压强的HC-PCF气体腔的研制, 且制备的气体腔具有良好的气密性和长期稳定性。

关键词 光纤光学; 全光纤型低压气体腔; He辅助熔接; 吸收光谱

中图分类号 TN253 文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0906001

Preparation of All-Fiber HC-PCF Low-Pressure Gas Cell by the He-Assisted Fusion Splicing Technique

Hao Jun¹ Liu Ye¹ Li Wencai¹ Chen Dijun² Feng Sujuan¹ Cai Haiwen² Mao Qinghe¹

¹Anhui Provincial Key Laboratory of Photonics Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

²Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Fine Mechanics and Optics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract A method of He-assisted fusion splicing is demonstrated to prepare the all-fiber hollow-core photonic crystal fiber (HC-PCF) low-pressure gas cell. In the preparing process, the high gas purity is guaranteed by flushing the HC-PCF with the high-pressure desired gas; the dynamical gas flow in the HC-PCF is studied with a self-made real-time spectral detection system; and a 10 m all-fiber HC-PCF low-pressure CO₂ gas cell with the pressure of 70 kPa and insertion loss less than 2 dB is successfully prepared by He-assisted fusion splicing technique. This method may also be suitable for the fabrication of HC-PCF gas cell with lower pressure, and the prepared gas cell shows good air-tightness and long-term stability.

Key words fiber optics; all-fiber low-pressure gas cell; He-assisted fusion splicing; absorption spectrum

OCIS codes 060.2340; 230.1150; 300.6390

1 引言

窄线宽高稳定性激光器在激光光谱、精密测量、光频标及光通信等领域都具有重要的应用^[1-3]。然而,受温度、振动等环境因素影响,单纵模激光器输出激光的频率会发生随机漂移,实际应用中必须对激光频率进行稳定^[1-2]。采用低热膨胀系数材料构建谐振腔,并对谐振腔进行恒温、防震等控制,可将激光器频率漂移的

收稿日期: 2015-03-18; 收到修改稿日期: 2015-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(61377044, 61275186, 11104282)、国家973计划(2013CB934304)

作者简介: 郝 军(1986—),男,硕士研究生,主要从事光子晶体光纤器件及光纤激光技术等方面的研究。

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。E-mail: liuye@aiofm.ac.cn, mqinghe@aiofm.ac.cn

长期稳定度控制在 10^{-7} 量级^[4], 但要获得更高频率稳定度, 则必须采用主动稳频技术, 即采用负反馈伺服电子系统将激光器频率锁定在某个标准频率参考上^[4], 因此, 这种标准频率参考是激光稳频技术的关键部件。通常, 采用原子跃迁谱线^[5]、高精度 F-P 腔的透射峰^[6]、气体分子或原子吸收谱线^[7-8]等作为标准频率参考。前两种频率参考的精度高、稳定性好, 但结构复杂且价格昂贵; 而后一种频率参考虽在稳频精度上略低, 但结构简单、易于实现, 更受人们关注^[7-9]。气体吸收线频率参考一般通过将较大吸收系数的气体分子(如乙炔、甲烷、二氧化碳等)充入气体吸收池获得^[3,7-13]。常用气体吸收池包括 White 池和 Herriott 池等长程吸收池, 但这类传统吸收池体积大、结构复杂、稳定性差, 且因在吸收池内的多次光反射, 造成吸收池损耗过大。

近年发展起来的基于空芯光子晶体光纤(HC-PCF)的低压气体吸收腔具有结构紧凑、光与气体介质相互作用强、相互作用距离长以及抗干扰能力强等优点, 在激光稳频技术方面展示出了重要应用前景^[10-13], 并且针对 HC-PCF 低压气体腔开展了大量研究与研制工作。通常, 制备 HC-PCF 低压气体腔可分为气体置换、低压气体填充与低压气体腔密封三步, 其中, 低压气体腔密封是制备的关键^[14]。常用密封方案有两种, 1) 等压腔密封, 即在气压控制的密闭腔中用同轴结构(陶瓷插芯或 V 型槽)把 HC-PCF 与普通光纤对接耦合, 美国加州理工大学、丹麦基础计量研究院以及香港理工大学、天津大学、中国计量学院等^[15-20]研究机构利用该方法已制备出了多种等压腔型 HC-PCF 低压气体腔, 但是, 这种密封方案使得气体腔难以小型化, 且同轴结构光纤对接耦合损耗大、长期稳定性差; 2) 低压腔密封方案则采用光纤熔接密封, 即将 HC-PCF 与普通石英光纤直接熔接实现密封^[14], 该密封方案可构建小型化、稳定性好的全光纤型 HC-PCF 低压气体腔, 但开放熔接环境将不可避免地影响低压气体腔的纯度与气压。为此, 英国 Bath 大学的研究人员^[21-23]开展了系列的研究工作, 先后提出拉锥熔接法和 He 气辅助熔接法等技术, 以尽可能减少熔接过程造成的不利影响。

