

基于二氧化碳激光的光纤大直径端帽熔接技术

张志研 牛 奔 高文焱 侯 玮 林学春*

(中国科学院半导体研究所全固态光源实验室, 北京 100083)

摘要 光纤大直径端帽熔接是千瓦级传能光纤封装的关键技术之一。为了实现光纤大直径端帽熔接,从理论上分析了光纤与大直径端帽熔接机理,设计并搭建了基于 CO₂ 激光的光纤大直径端帽熔接系统,掌握了光纤大直径端帽熔接方法和工艺,并利用熔接好的大直径端帽的光纤成功传输了千瓦级连续激光。

关键词 光纤光学; 光纤熔接; 光纤大直径端帽; CO₂ 激光熔接; 高功率传输

中图分类号 TN818 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0703001

Splicing Technology of Fiber Large Diameter End-Cap Based on CO₂ Laser

Zhang Zhiyan Niu Ben Gao Wenyan Hou Wei Lin Xuechun

(Laboratory of All-Solid-State Light Sources, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract Fiber large diameter end-cap splicing is one of the key technologies to increase energy transfer in fiber up to kilowatt. In order to achieve fiber large diameter end-cap splicing, the splicing mechanism of fiber end-cap is analyzed theoretically. A system of fiber end-cap splicing is designed and built based on CO₂ laser, and the method and processing of fiber large diameter end-cap splicing are investigated and implemented. The continuous wave laser up to kilowatt is transferred successfully by the fiber that is with spliced large diameter end-cap.

Key words fiber optics; fiber splicing; fiber large diameter end-cap; CO₂ laser splicing; high power transference

OCIS codes 140.3510; 140.3325; 060.2340; 060.3510

1 引 言

随着高功率固体激光、光纤激光的发展,以及高功率半导体激光光束质量的不断改善,高功率传能光纤的需求将会日益增加^[1-3]。高功率传能裸光纤在直接应用过程中存在以下问题需解决: 1) 光纤芯径很细,高功率激光通过透镜聚焦进入光纤,光纤端面的功率密度极高,光纤很容易损坏,所以要求光纤端面无任何损伤及污染,要求极为苛刻; 2) 光纤端面面积很小,不容易进行镀膜处理,激光进入无镀膜光纤端面存在较大的损耗,会产生更多损坏光纤的热量; 3) 裸光纤两端在安装、拆卸过程中强度低,夹持很不方便。通过在光纤两端熔接大直径石英端帽,并在端帽两端进行镀膜处理可完全解决光纤端

面功率密度高、损耗大以及夹持不方便的问题。

光纤主要结构是成四面体的 SiO₂, 因存在连锁结构,对波长范围为 8.5~13 μm 之间的光有很强的吸收性。CO₂ 激光发生器产生的激光波长为 10.6 μm,正好是在其吸收波长范围的中心。火焰、电极放电、灯丝等熔接光纤的方式,都是利用热量的辐射和传递进行加热。而 CO₂ 激光熔接方式则利用了物质对激光的吸收特性,把吸收的激光能量变成热,类似微波炉进行加热带水分的物体,所以采用 CO₂ 激光作为热源便于通过改变被加热物体体积进行热量控制^[4-5]。

本熔接装置采用 CO₂ 激光作为熔接热源,目前国内通用光纤熔接机主要采用电极放电和灯丝放

收稿日期: 2013-12-05; 收到修改稿日期: 2014-01-21

基金项目: 国家 973 计划(2012CB934200)、国家自然科学基金(61308033)

作者简介: 张志研(1983—),男,硕士,助理研究员,主要从事光学精密机械结构设计方面的研究。

E-mail: zyzhang@semi.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: xclin@semi.ac.cn

电^[6-7], CO₂ 激光器做熔接热源优点在于能够确保热源清洁, 保证光纤熔接点周围裸纤部分不会有任何附着污染物, 熔接点在大功率运行下不会因部分表面温度过高而出现烧毁现象, 所以 CO₂ 激光作为熔接热源在光纤热处理方面应用越来越广泛^[8-9]。

2 实验介绍

本实验的熔接加热方式如图 1(a) 所示, 采用多

点倾斜环状 CO₂ 激光热源进行熔接。环状 CO₂ 激光热源具体形成方式如图 1(b) 所示, 多个 CO₂ 激光光斑沿一圆周排列, 形成 CO₂ 激光环, 照射在光纤边沿进行加热熔接。与普通两点、三点垂直于光纤加热方式相比^[10], 多点倾斜环状热源可实现对端帽熔接点处局部加热, 在端帽直径比较大的情况下不会出现加热不均匀情况, 不会使熔接后的端帽或光纤内部晶粒结构扭曲, 影响高功率激光传输。

