

高功率、低损耗光纤合束器的制备与研究

吴娟^{1,2}, 李腾龙^{1,2}, 王岩山^{1,2}, 冯煜骏^{1,2}, 马毅^{1,2}, 张凯^{1,2}, 孙殷宏^{1,2}, 张卫^{1,2}

(1. 中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900;

2. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 提出了一种分步式制备端泵浦型光纤合束器的新方法。采用模具、热缩管、细丝对合束光纤进行规则合束与固定, 合束后的输入光纤束在拉锥前无须扭转, 可形成一整根光纤的形态, 从而能够与商业切割刀、熔接机等设备兼容。采取此方法得到的 7×1 型光纤合束器的耐受功率大于 1400 W, 泵浦耦合损耗低于 0.1 dB。测试和分析了封装后合束器的温度分布, 光纤聚合物层温升较大, 其限制了合束器耐受功率的提升。

关键词: 光纤合束器; 泵浦耦合效率; 耐受功率; 温度分布

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)03-1015-05

Fabrication and research of high power and less-loss fiber combiner

Wu Juan^{1,2}, Li Tenglong^{1,2}, Wang Yanshan^{1,2}, Feng Yujun^{1,2}, Ma Yi^{1,2},
Zhang Kai^{1,2}, Sun Yinhong^{1,2}, Zhang Wei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China; 2. Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: A novel technique for end-pumped fiber combiner fabrication by multi-step process was reported. The mould, heat-shrinkable tube and filament were used to combine and fix the fibers. The combined input fiber beam can form a whole fiber without turning around before tapering, and was compatible with the commercial cut knife and welding machine. The fabricated 7×1-type fiber combiner had a durable power of 1400 W and the pump coupling loss was under 0.1 dB. The temperature distribution of the packaged fiber combiner was measured and analyzed. It shows that the polymer layer has a big temperature rise and limits the durable power of the fiber combiner.

Key words: fiber combiner; pump coupling efficiency; durable power; temperature distribution

收稿日期: 2014-01-21; 修订日期: 2014-02-20

作者简介: 吴娟(1985-), 女, 硕士生, 主要从事光纤合束器技术方面的研究。Email: wj.62803221@163.com

导师简介: 张卫(1967-), 男, 研究员, 主要从事激光总体技术方面的研究。Email: zhangwei@caep.ac.cn

0 引言

相较于其他类型的激光器, 光纤激光器具有诸多独特的优点, 如可实现光束质量达近衍射极限的激光输出、电光效率高、寿命长、可靠性高、系统体积小、使用和存储方便等^[1-2]。高功率光纤激光器具有广泛的应用价值, 如光纤激光切割、焊接, 广泛用于造船和汽车制造工业中^[3]。进入 21 世纪以来, 高功率光纤激光器的发展迅猛, 百瓦至千瓦级的高功率光纤激光器陆续问世, 美国 IPG 公司在 2009 年已实现了万瓦级光纤激光器的研制^[4]。高功率光纤激光器中的核心器件, 如光纤合束器、高质量光纤、高亮度泵浦源、光纤光栅、泵浦光剥离器等器件的飞速发展是推动高功率光纤激光技术发展的巨大动力。而国内对光纤激光器的核心器件的研究起步较晚, 目前的总体技术水平较为落后。

光纤合束器的主要功能是实现泵浦光耦合, 由于其具有耦合效率高、集成度高、操作方便等优点, 在全光纤化高功率光纤激光器中, 光纤合束器不可或缺^[5-6]。从结构上划分, 光纤合束器分为端泵浦型和侧泵浦型两种^[7]。合束器的主要技术指标包含两项: 泵浦耦合效率、耐受功率。端泵浦型合束器的制作原理基本相同, 但制备方法却有所不同, 目前报道的制备方法主要有两种, 一种是石英玻璃套管法^[6,8], 据相关文献报道, 采用这种方法研制的光纤合束器泵浦耦合效率为 0.27 dB^[6]; 另一种是光纤扭转打结法, 加拿大 ITF 公司和国内清华大学均采用这种方法制备光纤合束器, 其泵浦耦合效率约 0.1 dB^[9], 单臂耐受功率大于 200 W。该文提出了一种分步式制备端泵浦型光纤合束器的新方法, 给出了用该方法研制的光纤合束性能测试结果, 并对合束器进行了封装, 测试和分析了封装结构的热效应, 为提高合束器的耐受功率提供了线索。利用文中提出的分步式制备合束器的方法可方便地制备出高功率、低损耗光纤合束器。

