

国产高功率光纤泵浦合束器特性研究

龚智群^{1,2}, 王小林¹, 曹涧秋¹, 郭少锋¹, 江厚满¹

(1. 国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 中国人民解放军 91715 部队, 广东 广州 510400)

摘要: 在全光纤结构光纤激光器/放大器中, 泵浦合束器的功率特性直接影响激光器/放大器最终输出功率。依据合束器的基本结构, 分析了合束器的损耗来源, 研究了不同情况下某系列国产合束器的功率和温度特性。指出了泵浦损耗、泵浦回光、环境温度以及泵光亮度等因素对合束器工作温度的影响。对某国产新型高功率合束器进行测试, 测试结果表明, 单臂可输入功率大于 100 W, 有望支撑全国产千瓦量级高功率光纤激光器, 相关研究结果为合束器的设计和热管理提供了参考。

关键词: 光纤激光器; 泵浦合束器; 功率损耗; 温度分布

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)10-2658-05

Characteristics of homemade high power fiber pump combiner

Gong Zhiquan^{1,2}, Wang Xiaolin¹, Cao Jianqiu¹, Guo Shaofeng¹, Jiang Houman¹

(1. College of Opt-electrical Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. No. 91715 of PLA, Guangzhou 510400, China)

Abstract: In the configuration of the fiber laser/amplifier, the characteristics of the fiber pump combiner influence directly on the output power of the laser/amplifier. According the basic structure of the fiber pump combiner, the origin of the loss was analysed, the characteristics of power and temperature in some series of domestic combiner were studied in different conditions. The influence on the working temperature of pump combiner at the factor of the loss of pump energy, the return of pump energy, the ambient temperature and the brightness of pump light was pointed out. Some new type high power combiner was tested and the result demonstrates one input fiber of the combiner can stand up over 100 W pump power, which make it possible to create the kilowatt fiber laser based on all-domestic appliances. Some correlative results of this research can provide the reference of the design and the heat management for the fiber combiner.

Key words: fiber laser; pump combiner; loss of power; distribution of temperature

收稿日期: 2013-02-11; 修订日期: 2013-03-17

作者简介: 龚智群(1985-), 男, 硕士生, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。Email: 425619405@qq.com

导师简介: 江厚满(1970-), 男, 副教授, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。Email: wxlin@nudt.edu.cn

0 引言

近年来,随着高亮度泵浦半导体、掺杂双包层有源光纤等技术的发展,光纤激光器的输出功率得到飞速提升。目前,国际上已经实现了单模 10 kW 量级的全光纤激光输出^[1]。国内在高功率光纤激光器领域起步较晚,目前取得了较大的进步,多家单位和科研院所的输出功率已可突破千瓦^[2-6]。但是,国内高功率光纤激光系统中,大都使用了国外的器件。在全光纤结构光纤激光器/放大器中,大模场掺杂光纤、高亮度泵浦源、泵浦合束器是实现高功率的光纤激光器的关键器件,由于西方国家对中国的技术封锁和产品禁运,严重限制了中国高功率光纤激光的发展。因此,研制基于国产器件的高功率光纤激光器对中国光纤激光技术的发展具有重要的战略意义。

在全光纤结构光纤激光器/放大器中,除了掺杂光纤、高亮度泵浦源外,泵浦合束器的功率特性直接影响激光器/放大器最终输出功率^[7]。目前,国外商品化的光纤合束器单臂功率已经突破 200 W,国内尚无单臂大于 50 W 合束器的报道。因此,研究高功率条件下,国产光纤泵浦合束器的热效应,分析器件温度分布规律,设计相应的热管理方案,有助于提升合束器可承受的泵浦功率,最终实现基于国产器件高功率光纤激光器。

1 合束器基本结构及损耗来源分析

按照应用方式,端面泵浦的合束器可以分为 $N \times 1$ 和 $(N+1) \times 1$ 两种类型。图 1 是 ITF 公司合束器典型的结构示意图^[8]。 $N \times 1$ 型是由 N 根同类型光纤经熔融拉锥截断,再与一根双包层光纤熔接而成,而 $(N+1) \times 1$

