

飞秒激光产生 7.45 W 超连续光谱实验

李 斌, 方晓惠, 刘博文, 胡明列, 王清月

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 分别分析了不同空气填充率光子晶体光纤与普通单模光纤熔接过程中损耗的来源和制约机制, 实验研究了熔接参数对熔接效果的影响, 包括熔接损耗随放电电流、放电时间和放电功率变化的情况。通过优化调整熔接参数, 对高空气填充率和低空气填充率的两种光子晶体光纤都实现了低损耗熔接, 熔接损耗为 0.22 dB。并利用掺镱大模场面积光子晶体光纤飞秒激光放大器作为抽运源, 在抽运功率为 14.7 W 时, 实验得到了 7.45 W 的高功率超连续光谱输出, 光谱覆盖范围 650~1 750 nm。

关键词: 超连续; 光纤光学; 光纤熔接; 高功率

中图分类号: TN242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2012)08-2012-05

Research on 7.45 W supercontinuum generation by femtosecond laser

Li Bin, Fang Xiaohui, Liu Bowen, Hu Minglie, Wang Qingyue

(Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology of Ministry of Education, College of Precision Instruments and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The source and control mechanism of fusion splicing loss were analyzed for the splicing between the photonic crystal fibers with different air-hole fraction and single-mode fiber. The splice loss evolution with the splicing parameters, including the fusion current, fusion time, power of discharge, were experimentally studied. With a carefully adjustment, splicing loss as low as 0.22 dB was realized both for high and low air-hole fraction photonic crystal fibers. The fibers were used in experiments of generating supercontinuum and ytterbium doped large mode area photonic crystal fiber laser amplifier was used as pump source. Supercontinuum with power as high as 7.45 W and wavelength range from 650 nm to 1 750 nm was obtained.

Key words: supercontinuum; optical fiber optics; fused fiber splice; high power

收稿日期: 2011-12-21; 修订日期: 2012-01-19

基金项目: 国家 973 计划(2006CB806002, 2010CB327604); 国家 863 计划(2007AA03Z447);

国家自然科学基金(60838004, 60978022, 61108020); 教育部科学技术研究重点项目(108032);

强场激光物理国家重点实验室开放基金; 全国优秀博士学位论文作者专项基金(2007B34);

教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET070597)

作者简介: 李斌(1986-), 男, 硕士生, 主要从事高功率超连续谱方面的研究。Email: libinyeah@yeah.net

导师简介: 王清月(1938-), 男, 教授, 主要从事飞秒激光技术方面的研究。Email: chywang@tju.edu.cn

0 引言

超连续光谱,尤其是高功率超连续光谱,在高精度光学相干层析、生物成像和化学传感等领域有重要的应用价值。光子晶体光纤(PCF)因其极大的设计自由度和色散、非线性系数可调的特性,自其1996年被成功拉制后,很快成为超连续光谱产生的十分有效的非线性介质。超连续光谱的产生过程涉及自相位调制、四波混频和受激拉曼散射等多种非线性过程^[1-3]。当泵浦光功率满足一定的非线性阈值时,即可有效地产生。要提高超连续光谱的功率,一方面需要高功率的泵浦源,另一方面需要提高耦合效率及非线性光纤的破坏阈值。连续泵浦源比脉冲泵浦源更容易做到高功率并且保持低的峰值功率,用连续泵浦源可以获得非常高功率的超连续光谱输出。但是它需要较长的光子晶体光纤并且产生的超连续光谱平坦性较差。脉冲泵浦源主要包括皮秒泵浦源和飞秒泵浦源。相对于皮秒泵浦源,用飞秒泵浦源产生的超连续光谱具有更高的平坦度和更高的相干度,在生物光子学、光学相干成像等方面具有重要的研究价值。然而在高功率泵浦时,PCF端面的微结构不但限制了热扩散,而且极小的纤芯减小了光纤端面破坏阈值,限制了其产生的超连续谱功率。一个有效的解决方案是将PCF与具有更大模场面积的单模光纤(SMF)进行熔接处理,以提高光纤端面损伤阈值^[4-6]。PCF独特的“石英-空气孔”结构,在赋予其奇异特性的同时,也增加了与其他光纤或光学器件接续的难度。针对PCF与SMF之间的接续难题,文中结合实验室现有条件,系统研究了各熔接参数对熔接损耗与熔接强度的影响,提出了针对不同种类PCF的低损耗熔接方案,并将其应用于飞秒激光产生超连续谱实验,得到了7.45 W的高功率超连续谱输出。

