

文章编号: 1001-3806(2009)05-0470-03

熔融拉锥技术在光纤耦合传输中的应用

彭博, 张海涛, 闫平, 巩马理*

(清华大学精密仪器与机械学系 光子与电子技术研究中心 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 为了实现光纤激光器和放大器系统中不同参量光纤的低损耦合, 采用光纤拉锥方法来实现光纤连接。经过理论分析, 在大数值孔径光纤传输到小数值孔径光纤时, 采用光纤拉锥技术可以有效地提高传输功率。采用改造的大模光纤熔接机进行拉锥实验研究, 精确控制拉锥时间、放电功率、步进量和步进速率可以获得不同的拉锥形状。采用光纤拉锥元件对标准单模光纤和大模场光纤进行耦合实验, 得到纤芯内传输的耦合输出效率由之前的 50% 提高到 85%, 获得了低损连接效果。结果表明, 熔融拉锥技术为不同光纤之间的耦合提供了一种简单实用的方式。

关键词: 激光技术; 光纤激光器; 熔融拉锥技术; 耦合效率

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.05.007

Fused taper technique for fiber coupling applications

PENG Bo, ZHANG Hai-tao, YAN Ping, GONG Ma-li

(State Key Laboratory of Tribology, Center for Photonics and Electronics, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to reduce coupling loss between different fibers in a fiber laser or amplifier, fused taper technique was applied to couple fibers. Based on theoretical analysis, when the laser signal transmitted from a large numerical aperture (NA) fiber into a small NA fiber, the transmitted power can be improved effectively with fused taper technique. In experiment, large-mode fiber fusion splicer was applied to taper fibers. Different tapered fibers can be achieved with precise control of arc-discharged time and power, stepped size and velocity. The transmitted efficiency was improved from 50% to 85% with much lower coupling loss for the coupling between a standard single-mode fiber and a large-mode fiber based on fused taper technique. Fused taper technique offers a simple and practical method to couple different fibers.

Key words: laser technique; fiber lasers; fused taper technique; coupling efficiency

引言

光纤激光器作为激光领域的新军, 在过去 10 年发展迅猛, 连续激光和脉冲激光输出功率都获得了巨大的提高^[1-3]。因此, 其在加工、传感、雷达以及医学^[4-7]等领域的应用日趋广泛。全光纤化结构以其独具的简单结构、良好的机械稳定性和较高的传输效率成为近期研究的热点^[8]。但是, 在腔内元件逐渐实现全光纤化后, 增益光纤的独特设计就成为光纤激光器全光纤结构的瓶颈^[9]。由于增益光纤的尺寸与合束器或光纤光栅等元件存在差异, 很难实现无损连接。因此, 目前很多光纤激光器或放大器利用拉锥技术来解决上述问题^[10]。作者基于光纤传输理论, 分析设计并实验验证了拉锥效果。

1 光纤拉锥原理

光纤激光器与放大器中经常遇到不同光纤的耦合连接问题, 通常采用耦合透镜组或光纤拉锥方式实现连接。耦合透镜组设计不仅结构复杂, 而且机械稳定性较差。拉锥方法可以在保证较高功率传输效率的同时实现系统的全光纤化。以标准单模光纤与特定大模场光纤之间的耦合传输问题为例, 如图 1 所示。标准

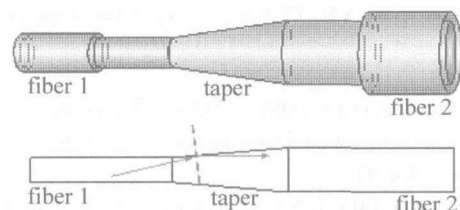


Fig. 1 Principles of fiber taper

单模光纤纤芯为 $8\mu\text{m}$, 数值孔径为 0.14, 而大模场光纤的纤芯和包层分别为 $25\mu\text{m}$ 和 $300\mu\text{m}$, 纤芯的数值孔径为 0.10。因此, 尽管标准单模光纤中的拉赫不变量较小, 但是, 由于其数值孔径较大, 在传输到大模场光纤后, 损耗依然很大, 熔接后依旧保持在光纤中传输

作者简介: 彭博(1982-), 女, 博士研究生, 主要从事光纤激光器脉冲及放大技术理论与实验研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: gongml@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2008-11-08; 收到修改稿日期: 2008-12-26

的光功率约占总光功率的80%；而且，由于光纤参数的巨大差异，焊接效果也难以保证，而且焊点处的应力较大，容易造成焊点的损坏。如果将大模场光纤进行拉锥处理并以此作为过渡区域，则可以使较大发散角的光经过过渡区域后依旧在光纤内传输，从而提高耦合传输效率。利用BEAMPROP软件计算，获得的耦合效率可以提高到95%以上。因此，实验中通过光纤拉锥技术来提高耦合光功率。

2 光纤拉锥方法

实验中采用改造的大芯径光纤熔接机进行手动拉锥。利用电弧放电高温，可以使光纤石英处于熔融状态。在此过程中，移动光纤两夹持点位置，可以使电极附近光纤形成明显的拉锥效果(见图2)。利用光学显微镜观察拉锥光纤(见图3)。其中，位于移动夹持端