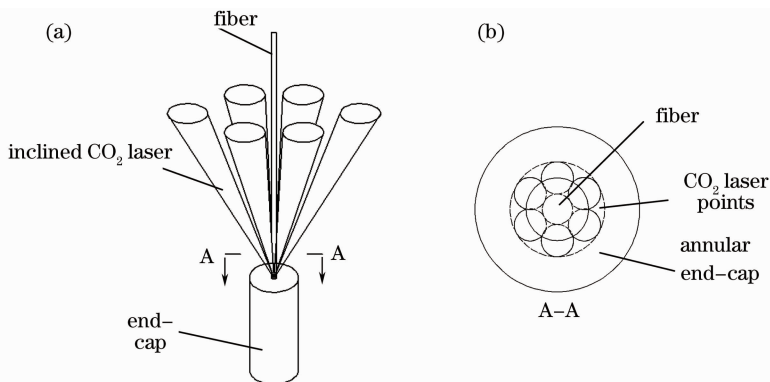


图 1 端帽熔接加热示意图。(a) 多点倾斜环状加热示意图; (b) 环状加热点局部截面

Fig. 1 Schematic diagram of fiber end-cap splicing heating. (a) Schematic diagram of inclined points annular heating; (b) sectional view of the annular heating point

本实验装置完成了芯径为 400~800 μm 单包层多模光纤与直径为 8~20 mm 石英端帽的熔接, 光纤由长飞光纤光缆有限公司提供。图 2 为光纤大直径端帽熔接结果实物图。

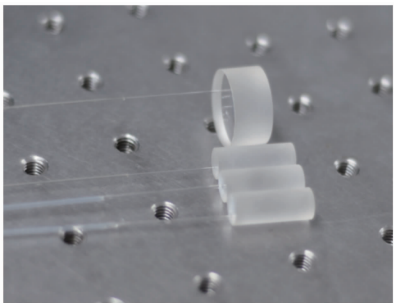


图 2 光纤与大直径端帽熔接结果实物图

Fig. 2 Photograph of fiber and large diameter end-cap splicing result

3 理论模拟

光纤与大直径石英端帽熔接过程中, 温度控制至关重要。参考相关文献^[11-14], 采用有限元方法对光纤与端帽熔接的传热过程进行仿真计算。熔接过程分为端帽与光纤不接触与接触两个阶段, 计算过程中采用生死单元来模拟光纤与端帽的接触与不接触两种情形。

第一阶段如图 3(a) 所示, 环状激光光斑对端帽中心进行预加热使其熔化, 光纤位于端帽上方, 激光未照射到光纤上面, 因此杀死光纤单元, 使其不参与传热运算。调整工艺参数, 使石英端帽加热到约 1335 °C, 此时温度介于石英材料的变形温度与软化温度之间, 使石英端帽从玻璃态转化并稳定在高弹态, 且未达到粘流态, 是光纤端帽熔接合理的预热温度。石英端帽预加热作用是防止第二阶段光纤和石英端帽接触时温度差过大, 致使端帽中的四面体 SiO₄ 不能进入光纤, 二者不能充分熔接在一起。第二阶段光纤向下运动与端帽接触, 多点环状激光同时照射到光纤和端帽上面。有限元模型中, 将光纤单元激活, 参与传热过程的计算。调整工艺参数, 将光纤端头加热到约 1989 °C, 达到石英熔点, 完成光纤与端帽的熔接。图 3(b) 为光纤与端帽完全接触并熔接完成时的温度场。熔接过程中光纤温度一部分来自 CO₂ 激光的辐射, 一部分来自端帽的热传递。由于部分 CO₂ 激光被光纤阻挡吸收, 端帽中心与光纤接触点温度呈环状分布。本计算模型为光纤与端帽熔接工艺参数的优化提供了理论指导。

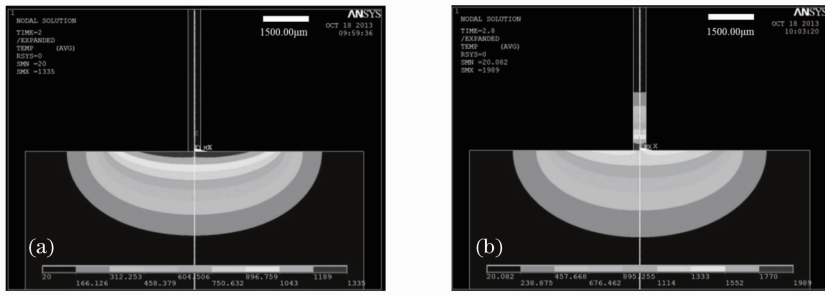


图3 光纤与端帽熔接过程模拟图。(a) 端帽预加热模拟图；(b) 光纤与端帽熔接模拟图

Fig. 3 Simulation of fiber and end-cap splicing process. (a) End-cap pre-heating; (b) fiber and end-cap splicing