1 光纤熔接

PCF与SMF熔接时的损耗来源主要分为非本征损耗和本征损耗。非本征损耗主要包括横向偏移和轴向倾斜。在光纤对准程度较好时,光纤熔接损耗主要来源于本征损耗,包括光纤模场失配引起的损耗和空气孔塌陷引起的损耗。这两种损耗之间存在

相互制约的关系:在实验中,由于采用的PCF为用于产生超连续谱的高非线性光纤,其模场直径小于SMF的模场直径,因此熔接过程中受热造成的PCF空气孔塌陷一方面增加了塌陷损耗,另一方面由于空气孔塌陷增大了PCF的模场直径,从而减小了模场失配损耗^[7-9]。熔接参数决定着熔接损耗与熔接强度。采用南京吉隆公司生产的KL-260C光纤熔接机进行PCF熔接实验,对放电电流、放电时间、推进量、熔接间隙4个主要参数对熔接损耗的影响进行了对比分析。

1.1 低空气填充率PCF的熔接

实验中选择的光子晶体光纤端面如图1所示,模场直径为4.7 μm。用该光纤与模场直径为9 μm普通单模光纤进行熔接。由模场失配损耗公式:

$$L = -20 \lg \left(\frac{2\omega_{\text{PCF}} \omega_{\text{SMF}}}{\omega_{\text{PCF}} + \omega_{\text{SMF}}} \right) \quad (1)$$

式中: ω_{PCF} 和 ω_{SMF} 分别为PCF和SMF的模场直径,计算得到模场失配损耗约为2 dB。

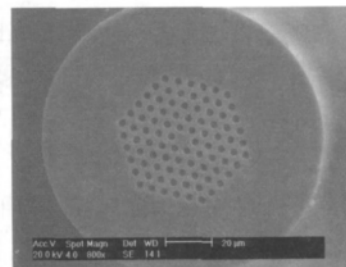


图1 低空气填充率PCF端面图

Fig.1 Cross section of the low air-filled rate PCF

选择偏移量和熔接间隙均为20 μm,推进量为11 μm,放电时间固定为0.3s,改变放电电流,从3.0mA到5.5 mA,间隔0.5 mA,得到熔接损耗随放电电流改变曲线如图2(a)所示。从图中可以看出,电流从3.0mA到4.5 mA变化时,损耗曲线相对比较平缓,当放电电流为3.5 mA时,损耗最低约为0.25 dB。这是由于在该电流范围内,由空气孔塌陷引起的损耗与模场失配损耗相互制约,使整体损耗处于较低水平。继续增加放电电流至超过4.5 mA后,损耗急剧增加,这是因为空气孔塌陷速率急速增加,成为损耗的主要来源。

为了对比熔接功率对熔接效果的影响,保持其他参数不变,放电电流为3.0 mA,改变放电时间,从

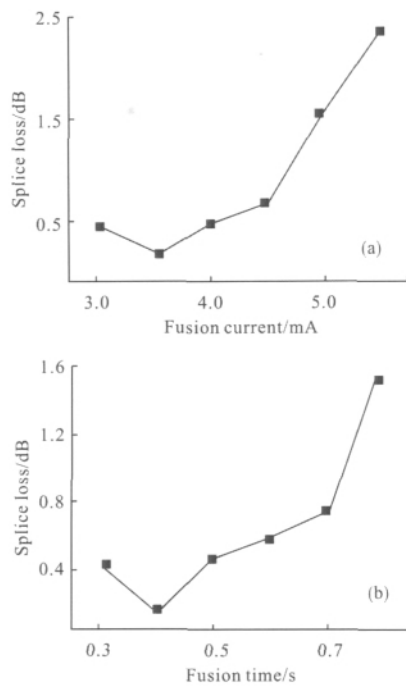


图 2 熔接损耗随放电电流和放电时间的变化

Fig.2 Curves of splice loss with different fusion current and fusion time

0.3 s 到 0.8 s, 时间间隔为 0.1 s, 得到熔接损耗随放电时间变化曲线如图 2(b)所示。从图中可以看到, 当放电时间为 0.4 s 时, 损耗最低, 约为 0.22 dB。