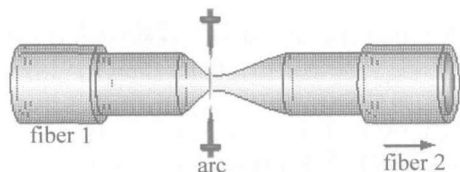


Fig. 2 The method of tapering fiber

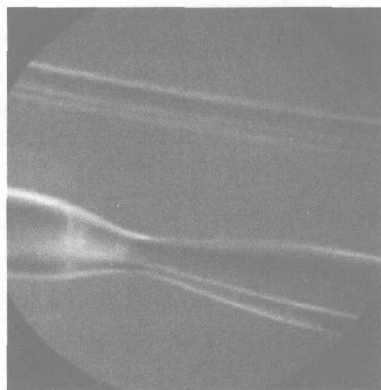


Fig. 3 A photo of fiber taper

一侧的光纤拉锥效果比较平滑，而固定夹持端一侧的光纤拉锥效果比较陡峭。对应不同的光纤，应改变电弧放电的大小。光纤越粗，电弧放电越大；反之光纤越细，电弧放电越小，否则会造成光纤的瞬间熔断。拉锥过程中，光纤的拉动距离会影响最终获得的光纤束腰处直径，拉动距离越大，束腰越小；拉动速度会影响获得锥形的角度，拉动越快，锥角越大。拉动过程应尽量保持平稳，这样可以获得较平滑的拉锥效果。通过对拉动速度的控制，可在一定程度上改变获得的拉锥形状。电弧放电时间与拉动时间大致相当。

拉锥过程中，应尽量保持“两个同轴”。首先，位于两个光纤夹持位置处的两段光纤同轴，并且不受其它外力影响；其次，光纤夹持位置的移动方向与光纤同轴。如果不能保证，则在光纤处于熔融状态时，会由于

外力影响而改变其形状，出现一定的偏转或弯曲。

3 光纤位置和放电位置同时移动产生的拉锥效果

如果在光纤拉动过程中，适当地调节放电电极位置，可以获得更多的拉锥效果。

3.1 光纤位置和放电位置移动同向(见图4)

这种情况下，由于放电位置总是处于被拉动光纤的一侧，因此，这一侧的锥角明显增大，而另一侧会有所减小。当需要获得较为陡峭的锥形时，可以采用这种方法。

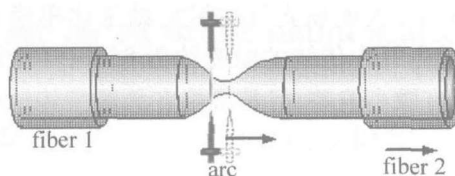


Fig. 4 Fiber and arc move in the same direction

3.2 光纤位置和放电位置移动反向(见图5)

这种情况下，由于放电位置总是处于固定光纤的一侧，因此，这一侧的锥角明显增大，而另一侧会有所减小。当需要获得较为平缓的锥形时，可以采用这种方法。如果在放电光纤移动的初期改变电极位置，获得的锥形根部也会改变较为明显，接近于线性变化；如果在放电光纤移动的后期改变电极位置，获得的锥形根部没有明显变化，锥形接近于抛物线或者指数变化。因此，通过控制光纤位置和电极位置的相对变化可以得到所需的锥形。

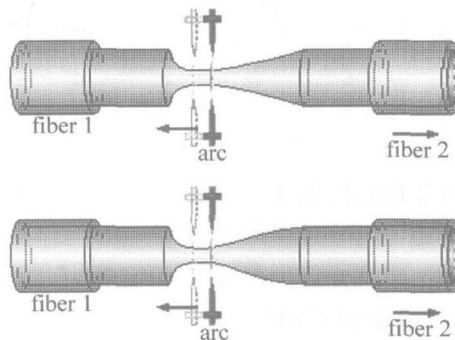


Fig. 5 Fiber and arc move in the opposite directions

4 光纤拉锥实验

采用上述的拉锥方法对拉锥后的光纤进行焊接，获得的不同焊接效果如图6所示。其中，图6a为两不同光纤直接焊接，可以看到，焊接后光纤出现少量变形，同时光纤中心是否完全焊接不易判断。对其进行实验测试，经过焊点后传输的光约为注入激光的66%，其中纤芯中传输的光功率约占注入激光的50%，这主要是由于数值孔径的差异引起的。图6b中