4 形貌分析

4.1 熔接点形貌分析

图4为本实验装置中 CCD 监控系统显示芯径为 $400\ \mu\text{m}$ 单包层光纤与直径为 $8\ \text{mm}$ 石英端帽, 采用功率密度约为 $700\ \text{W}/\text{cm}^2$ 的多点环形, 连续 CO_2 激光熔接结果。熔接时间为 $4\ \text{s}$, 观察熔接完成的光纤与端帽熔点处的形貌, 可以看到熔点形貌均匀, 外表无明显熔接缺陷, 光纤与端帽结合处为圆角相接, 保证二者之间连接有足够的强度, 并且光纤透明度无改变, 熔点处光纤无扭曲、弯曲发生, 说明光纤内部波导结构未被破坏。

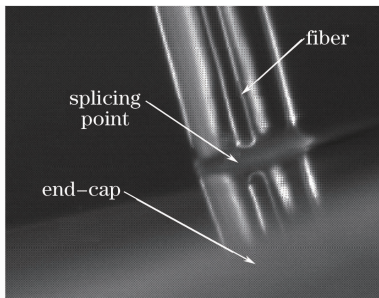


图4 熔接点形貌

Fig. 4 Surface morphology of splicing point

4.2 熔接点端面形貌分析

图5为用显微镜观察熔点端面截图, 可以看到纤芯及包层边界无明显变形扭曲, 包层厚度均匀附

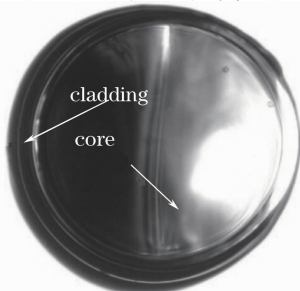


图5 熔接点端面形貌

Fig. 5 Surface morphology of end face splicing point

着在纤芯周围, 包层无变薄、破损情况出现, 说明光纤纤芯与包层形成的波导结构未被破坏。

5 强度分析

图6为同一端帽熔接完成的三根芯径为 $400\ \mu\text{m}$ 光纤, 其中两根为人为使其断裂后结果, 断裂位置均为熔接点上部 $1\ \text{mm}$ 以上, 熔点处完好无损伤, 证明光纤与端帽之间熔接点处, 由于存在过度圆角, 强度已大于光纤本身强度, 所以熔点处强度完全满足应用需要。

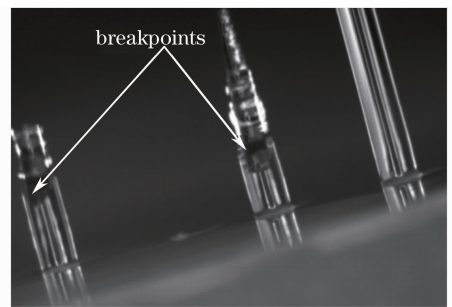


图6 光纤断点实物图

Fig. 6 Photograph of fiber breakpoint

6 熔点高功率激光传输测试

参考国内高功率激光光纤耦合有关报道^[15], 实

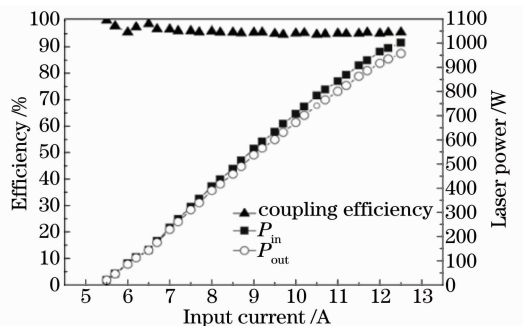


图7 高功率激光传输测试结果

Fig. 7 Results of high power laser transmission

实验室自行搭建了 1 kW 侧面抽运固体激光器及光纤耦合系统,并将熔接好的大直径端帽的 400 μm 光纤作为耦合输入端进行熔点传能效率测试,经过测试,输入最高激光功率为 1002 W,输出最高激光功率 957 W,耦合效率为 95.5%,光纤与端帽熔接点未发生损坏。图 7 为熔点高功率激光传输测试结果, P_{in} 为注入光纤激光功率, P_{out} 为光纤输出激光功率。