1 分步式制备光纤合束器的方法

端泵浦型光纤合束器的制作原理基于熔融光纤束拉锥技术^[10], 其制作的基本步骤主要包括: (1) 对输入光纤进行合束并拉锥; (2) 在合束锥区的目标直

径处进行切割; (3) 将切割后的合束锥区与目标光纤熔接。步骤(1)是合束器制作的重点和难点, 为实现对输入光纤的合束与拉锥, 一种方法是石英玻璃套管法, 具体操作是将输入光纤穿过尺寸匹配的石英玻璃管中, 然后利用高温热源将输入光纤与石英玻璃管一起加热并拉锥, 这种方法工艺复杂, 操作繁琐, 且大部分裸光纤无束缚, 容易折断, 所以非常不利于切割^[11]; 第二种方法是扭转打结法, 其原理是将各输入光纤用夹具固定后再通过扭转光纤的方式将输入光纤紧密贴合, 然后用高温热源对输入光纤束进行熔融拉锥, 这种方法需要结构较复杂的光纤夹具对输入光纤进行夹持, 且由于光纤扭转, 如果工艺控制不到位, 可能会引入微弯和宏弯损耗, 从而降低泵浦耦合效率。

以上两种方法各有利弊, 为克服以上两种方法引起的问题, 提出了一种分步式制备光纤合束器的新方法。该方法首先利用模具和热缩管对输入光纤束进行合束, 如图 1 所示。在合束前, 将输入光纤右侧的一段涂覆层剥除使之成为一段裸光纤段, 然后用模具对输入光纤束进行规则排列, 再用两段热缩管固定在裸光纤段的两端。一种 7×1 型光纤合束器的模具端面结构示意图如图 2 所示。其中, 模具为圆柱形, 其直径 D_1 为 3~4 mm, 输入光纤固定通孔直径 D_2 较含涂敷层的输入光纤直径稍大 (如对于涂敷层直径为 320 μm 的泵浦光纤, D_2 可为 330~360 μm)。中心通孔周围任一通孔的距离 D_3 大于或等于通孔直径, 但不可过大, 以免光纤在合束时被折断。可根据不同尺寸的输入光纤对模具进行设计加工。

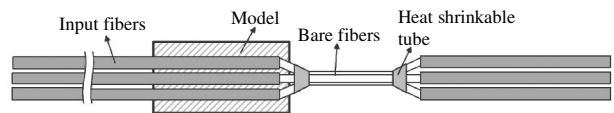


图 1 用模具和热缩管对输入光纤合束

Fig.1 Fiber combine process by using model and heat-shrinkable tube

输入光纤束完成合束后, 将模具取下, 并用细丝对裸光纤段两端带涂覆层的输入光纤束进行捆绑固定, 从而形成一整根光纤的形态, 如图 3 所示。这样的结构稳定牢固, 在后续的切割、熔接等操作中不易折断, 且可方便地与市面上针对单根光纤设计的切割刀、熔接机兼容。将合束固定后的光纤置于光纤拉锥机的夹具上, 无须扭转输入光纤束, 在静止的情况