本课题组采用陶瓷插芯对接耦合并结合胶封的方法, 已经研制了一种小型化等压腔型 HC-PCF 低压气体腔^[23], 并用作半导体激光器稳频的频率参考, 实现了 1 h 内漂移量约 40 MHz 的稳频结果^[13], 但是, 采用该方法制备 HC-PCF 低压气体腔时, 腔压已难以进一步降低, 故稳频精度亦难以进一步提高。本文前期研究的基础上^[23-24], 结合 He 气辅助熔接技术, 成功研制了一种全光纤型高纯度的 HC-PCF 低压气体腔, 该全光纤型 HC-PCF 低压气体腔具有插入损耗小、稳定性高、腔压可以精确控制等优点, 有望进一步提高激光稳频的精度、降低激光稳频系统的复杂性。

2 全光纤低压气体吸收腔研制

研制全光纤型低压气体腔所用 HC-PCF 为丹麦 NKT 公司生产的 HC19-1550-01 型 HC-PCF, 其横截面结构如图 1 所示, 中央大孔直径为 $20\ \mu\text{m}$, 包层孔间距为 $3.9\ \mu\text{m}$, 多孔区域直径为 $73\ \mu\text{m}$, 单模传输带中心波长 $1570\ \text{nm}$ 处的模场直径为 $13\ \mu\text{m}$, 选定 HC-PCF 长度为 $10\ \text{m}$ 。该型号 HC-PCF 中央大孔直径相对较大, 可有效减小表面模效应对气体吸收谱的加宽^[25]。全光纤型低压气体腔采用 He 气辅助熔接技术, 填充气体为 CO_2 , 制备过程分为三步: 高纯气体置换、HC-PCF 气体腔降压以及低压腔全光纤熔接密封。

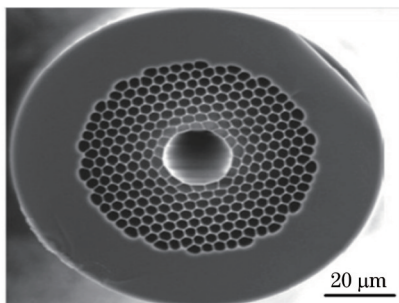


图 1 HC19-1550-01 型 HC-PCF 横截面图

Fig.1 Cross section of HC-PCF with the type of HC19-1550-01

2.1 高纯气体置换

图 2 是对 HC-PCF 中杂质气体进行高纯度气体置换装置示意图。如图所示, HC-PCF 与真空气室 1 相连接, 气室体积约为 $50\ \text{mL}$, 通过抽气阀门 A 和进气阀门 B 分别连接至高极限真空度 ($0.06\ \text{Pa}$) 的真空泵和高纯

CO₂气体钢瓶(质量分数为99.9999%)。实验中,先打开抽气阀门A对真空气室抽真空,因其体积仅为50 mL,1 min后气压即小于0.1 Pa,尽管真空气室的低压会使外部空气经HC-PCF的开放端口接入HC-PCF,但HC-PCF中央大孔直径仅约20 μm,这种外部杂质空气对HC-PCF的入侵属微管管流效应,极为缓慢,可忽略^[25-26]。持续抽真空10 min后,关闭阀门A,调节进气阀门B充入约200 kPa的高纯CO₂气体,该高压高纯CO₂气体经微管管流效应流向HC-PCF的2端,经约9 h后,HC-PCF中CO₂气压高于常压,从而有效地置换出了HC-PCF中的杂质气体。