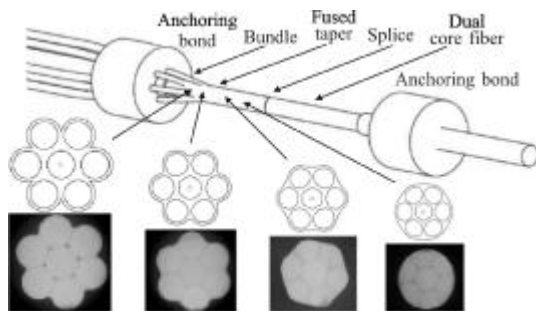


图 1 合束器结构示意图
Fig.1 Scheme of combiner

型是使 N 根同类型光纤紧密围绕中心一信号光纤合束熔融拉锥截断之后,再与一根折射率分布匹配的双包层光纤熔接而成。前者适用于光纤激光器结构中,后者适用在光纤放大器系统中。

合束器在设计和制造上要满足亮度守恒原理: $NA_1 D_1 \leq NA_2 D_2$, D_1 和 NA_1 分别为输入光纤组的横截面积和数值孔径, D_2 和 NA_2 分别为输出光纤的横截面积和数值孔径,否则泵浦光无法有效地传导进双包层光纤中,造成大量的光泄露。合束器作为一个无源光学耦合器件,在制造过程中难免引入各种损耗,造成从各臂输入的光功率损失,而这部分损失能量会以热量的形式耗散或者沉积,沉积的热量导致了合束器结构中各部位的温度升高。合束器的损耗大致由以下几种情况造成:数值孔径变形,端面的不匹配,熔接点损耗,弯曲损耗,工艺的缺陷等^[9]。不同制作工艺情况下得到的合束器的特性各有所差异,文中从整体角度考虑,对两类国产合束器进行实际测试,分析泵光损耗、回光功率、环境温度等不同情况下,合束器功率和温度分布特性。

2 两类国产合束器测试

2.1 国产 $N \times 1$ 合束器测试

2.1.1 损耗对合束器温度的影响

实验原理如图 2 所示,使用国内某公司的一款 3×1 合束器,输入光纤为 $105/125 \mu\text{m}$,数值孔径 $NA=0.22$,输出光纤为 $200/220 \mu\text{m}$, $NA=0.22$ 。3 个带尾纤的 LD 与合束器的泵浦臂熔接,合束器输出端切成 8° 斜角。合束器整体平放在设定水冷温度 16°C 的水冷板上,用功率计和红外热像仪分别测量合束器输出功率和温度分布特性。

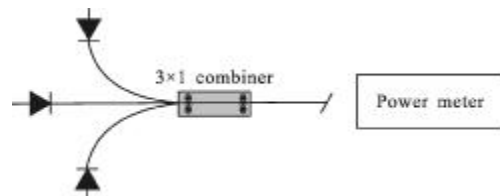


图 2 实验原理示意图

Fig.2 Experimental theory sketch map

图 3 给出了合束器内部温度分布,温度最高点出现在合束器输出端光纤的去涂覆层处,这是由于泵浦光从没有涂覆的包层进入有涂覆的包层过程

中,边界条件发生了变化,大量的泵浦光溢出造成的。实验记录输出功率大小和合束器内部温度最高点温度,得到合束器内最高温度和泵浦功率损失之间的关系,如图 4 所示。合束器内温度最高点的温升随着损失功率的增加呈线性增加。因此,输入光功率的损耗是造成合束器内部光纤温度上升的主要原因。

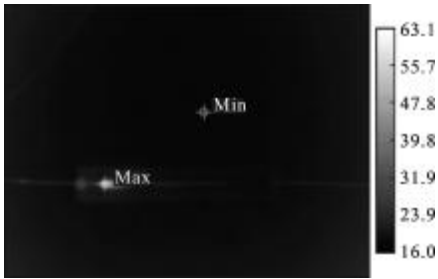


图 3 合束器内部温度图像

Fig.3 Image of combiner inner temperature

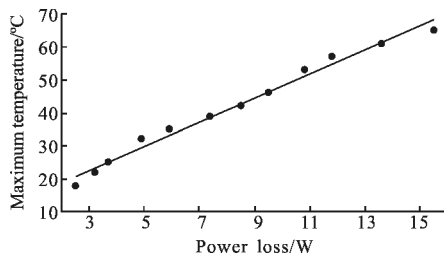


图 4 合束器内部最高温度与泵浦功率损失的关系

Fig.4 Relationship between inner maximum temperature and loss of pump power in the combiner