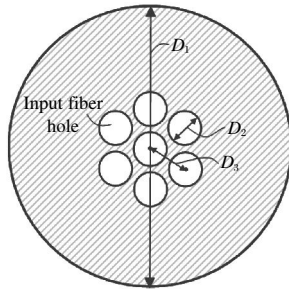


图 2 一种 7×1 型光纤合束器模具的端面结构

Fig.2 Cross section structure of the model for 7×1-type fiber combiner

下用高温火焰对裸光纤段来回扫描预热，这样做的目的是将各光纤稍微熔融贴合，从而避免各光纤在拉锥过程中分离。然后对输入光纤束按照亮度守恒定律的要求进行拉锥，即 $NA_{in} \cdot D_{in} \leq NA_{out} \cdot D_{out}$ ，其中， NA_{in} 和 D_{in} 为输入光纤拉锥前的数值孔径和总直径， NA_{out} 和 D_{out} 为输出光纤的数值孔径和直径。拉锥结束后对输入光纤锥区在目标直径处进行切割，将切割后的输入光纤束与输出光纤进行熔接，从而实现光纤合束功能。

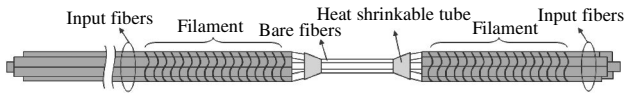


图 3 合束固定后的输入光纤束

Fig.3 Combined and fixed input fiber beam

这种分布式制备光纤合束器的新方法具有很多优点，如：操作简单方便；可与商业切割刀、熔接机等设备兼容；拉锥前输入光纤束无须扭转，从而可避免因光纤弯曲带来的损耗；结构稳定可靠，光纤不易折断。

2 单臂泵浦耦合效率和耐受功率测试

利用上述方法，笔者制备了 7×1 型光纤合束器。泵浦光纤为 7 根 Nufern 光纤，包层直径 220 μm，纤芯直径 200 μm，数值孔径为 0.22；目标光纤为 Nufern 双包层光纤(DCF)，纤芯直径 20 μm，内包层直径 400 μm，内包层数值孔径 0.46。该 7×1 型光纤合束器的锥区在利用 Vytran 切割刀切割后的端面 and 侧面显微照片如图 4 所示，各光纤在锥区排列均匀，切割角度小于 1°。用 Vytran 熔接机将其与目标光纤熔接后的显微照片如图 5 所示。

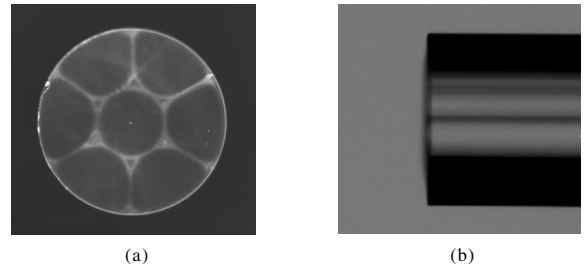


图 4 合束光纤锥区切割后的(a)端面和(b)侧面的显微照片

Fig.4 Picture of the fiber tapering zone after cutting (a)cross section and (b) lateral profile