置换完成后,截断HC-PCF与真空气室相连的1端口,利用光纤熔接机(Ericsson, FSU-975)将其与普通单模光纤(Corning, SMF-28e)熔接,熔接过程约1 min。由于熔接时HC-PCF中的CO₂气体压力高于常压,且HC-PCF中高压气体泄漏过程缓慢^[26-27],故该熔接过程不影响HC-PCF中CO₂气体的高纯度。图3为HC-PCF与普通单模光纤熔接后的显微放大照片,可见两光纤中心轴线基本对齐,熔接偏差小,且熔接端面平整,从而熔接损耗较小,小于1 dB。

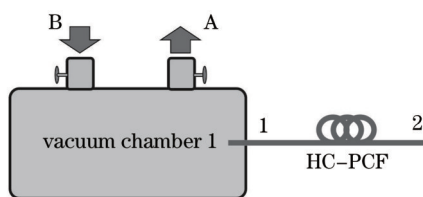


图2 HC-PCF中气体置换装置

Fig.2 Experimental setup for flushing the gas in HC-PCF

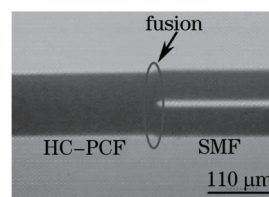


图3 HC-PCF与SMF熔接后的显微照片

Fig.3 Micrograph showing the splice between 20 μm HC-PCF and SMF

2.2 HC-PCF气体腔降压过程

完成气体置换后,HC-PCF内部填充了高于100 kPa的高纯CO₂气体,此时,将HC-PCF的2端与低压真空气室2连通进行降压,降压过程由图4(a)所示的自行研制的实时光谱检测系统监控。真空气室2体积为50 mL,配有进气和出气阀门,可分别与真空泵和高纯He气或者CO₂气钢瓶相连接,真空气室2中放置了InGaAs光电探测器,对由半导体激光器经单模尾纤输出、功率耦合比9:1分光后再经HC-PCF传输的激光进行探测,该半导体激光器的中心波长为1572 nm,处在CO₂近红外泛频吸收带附近。通过对半导体激光器的驱动电流进行锯齿波调制,可在示波器上监测HC-PCF腔内CO₂气体的吸收谱特性。图4(b)给出了降压过程中HC-PCF气体腔的典型CO₂吸收谱测量结果,其中蓝线和黄线分别为参考光信号和经HC-PCF吸收后的光信号,二者的比值即为HC-PCF内CO₂的吸收光谱。对测得的吸收谱采用Voigt线型进行Whiting拟合,并与高分辨率光谱谱线(HITRAN)数据库比对,即可得到HC-PCF内气体的平均压强^[20]。

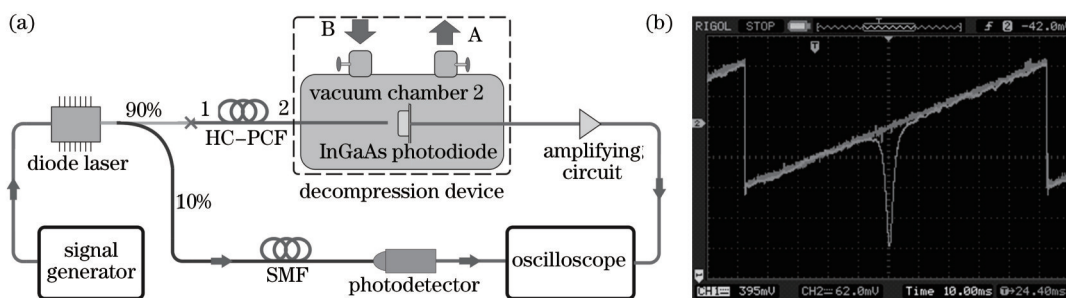


图4 (a)实时光谱检测系统;(b)典型的示波器测量结果

Fig.4 (a) Real-time spectrum detection system; (b) typical measured results displayed on the oscilloscope

为避免急剧降压造成HC-PCF内压差过大而引起的对光纤微结构可能的破坏,降压过程分为两步,先将HC-PCF气压降至100 kPa,即将真空气室2抽真空后,立即充入100 kPa的高纯度CO₂,因HC-PCF内CO₂气压高于真空气室2中的气体压强,CO₂气体将从HC-PCF中流动至真空气室2,经0.6 h时间后,吸收谱宽度和吸收深度几乎不再变化,表明真空气室内与HC-PCF中气压基本达到平衡;这时,再将真空气室2抽气至设定低压的50%(3.5 kPa),于是,HC-PCF内CO₂气体将继续向真空气室2中扩散,HC-PCF内的气体压强将缓慢降低。此处需要指出的是,分步降压的次数不会影响HC-PCF内的最终压强,但会延长降压所需时间^[24]。