由熔接功率公式^[10]:

$$\text{熔接功率} = \text{熔接电流}^2 \times \text{熔接时间} \quad (2)$$

可以将放电电流和放电时间对熔接损耗的影响统一用熔接功率来表述, 避免逐一调整参量并做多种组合的繁琐步骤。将上述两次熔接参数进行比较可以得出: 改变放电电流时, 放电功率为 $3.675 \mu\text{W}$ 时损耗最低。而改变放电时间时, 相应的最低损耗放电功率为 $3.6 \mu\text{W}$ 。二者相差不大。为了进一步对比, 图 3 给出了熔接损耗随放电功率变化曲线。从图中

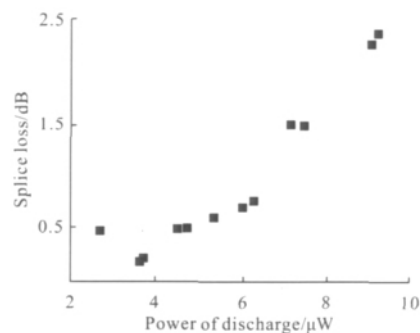


图 3 熔接损耗随放电功率的变化

Fig.3 Splice loss evolution with power of discharge

可以看出, 熔接损耗随放电功率的变化趋势与随放电时间或放电电流变化趋势一致, 即存在一个最佳放电功率区间使得熔接损耗较低, 超出此区间, 熔接损耗急剧上升。

1.2 高空气填充率 PCF 的熔接

实验中选用的高空气填充率光子晶体光纤端面如图 4(a)所示, 模场直径为 $3 \mu\text{m}$ 。将它与模场直径为 $9 \mu\text{m}$ 普通单模光纤进行熔接。由模场失配损耗公式(1)计算得到模场失配损耗约为 5 dB。设定放电电流为 2 mA, 图 4 (b) 为放电时间 0.1 s, 7 次放电的端面情况, 图 4(c)为放电时间 0.7 s, 1 次放电的端面情况。从图中可以看出, 一次放电相比于多次放电, 空气孔塌陷不均匀的情况更为严重。这是由于高的空气填充率造成在熔接加热过程中产生明显的热阻, 使得 PCF 由外围到芯区形成明显的热量梯度, 造成 PCF 空气孔塌陷不均匀, 带来附加损耗, 因此对于高空气填充率的 PCF, 必须采用多次放电的方式来进行熔接^[11-12]。

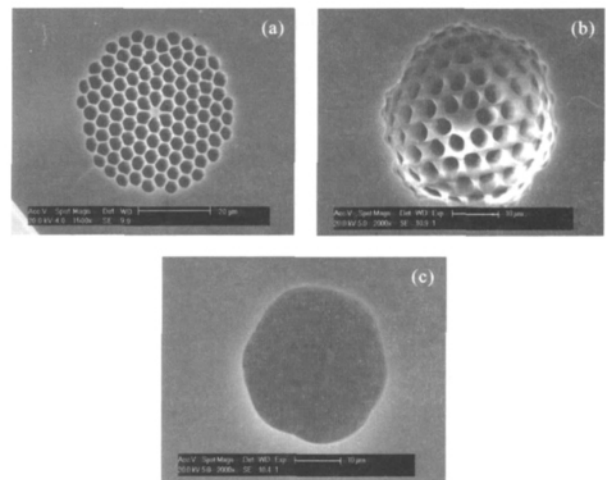


图 4 高空气填充率光子晶体光纤端面图

Fig.4 End view of high air-filled rate PCF

另外, 对于高空气填充率的光子晶体光纤, 空气孔壁非常薄, 在熔接过程中由于纤芯向内凹陷容易产生空气隙, 导致损耗增大。因此追加放电过程中, 每次都要给予一定的推进量以减少附加损耗, 同时, 这样也可以减少 SMF 中的掺杂物向 PCF 中扩散, 进一步降低损耗。