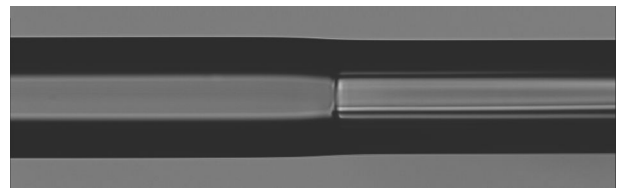


图 5 合束光纤与目标光纤熔接后的显微照片

Fig.5 Combined fiber welds with the target fiber

合束器制备完成后，须对 7 根泵浦光纤进行泵浦耦合效率和耐受功率测试，测试光路图如图 6 所示。测试前，用 7 个泵浦光源(DL1#~DL7#)分别与 7×1 型合束器的 7 根单臂泵浦光纤(f1~f7)熔接，在输出光纤末端切一 0°角，并将功率计对准出射光斑。测试时，记录下相应 DL 加载一定电流时第 i 根泵浦光纤所对应的输出功率 P_i 。为得到第 i 根泵浦光纤的传输效率 η_i ，完成以上测试后，保留 DL 与每个臂的熔接点，将合束器的单臂剪掉一段，按图 7 所示光路测试相应 DL 加载相同电流时第 i 根泵浦光纤的初始功率值 P_{0i} ，则 $\eta_i = P_i / P_{0i}$ ，相应的耦合损耗 $L_i = -10 \cdot \log(\eta_i) / \text{dB}$ 。DL 加载不同电流 I 时单臂输出功率测试结果如图 8 所示 (以其中两个臂为例)，图中单臂耐受功率大于 200 W，其输出功率与 DL 加载电流呈线性关系。各臂耦合效率 η_i 、插入损耗 L_i 计算结果如图 9 所示，该合束器的平均泵浦耦合效率为 98.3%，即耦合损耗为 0.07 dB。

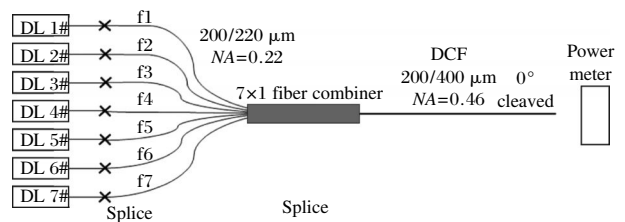


图 6 合束器单臂输出功率测试光路图

Fig.6 Setup of single arm output power measurement

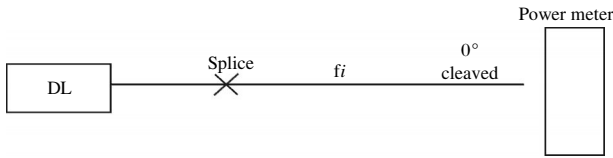


图 7 合束器单臂输入功率测试光路图

Fig.7 Diagram of single arm input power measurement

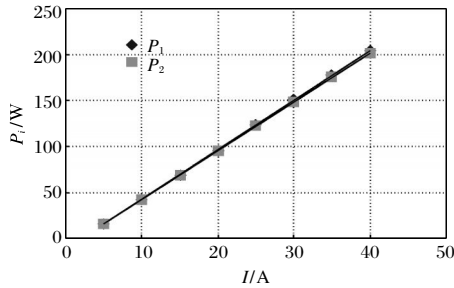


图 8 单臂输出功率与 DL 加载电流的关系

Fig.8 Single arm output power versus the DL load current

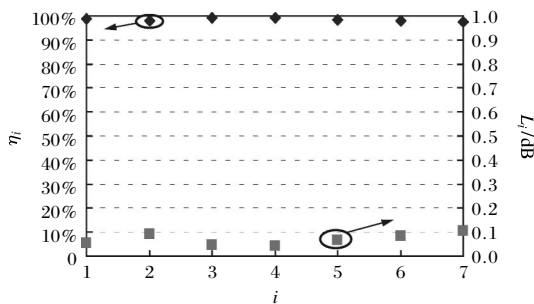


图 9 各臂耦合效率与插入损耗的值

Fig.9 Coupling efficiency and insertion loss of each arm

3 合束器的损耗

对于上述 7×1 型合束器而言,其损耗来源主要为两方面,一是输入光纤与输出光纤熔接时引起角度、轴向或面积失配,从而导致光束散射^[12];二是由于输入光纤与输出光纤在熔接点处的波导结构差异较大,导致光束模场失配,引起模场失配损耗。这两种损耗的直接影响是无法在波导结构中稳定传播高阶模式光束,这部分光束直接散射到空气中或被光纤结构中的聚合物介质层吸收,从而引起聚合物介质层的温度迅速升高,如图 10 所示。其危害非常大,可能导致合束器毁坏,甚至殃及整套光纤激光系统,并且,其也限制了合束器的耐受功率的能力提升。