图 5(a)为降压过程中不同时刻下测得的吸收光谱,图中时间零点设定在第一阶段抽气开始时刻。由图可知,随着降压时间的延长,HC-PCF内平均气压逐渐降低,吸收光谱宽度变窄;同时,随着气压降低,HC-PCF内CO₂分子浓度下降,吸收谱强度亦逐渐减弱。图 5(b)为数据处理后得到的 HC-PCF 内 CO₂ 气体压强在降压过程中的变化。由图可知,随着降压时间延长,HC-PCF 内气压逐渐降低,且降压速度先快后慢。降压开始($t=0$ h)时,HC-PCF 内平均气压约为 150 kPa;经 $t\approx 0.6$ h 后,气压快速降至 100 kPa,第一阶段降压过程结束;第二阶段降压过程开始阶段,HC-PCF 内气压继续快速降低,至 $t\approx 2.45$ h 后,腔内平均压强降为 37.7 kPa;之后降压速度趋缓,至 $t\approx 18.4$ h 时,腔内气压降至约 7 kPa。

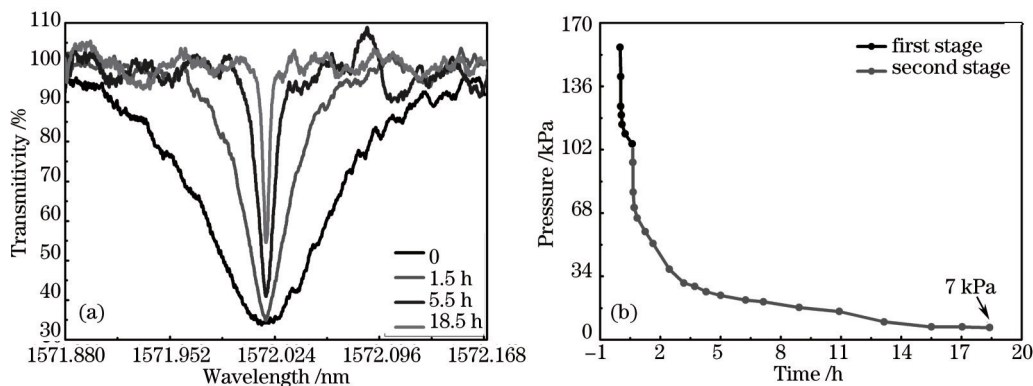


图 5 (a) 不同抽气时间的 CO₂ 吸收光谱;(b) HC-PCF 内气体平均压强随抽气时间的变化

Fig. 5 (a) CO₂ absorption spectra at different times during the evacuating process;

(b) changes of gas average pressures in the HC-PCF with the time during the evacuating process

2.3 He 辅助 HC-PCF 低压腔熔接密封

当 HC-PCF 内 CO₂ 气压达到 7 kPa 时,将普通单模光纤与 HC-PCF 的 2 端口熔接密封,以获得全光纤型低压气体腔。为此,熔接前向真空气室 2 内充入 150 kPa 的 He 气,约 0.25 h 后,再将图 4(a)所示的 HC-PCF 端口 2 断开,快速将其与普通单模光纤熔接密封,整个熔接过程约 1 min。由于高压 He 气已使 HC-PCF 内端口 2 附近一端的气压高于常压,故在熔接过程中无外界杂质气体侵入。同时,He 气具有高渗透性,能穿透光纤壁渗透出来^[21],故待 He 气完全从腔内渗透出来后,HC-PCF 内仅剩下低压待充气体,从而实现 HC-PCF 低压腔的制备。

利用图 4(a)中的实时光谱监测系统,对 He 气辅助熔接前后的 CO₂ 吸收谱进行了监测。图 6(a)为开始填充 He 气($t=0$)、熔接过程之前($t=0.25$ h)和熔接过程完成后($t=0.5, 2.5, 4.5, 30$ h)测量得到的 CO₂ 吸收谱;图 6(b)为不同时刻吸收谱的谱宽和强度变化。由图可知,熔接前($0 < t < 0.25$ h),等压真空气室 2 内的 He 气快速进入到 HC-PCF 低压腔内,使得 HC-PCF 气体腔的总气压升高,从而其吸收谱宽因碰撞加剧而迅速加宽、强度减弱;熔接密封后,即 $t > 0.25$ h 时,密封端的高压 He 气将向 HC-PCF 低压端流动,同时,He 气通过 HC-PCF 壁渗透出来;但在开始阶段,He 气在 HC-PCF 中的流动速度大于渗透速度^[21],高压 He 气在 HC-PCF 内持续流向低压