7 结 论

本实验室采用 CO_2 激光作为热源搭建了光纤端帽熔接系统,实现了光纤与大直径石英端帽的熔接,掌握了光纤与大直径石英端帽熔接的关键工艺方法,成功完成了 1 kW 连续激光的传输,为大功率传能光纤制作奠定了基础。通过实验证明光纤大直径端帽的熔接,提高了光纤在高功率激光传输过程的可靠性,是高功率传能光纤封装制作的关键。

致谢: 感谢长飞光纤光缆有限公司提供实验用光纤。

参 考 文 献

- 1 Wang Yibo, Wang Baohua, Zhang Zhiyan, *et al.*. 7 kW level fiber-coupled output all-solid-state laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0108003.
王奕博, 王宝华, 张志研, 等. 7 kW 级光纤耦合输出全固态激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0108003.
- 2 Chen Miaohai. Research progress of high-power fiber lasers[J]. Laser & Infrared, 2007, 37(7): 589-592.
陈苗海. 高功率光纤激光器的研究进展[J]. 激光与红外, 2007, 37(7): 589-592.
- 3 Peng Hangyu, Gu Yuanyuan, Shan Xiaonan, *et al.*. Study on beam shaping of high power diode lasers[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0202010.
彭航宇, 顾媛媛, 单肖楠, 等. 大功率半导体激光光源光束整形技术研究[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0202010.
- 4 Wenxin Zheng, Hiroshi Sugawara, Toshirou Mizushima, *et al.*. Heating power feedback control for CO_2 laser fusion splicers[C]. SPIE, 2013, 8601: 860129.
- 5 Wang Wenhua, Yu Qingxu, Jiang Xinsheng. CO_2 laser heating fusion welding technique of ultra-thin fused silica glass [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1003004.
王文华, 于清旭, 姜心声. 超薄熔石英玻璃的 CO_2 激光热熔焊接工艺[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1003004.
- 6 Guo Tiejing, Lou Shuqin, Li Honglei, *et al.*. Low loss arc fusion splice of photonic crystal fibers[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(2): 511-516.
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.
- 7 Yang Qing, Shi Jielong, Sun Weisheng, *et al.*. Low-loss splicing based on the technique of mode-field matching by fusion taper rig [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1006001.
杨清, 施解龙, 孙伟胜, 等. 基于光纤拉锥模场匹配技术的光子晶体光纤低损耗熔接[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1006001.
- 8 Ran Aharoni, Liron Bidani, Moshe Sinvani, *et al.*. Initiatory concept of localized CO_2 laser-based tapering rig for realization of in-fiber devices[J]. Opt Eng, 2012, 51(7): 075002.
- 9 Jun Ki Kim, Christian Hagemann, Thomas Schreiber, *et al.*. Monolithic all-glass device combining pump coupling and end cap scheme for high-power fiber lasers [C]. SPIE, 2010, 7580: 75802F.
- 10 Ye Changgeng, Yan Ping, Ou Pan, *et al.*. Experimental research of end-cap splicing technique for double-clad fibers based on CO_2 laser[J]. Laser Technology, 2007, 31(5): 456-458.
叶昌庚, 闫平, 欧攀, 等. 基于 CO_2 激光的双包层光纤端帽熔接实验研究[J]. 激光技术, 2007, 31(5): 456-458.
- 11 Anthony D McLachlan, Fred P Meyer. Temperature dependence of the extinction coefficient of fused silica for CO_2 laser wavelengths[J]. Appl Opt, 1987, 26(9): 1728-1731.
- 12 Anna-Maria-Bian Shi, Yves-Futai Le, Jacques Katarina-Aidai. Transferts Thermiques [M]. Wang Xiaodong, Transl. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2008. 1-113.
Anna-Maria-Bian Shi, Yves-Futai Le, Jacques Katarina-Aidai. 传热学[M]. 王晓东, 译. 大连: 大连理工大学出版社, 2008. 1-113.
- 13 Fu Guangwei, Bi Weihong, Jin Wa. Heat transfer of fusion splicing photonic crystal fiber [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(9): 2372-2379.
付广伟, 毕卫红, 金娃. 待熔光子晶体光纤中的热传导特性[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2372-2379.
- 14 Wa Jin, Weihong Bi, Guangwei Fu. Optimal fusion offset in splicing photonic crystal fibers[C]. SPIE, 2013, 8914: 89140U.
- 15 Wang Baohua, Jiang Menghua, Hui Yongling, *et al.*. Improving coupling efficiency of optical fiber for high-power laser beam [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(2): 195-199.
王宝华, 姜梦华, 惠勇凌, 等. 大功率固体激光器高效率光纤耦合[J]. 中国激光, 2008, 35(2): 195-199.

栏目编辑: 王晓球