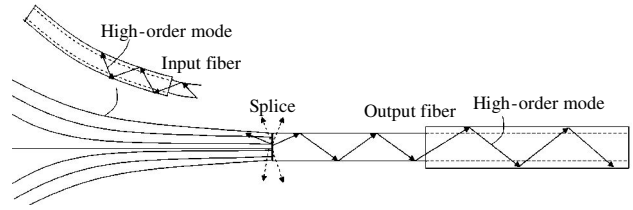


图 10 熔接点附近的高阶模式传输路径

Fig.10 Transition path of the high order mode near the splice

4 合束器的封装和热效应

针对以上分析,对合束器封装时应着重考虑降低合束器的温度,提高合束器散热性能。为研究合束器内部温度分布,对研制的 7×1 合束器进行了简单封装,封装结构如图 11 所示。用紫外高折胶涂覆输入光纤束和输出光纤的聚合物层,从而吸收高阶模式光束并使得光纤合束器固定在铝板上,铝板尺寸为 65mm×12mm×7mm,为加强散热,将铝板固定在水冷板上(冷板温度为 15℃)。用热像仪对封装后的合束器温度分布进行测试,如图 12 所示。测试发现,光纤合束器的熔接点温度最高,输出光纤的聚合物包层温度次之,输入泵浦光纤束的温度相对较低。这证明了在合束器的熔接点附近的确产生了不被光纤稳定传输的高阶模式,这些高阶模式光束被输入光纤束和输出光纤的

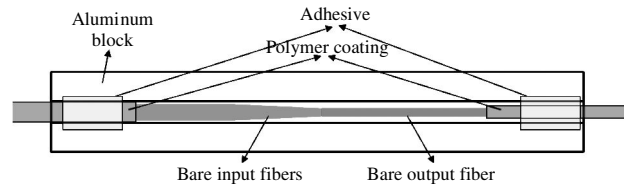


图 11 7×1 合束器封装结构示意图

Fig.11 Package diagram of 7×1-type fiber combiner

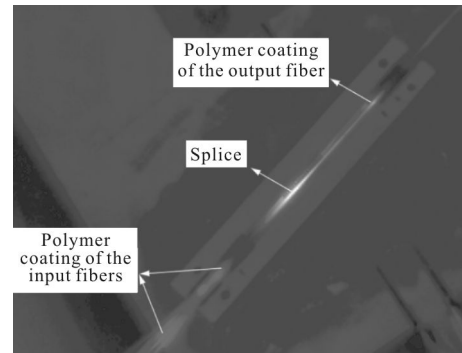


图 12 合束器温度分布

Fig.12 Temperature distribution of the fiber combiner

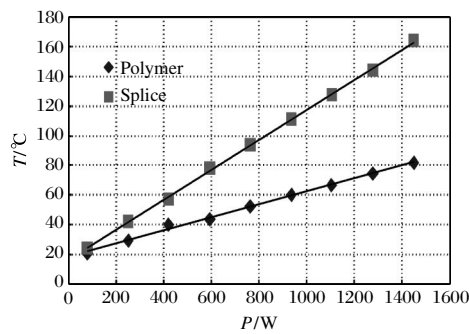


图 13 聚合物包层和熔接点的温度随加载功率变化曲线

Fig. 13 Temperatures of the polymer layer and the splice with different load power

聚合物层吸收,导致其温升。输出光纤的聚合物包层与熔接点的温度随合束器加载功率 P 的变化关系如图 13 所示。随着加载功率的增大,聚合物包层和熔接点的温度也线性增大,合束器输出功率达 1 446.9 W 时,熔接点温度达到 164.3 °C,而输出端聚合物包层的温度已达到 81.9 °C。