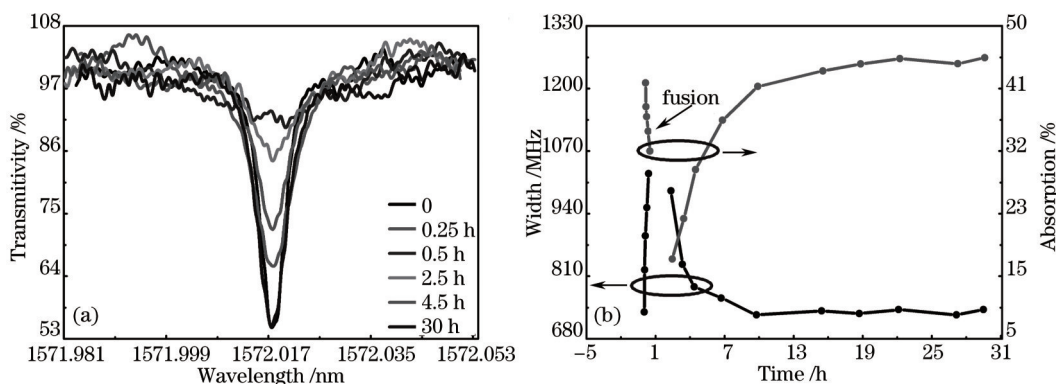


图 6 (a) 充入 He 后不同时刻腔内 CO₂ 的吸收光谱;(b) CO₂ 吸收光谱宽度与强度随时间的变化

Fig.6 (a) Measured CO₂ absorption spectra at different times after He loading; (b) changes of the measured linewidths and peak absorptions of CO₂ in the cell loaded by high-pressure He with the time

端使得腔内更多的 CO_2 分子处在相对高的气压环境、与 He 间的碰撞加剧,从而导致 CO_2 吸收谱的线宽增加、强度减弱。当 $0.5 \text{ h} < t < 2.5 \text{ h}$ 时,难以测量 HC-PCF 腔内 CO_2 的吸收谱数据;随着时间的延长,HC-PCF 内气压趋于平衡,且因 He 气不断往外渗透,使得腔内 CO_2 分子所处的平均压强降低,碰撞减弱,当 $t=2.5 \text{ h}$ 时, CO_2 吸收谱重新被观察到,且随着时间的进一步增加,吸收谱变窄、强度增加。由于 He 气的渗透速度与 HC-PCF 腔内气压密切相关,压强越大,渗透速度越快,故随着时间的延长 ($t > 2.5 \text{ h}$),吸收光谱的线宽变窄与深度变深的速度均呈现先快后慢的过程;当 $t \approx 30 \text{ h}$ 时,吸收谱宽度(深度)与充 He 气前基本一致,表明 He 气基本完全渗透出去,HC-PCF 中仅剩下压强约为 7 kPa 的低压 CO_2 气体,从而实现 HC-PCF 低压腔的制备。

3 全光纤型低压气体吸收腔性能测试

图 7(a)为研制的全光纤型 HC-PCF 低压 CO_2 气体腔实物照片,腔长为 10 m ,压强 7 kPa ,对比度约为 50% ;腔两端配有 FC-PC(或 FC-APC)标准单模光纤接口,使用方便。通过改变半导体激光器的驱动电流可将激光器中心波长调至远离 CO_2 的吸收峰,实验中调为 1572.028 nm ,当该全光纤型 HC-PCF 低压 CO_2 气体腔的输入光功率为 10 mW 时,测得输出功率为 6.4 mW ,表明其插入损耗小于 2 dB 。实验中对该气体腔的长期稳定性也进行了测试。图 7(b)为对该全光纤型 HC-PCF 低压气体腔吸收光谱的长期测量结果,可以看出,在长达半年的时间里,吸收光谱基本未发生改变,表明该 HC-PCF 低压气体腔具有良好的气密性与长期稳定性。