设定放电时间为 0.1 s, 偏移量和熔接间隙均为 20 μm , 图 5 为放电电流 2 mA, 推进量 2 μm 和放电电流

2.5 mA, 推进量 3 μm 进行多次放电熔接, 得到熔接损耗随放电次数的变化曲线。其中大电流放电与小电流放电选取不同的推进量是因为大电流放电使 PCF 端面塌陷现象和杂质的扩散现象更加明显, 因此需要更大的推进量减小附加损耗。当放电电流 2.5 mA 时, 放电 6 次熔接损耗最小, 约为 2.99 dB, 当放电电流为 2.0 mA 时, 放电 15 次熔接损耗最小, 约为 2.65 dB。因此, 对于高空气填充率的光子晶体光纤, 在相同的熔接功率水平下, 小电流、长时间放电相对于大电流、短时间放电有更好的熔接结果。这是由 PCF 的“石英-空气孔”结构所决定的。空气孔的存在导致 PCF 包层等效导热系数降低, 外围向芯区导热的速度比实心光纤要慢^[13], 因此以相对长时间的小电流加热更有助于使光纤横向各部分受热均匀, 带来更好的熔接结果。

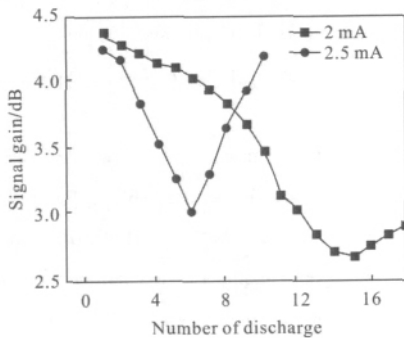


图 5 对高空气填充率 PCF 进行多次放电熔接的实验结果

Fig.5 Experiment result of splice loss evolution with discharge number

2 超连续光谱的产生

将图 1 所示的光子晶体光纤与单模光纤进行低损耗熔接, 调整熔接参数, 当熔接电流为 3 mA, 放电时间为 0.4 s 时, 得到最低熔接损耗为 0.22 dB。将此熔接后的光纤用于高功率超连续光谱的产生。实验中采用的光源是掺镱大模场面积光子晶体光纤飞秒激光放大器, 稳定性很高, 在最高功率 44 W 的 976 nm 激光二极管的抽运下, 输出的最高平均功率可达到 28 W, 重复频率 50 MHz, 光栅对压缩后脉冲宽度 85 fs, 中心波长为 1 040 nm。实验装置如图 6 所示, 使用非球面镜耦合输入, 一个半波片和偏振分光棱镜改变入射光功率, 另一个半波片改变入射光的偏振态, 并用 CCD 监视仪和光谱仪检测输入和输出的情况。

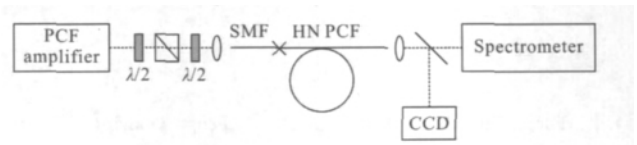


图 6 超连续光谱产生实验装置图

Fig.6 Experimental setup of supercontinuum generation

当放大系统输出功率为 14.7 W 时, 实验得到超连续光谱最高功率为 7.45 W, 输出光谱范围 650~1 750 nm, 如图 7 所示。此功率为基于飞秒激光脉冲产生的最高功率超连续光谱源。

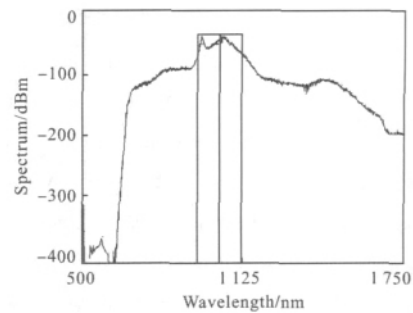


图 7 输出超连续光谱

Fig.7 Spectrum of output supercontinuum

继续增加泵浦功率, 由于光纤熔接点处仍然存在熔接损耗, 耗散光功率将导致光纤熔接点处温度升高, 最终在输入光功率超过一定值之后, 过高的温度损坏熔接点, 超连续功率难以继续增加。下一步工作将采用 PCF 端面塌陷研磨的方法, 进一步提升光纤损伤阈值。另外, 此光谱短波方向仅至 650 nm, 没有覆盖全部可见光波段, 这是由于 PCF 结构导致的, 下一步工作将采用更小纤芯、更高空气填充率的 PCF, 并利用拉锥单模光纤与 PCF 进行熔接^[14]。