5 结论

利用提出的分步式制备光纤合束器的新方法制备得到了 7×1 型光纤合束器,其单臂耐受功率大于 200 W,总耐受功率大于 1 400 W,泵浦耦合损耗低于 0.1 dB。对封装后的合束器进行了温度测试,发现输出光纤聚合物包层和输入光纤聚合物层均有温升,这证明了熔接点产生了不被光纤稳定传输的高阶模式,从而被光纤聚合物层所吸收,导致其发热。输出光纤聚合物包层的温升较大,当合束器输出功率达 1 446.9 W 时,输出光纤聚合物层的温度已达到 81.9 °C (水冷板温度 15 °C),若合束器在此温度下长期工作,输出光纤的聚合物层可能会逐渐老化而导致合束器损坏。因此,应优化合束器封装结构,加强热传导,提高合束器中聚合物层的散热性能,同时,可通过工艺优化进一步减小拉锥、切割、熔接过程中产生的光损耗,从而降低光纤聚合物的温升,提高合束器的工作稳定性和耐受功率极值。

参考文献:

[1] Shen Hongbin, He Haijun, Hou Jing, et al. Experimental research on all-fiber coherent beam combining [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(6): 548-551. (in Chinese)

沈洪斌,何海军,侯静,等.全光纤激光相干合成实验研究[J].*激光与红外*, 2008, 38(6): 548-551.

- [2] Zhang Liming, Zhou Shouhuan, Zhao Hong, et al. Experiment research of 1 kW single mode all fiber laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(11): 2927-2930. (in Chinese)
张利明,周寿桓,赵鸿,等.1 kW 单模全光纤激光器实验研究[J].*红外与激光工程*, 2012, 41(11): 2927-2930.
- [3] Zhang Mingjun, Chen Genyu, Li Shichun, et al. Experimental investigation on fiber laser overlap welding of automotive aluminum to galvanized steel[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(6): 0603010-1-0603010-6. (in Chinese)
张明军,陈根余,李时春,等.车用铝合金与镀锌钢光纤激光搭接焊试验研究[J].*中国激光*, 2011, 38(6): 0603010-1-0603010-6.
- [4] IPG Photonics Corporation. IPG Photonics successfully tests world's first 10 kilowatt single-mode production laser [EB/OL]. [2009-06-16]. http://www.ipgphotonicskorea.com/Collateral/Documents/English-US/PR_Final_10kW_SM_laser.pdf.
- [5] Andrea Braglia, Massimo Olivero, Alessandra Neri, et al. Fabrication of pump combiners for high power fiber lasers [C]//SPIE, 2011: 7914: 79142V.
- [6] Jun Ki Kim, Christian Hagemann, Thomas Dchreiber, et al. Monolithic all-glass pump combiner scheme for high-power fiber laser systems[J]. *Optics Express*, 2010, 18: 13195-13202.
- [7] Yao Jianquan, Ren Guangjun, Zhang Qiang, et al. Yb doped double clad fiber laser and pump coupling technology [J]. *Laser Journal*, 2006, 7(5): 1-4. (in Chinese)
姚建铨,任广军,张强,等.掺镱双包层光纤激光器及其泵浦耦合技术[J].*激光杂志*, 2006, 37(5): 1-4.
- [8] Andrey Kosterin, Valery Temyanko, Mahmoud Fallahi, et al. Tapered fiber bundles for combining high-power diode lasers [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(19): 3893-3900.
- [9] Xiao Q, Yan P, He J, et al. Tapered fused fiber bundle coupler capable of 1 kW laser combining and 300 W laser splitting[J]. *Fiber Optics*, 2011, 21(8): 1415-1419.
- [10] Headley C, Fishteyn M, Yablon A D, et al. Tapered fiber bundles for combining laser pumps [C]//SPIE, 2005, 5709: 263-272.
- [11] Zhou Hang. Studies on manufacture of photonic crystal fiber combiners [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011, 11. (in Chinese)
周航.光子晶体光纤合束器的制作研究[D].长沙:国防科学技术大学, 2011, 11.
- [12] François Séguin, Alexandre Wetter, Lilian Martineau, et al. Tapered fused bundle coupler package for reliable high optical power dissipation[C]//SPIE, 2006, 6102: 1-10.