最后,值得指出的是,HC-PCF 的长度、制备时 HC-PCF 与单模光纤的熔接偏差等均会影响 HC-PCF 低压气体腔的制备及性能。通常地,HC-PCF 低压气体腔的长度越长,降压过程所需时间延长,吸收光谱的对比度增加;而 HC-PCF 与单模光纤的熔接偏差将直接影晌到低压腔的损耗及稳定性,偏差越小,腔损耗越低,气密性及长期稳定性越好。通过优化熔接参数,该高压 He 气辅助熔接方法可适用于任意腔压、任意长度的全光纤型 HC-PCF 低压气体腔的研制。

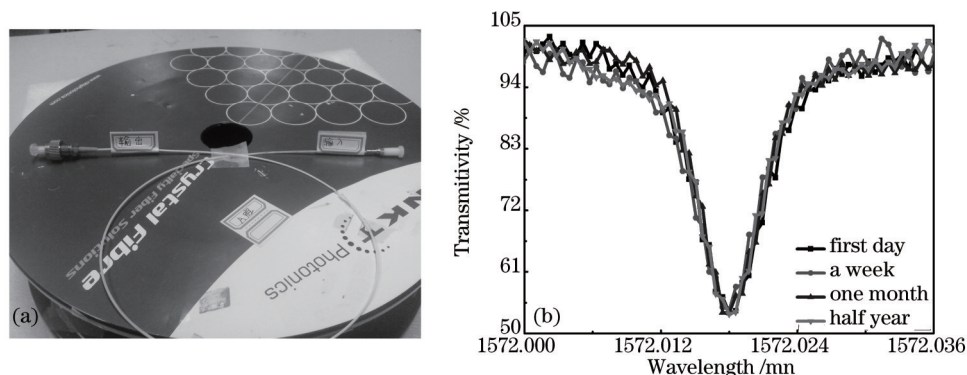


图 7 (a)全光纤型 HC-PCF 低压气体腔的实物图;(b) He 气渗透完全后不同时刻下 CO_2 吸收谱

Fig.7 (a) Prepared all-fiber HC-PCF low-pressure gas cell; (b) measured CO_2 absorption spectra at different times after the completed leaking of He gas

4 结 论

研究出一种 He 气辅助熔接的全光纤型 HC-PCF 低压 CO_2 气体腔的制备方法,利用高压待充 CO_2 气体冲洗 HC-PCF,完全置换了腔内杂质气体,保证了腔内气体纯度;采用光谱实时检测系统,监测到 HC-PCF 气体腔的降压过程,特别是监测出 HC-PCF 低压 CO_2 气体腔在高压 He 气注入后的 CO_2 吸收光谱演变行为。以此为基础,在高压 He 气辅助下,实现 HC-PCF 低压腔与普通单模光纤间无杂质气体进入的低损耗熔接。经测试,制备的全光纤型 HC-PCF 低压 CO_2 气体腔的插入损耗小于 2 dB ,且具有良好的气密性和长期稳定性。这种性能优良的全光纤型 HC-PCF 低压气体腔在激光稳频、高分辨光谱、光通信等领域具有重要的应用前景。

参 考 文 献

- 1 A M Cubillas, J Hald, J C Petersen. High resolution spectroscopy of ammonia in a hollow-core fiber[J]. Opt Express, 2008, 16(6): 3976-3985.