3 结 论

文中分析了不同光纤的熔接损耗来源和制约机制, 通过降低熔接损耗得到了高功率超连续谱。对于低空气填充率 PCF, 主要改变放电电流和放电时间的组合, 对于高空气填充率 PCF, 还要考虑推进量与放电次数, 并对两种光纤均实现了低损耗熔接。将熔接后的 PCF 运用于飞秒激光产生超连续谱实验, 利用掺镱大模场面积光子晶体光纤飞秒激光放大器作为抽运源, 得到了 7.45 W 的高功率超连续光谱输出。

参考文献:

- [1] Fang Zhenchao, Sun Nianchun, Feng Guoying, et al. Research on supercontinuum generation in biconical double fiber[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(4): 442-446. (in Chinese)
方振超, 孙年春, 冯国英, 等. 双锥双光纤超连续谱的实验研究[J]. *激光与红外*, 2011, 41(4): 442-446.
- [2] Zhao Lei, Wang Jianjun, Lin Honghuan, et al. Experimental research of high conversion efficiency all-fiber supercontinuum source [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(8): 1143-1147. (in Chinese)
赵磊, 王建军, 林宏奂, 等. 全光纤高效超连续谱光源实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(8): 1143-1147.
- [3] Fang Xiaohui, Wang Qingyue, Liu Junjie, et al. Experimental research on the 3.95 W high power supercontinuum generation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(6): 1585-1588. (in Chinese)
方晓惠, 王清月, 刘俊杰, 等. 3.95 W 高功率超连续光谱产生的实验研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(6): 1585-1588.
- [4] William J Wadsworth, Arturo Ortigosa-Blanch, Jonathan C Knight, et al. Supercontinuum generation in photonic crystal fibers and optical fiber tapers: a novel light source [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2002, 19(9): 2148-2155.
- [5] Yukihiro Tsuchida, Kunimasa Saitoh, Masanori Koshiba. Design and characterization of single-mode holey fibers with low bending losses[J]. *Optics Express*, 2005, 13(12): 4770-4779.
- [6] Joo Hin Chong, Rao M. Development of a system for laser splicing photonic crystal fiber [J]. *Optics Express*, 2003, 11(12): 1365-1370.
- [7] Xiao Limin, Demokan M S, Jin Wei, et al. Fusion splicing photonic crystal fibers and conventional single-mode fibers: microhole collapse effect [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(11): 3563-3574.
- [8] Fouad El-Diasty. Laser-scattering-based method for investigation of ultra-low-loss arc fusion-spliced single-mode optical fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(6): 1539.
- [9] Xiao Limin, Jin Wei, Demokan M S, et al. Fabrication of selective injection microstructured optical fibers with a conventional fusion splicer[J]. *Optics Express*, 2005, 13(22): 9014-9022.
- [10] Xiao Limin, Jin Wei, Demokan M S, et al. Photopolymer microtips for efficient light coupling between single-mode fibers and photonic crystal fibers[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(12): 1791-1793.
- [11] Xiao Limin, Jin Wei, Demokan M S. Fusion splicing small-core photonic crystal fibers and single-mode fibers by repeated arc discharges[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(2): 115-117.
- [12] Thapa R, Knabe K, Corwin K L, et al. Arc fusion splicing of hollow-core photonic bandgap fibers for gas-filled fiber cells[J]. *Optics Express*, 2007, 14(21): 9576-9583.
- [13] Guo Tieying, Lou Shuqin, Li Honglei, et al. Low loss arc fusion splice of photonic crystal fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(2): 511-516. (in Chinese)
郭铁英, 娄淑琴, 李宏雷, 等. 光子晶体光纤的低损耗电弧熔接方案[J]. *光学学报*, 2009, 29(2): 511-516.
- [14] Birks T A, Wadsworth W J, Russell P St J. Supercontinuum generation in tapered fibers[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(19): 1415-1417.