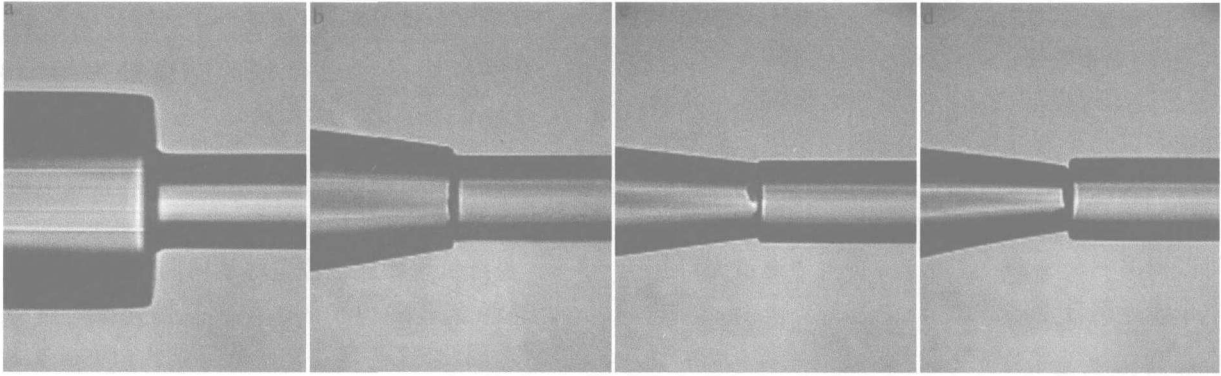


Fig. 6 Welding effects of different fiber tapers

拉锥后的光纤比标准单模光纤大,焊接效果改善不明显。图 6c 中,大模场光纤拉锥后结果比单模光纤稍小,焊接后光纤中传输的激光约为 85%,尽管焊接过程纤芯仍有微小偏差,但是最终在纤芯中传输的激光约为 80%。图 6d 中,由于光纤端面磨抛过程中,凸台现象严重,导致焊接效果较差。另外,由于焊接过程光纤纤芯存在微小偏差导致激光偏离出纤芯,无法传输。实验中,约 76% 的光在光纤中继续传输,而其中在纤芯中的光只有 22%。光纤中传输光的增加说明焊接效果较之前有所提高,但是由于纤芯的偏离,在光纤纤芯中传输的光减少很多。

不同拉锥效果时,光纤之间耦合传输的总功率和纤芯内功率的分布如图 7 所示,其中,横坐标上的 a,

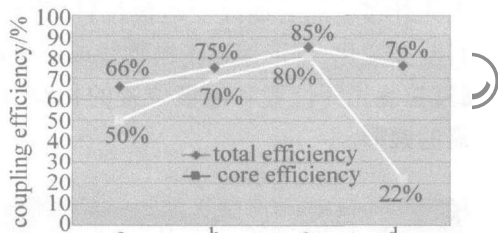


Fig. 7 Coupling efficiency with different fiber tapers

b, c, d 与图 6 中各编号的焊接效果相对应。光纤经过拉锥后,纤芯内的传输光功率占总功率的比例明显提高,表明了锥体对于改善数值孔径差异的作用。进一步的实验中,当两光纤的包层尺寸更加接近时,输出的芯内激光功率达到了 85%。

5 结 论

光纤激光器全光纤化过程中经常遇到不同光纤之间的耦合传输问题,通过理论和实验验证了光纤拉锥

技术在光纤激光器及放大器中应用的可行性。锥区光纤不仅有助于降低焊接难度,增加焊点强度,同时还可以有效增加功率耦合效率,尤其是纤芯内的光纤耦合效率。

参 考 文 献

- [1] WEI W L, OU P, YAN P, *et al.* Experimental study of 30W CW fiber laser by two-end pumping [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32 (1): 5-8 (in Chinese).
- [2] JEONG Y, SAHU J K, PAYNE D N, *et al.* Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36kW continuous-wave output power [J]. Optics Express, 2004, 12(25): 6088-6092.
- [3] PENG B, LIU Q, GONG M L, *et al.* Acousto-optic Q-switched cladding-pumped ytterbium-doped fiber laser [J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(7): 415-417.
- [4] LEI J Sh, HUANG Zh M, GUO Zh H. Application of optical fiber amplifier for satellite laser communication [J]. Laser Technology, 2001, 25(5): 378-381 (in Chinese).
- [5] LOU Q H, ZHOU J, WANG Zh J. Analysis of high-power fiber laser weapons [J]. Laser Technology, 2003, 27(3): 161-165 (in Chinese).
- [6] QIAN J R, LIU F, SU J. Investigation of frequency null-drift in polarimetric fiber laser current sensors [J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(6): 791-794 (in Chinese).
- [7] MENG H Y, LIAO J H, GUAN B G, *et al.* Fiber laser cutting technology on coronary artery stent [J]. Chinese Journal of Laser, 2007, 34 (5): 733-736 (in Chinese).
- [8] DELGADO-PINAR M, ZALVIDEA D, DIEZ A, *et al.* Q-switching of an all-fiber laser by acousto-optic modulation of a fiber Bragg grating [J]. Optics Express, 2006, 14(3): 1106-1112.
- [9] TORDELLA L, DJELLOUT H, DUSSARDIER B, *et al.* High repetition rate passively Q-switched Nd³⁺:Cr⁴⁺ all-fibre laser [J]. Electron Lett, 2003, 39(18): 1307-1308.
- [10] ALEGRIA C, JEONG Y, CODEMARD C, *et al.* 83W single-frequency narrow-linewidth MOPA using large-core erbium-ytterbium co-doped fiber [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(8): 1825-1827.