- 2 M J Thorpe, L Rippe, T M Fortier, *et al.*. Frequency stabilization to 6×10^{-16} via spectral-hole burning[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(11): 688–693.
- 3 X F Li, J X Liang, Y Zimin, *et al.*. U-band wavelength references based on photonic bandgap fiber technology[J]. *J Lightwave Technol*, 2011, 29(19): 2934–2939.
- 4 Lan Xinju. *Laser Technology*[M]. Beijing: Science Press, 2009: 223–247.
蓝信钜. *激光技术*[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 223–247.
- 5 W G Yang, D B Conkey, B Wu, *et al.*. Atomic spectroscopy on a chip[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(6): 331–335.
- 6 B Mikel, Z Buchta, J Lazar, *et al.*. Stabilization of DFB laser diodes with 760 nm and 1541 nm wavelength[C]. *SPIE*, 2011, 8306: 83060F.
- 7 J Hald, J C Petersen, J Henningsen. Saturated optical absorption by slow molecules in hollow-core photonic band-gap fibers[J]. *Phys Rev Lett*, 2007, 98(21): 213902.
- 8 K Knabe, S Wu, J Lim, *et al.*. 10 kHz accuracy of an optical frequency reference based on $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ -filled large-core kagome photonic crystal fibers[J]. *Opt Express*, 2009, 17(18): 16017–16026.
- 9 V Leonhardt, J H Chow, J B Camp. Laser frequency stabilization to molecular resonances for TPF-C, LISA, and MAXIM[C]. *SPIE*, 2006, 6265: 62652M.
- 10 K Numata, J R Chen, S T Wu, *et al.*. Frequency stabilization of distributed-feedback laser diodes at 1572 nm for lidar measurements of atmospheric carbon dioxide[J]. *Appl Opt*, 2011, 50(7): 1047–1056.
- 11 S Wu, C C Wang, C Fourcade-Dutin, *et al.*. Direct fiber comb stabilization to a gas-filled hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Opt Express*, 2014, 22(19): 23704–23715.
- 12 P Meras, I Y Poberezhskiy, D H Chang, *et al.*. Frequency stabilization of a 2.05 μm laser using hollow-core fiber CO_2 frequency reference cell[C]. *SPIE*, 2010, 7677: 767713.
- 13 C D Huang, D J Chen, H W Cai, *et al.*. Transmission characteristics of photonic crystal fiber gas cell used in frequency stabilized laser[J]. *Chin Opt Lett*, 2014, 12(8): 080602.
- 14 F Benabid, F Couny, J C Knight, *et al.*. Compact, stable and efficient all-fiber gas cells using hollow-core photonic crystal fibres[J]. *Nature*, 2005, 434(7032): 488–491.
- 15 P Meras, I Y Poberezhskiy, D H Chang, *et al.*. Laser frequency stabilization for coherent lidar applications using novel all-fiber gas reference cell fabrication technique[J]. *The 24th International Laser Radar Conference*, 2008: 23–27.
- 16 J Tuominen, T Ritari, H Ludvigsen, *et al.*. Gas filled photonic bandgap fibers as wavelength references[J]. *Opt Commun*, 2005, 255(4–6): 272–277.
- 17 F Yang, W Jin, Y C Cao, *et al.*. Towards high sensitivity gas detection with hollow-core photonic bandgap fibers[J]. *Opt Express*, 2014, 22(20): 24894–24907.
- 18 L Jing, J Q Yao, X H Huang, *et al.*. C_2H_2 sensing at $\nu_1 + \nu_3$ band with a hollow-core photonic bandgap fiber[J]. *Optoelectronics Lett*, 2011, 7(6): 0463–0465.
- 19 Ji Chongke. *Volatile Organic Compounds Detecting Based on Photonic Crystal Fiber*[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2013: 23–25.
姬崇轲. 基于光子晶体光纤的挥发性有机物监测[D]. 杭州: 中国计量学院, 2013: 23–25.
- 20 Wang Haibin, Liu Ye, Wang Jinzu, *et al.*. Preparation of all-fiber low-pressure CO_2 gas cell based on hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706007.
王海宾, 刘 晔, 王进祖, 等. 光纤型空芯光子晶体光纤低压 CO_2 气体腔的制备[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706007.
- 21 F Couny, P S Light, F Benabid, *et al.*. Electromagnetically induced transparency and saturable absorption in all-fiber devices based on $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ -filled hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Opt Commun*, 2006, 263(1): 28–31.
- 22 P S Light, F Couny, F Benabid. Low optical insertion-loss and vacuum-pressure all-fiber acetylene cell based on hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(17): 2538–2540.
- 23 N V Wheeler, M D W Grogan, P S Light, *et al.*. Large-core acetylene-filled photonic microcells made by tapering a hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(11): 1875–1877.
- 24 Wang Haibin. *The Development of HC-PCF Low-Pressure Gas Cell for Laser Frequency Stabilization*[D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013: 30–51.
王海宾. 面向激光稳频的 HC-PCF 低压气体腔的研制[D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2013: 30–51.
- 25 R Amezcua-Correa, F Gerome, S G Leon-Saval, *et al.*. Control of surface modes in low loss hollow-core photonic bandgap fibers[J]. *Opt Express*, 2008, 16(2): 1142–1149.
- 26 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.
- 27 X D Chen, Q H Mao, Q Sun, *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.