2.1.2 回光功率对合束器温度的影响

泵浦光在合束器光纤结构中传导时,由于散射等效应,会产生向相反方向传导的光,回光反向经过合束器光纤结构的各部位,会对合束器温升造成影响。实验进行了不同回光功率下合束器温度特性的对比。

为了有效研究回光功率对合束器温度的影响,实验选取泵浦损耗较低的 7×1 合束器进行测试^[10]。图 5 是实验原理图,使用 5 个 LD 提供泵浦光,合束器放置于温度 16 °C 的水冷板上,用功率计和红外热像仪分别测量合束器输出功率和中心臂的回光功率及各部位温度。回光功率的差异是通过改变合束器输出端面的角度来实现,实验分别测试了输出端为平角和 8°斜角两种情况下的温度分布。输出光会在平角端面形成菲涅尔反射,有 4% 的光功率返回合束器中,而 8°斜角的端面情况下,泵光基本全部输出,回光大大减少。

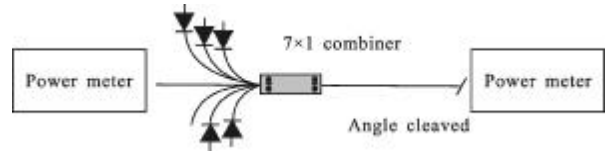


图 5 实验原理示意图

Fig.5 Experimental theory sketch map

图 6 是两种条件下回光和温度的对比。随着工作电流的增加,回光功率线性增加,对于同一工作电流,两者输出功率相差较小,由于平角端面存在反馈光,回光功率要大于斜角情况,且两者的温度一直存在 5~6° 的差距,这显然不是光沿正向传输时的损耗差异造成,而是回光经合束器结构时产生较大损耗形成的。当此类合束器作为反向泵浦使用时,反向泵浦光造成的温升会很大,这将是制约反向泵浦功率提升的重要因素。

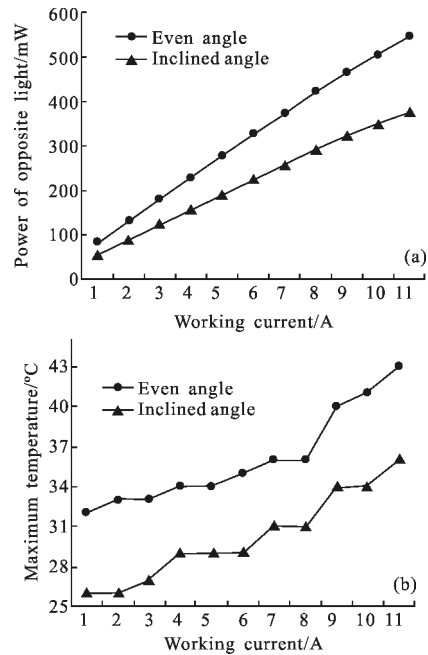


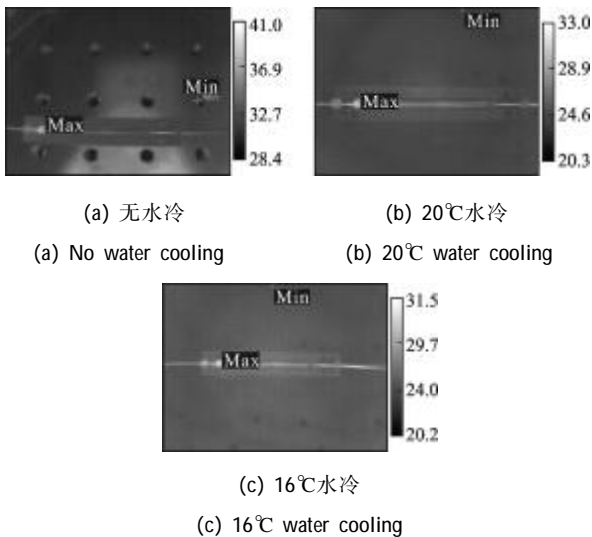
图 6 平角和斜角条件下回光和温度的对比

Fig.6 Comparison of temperature and power of opposite light between even angle and inclined angle situation

2.1.3 环境温度对合束器温升的影响

合束器具有一定的封装结构,能够与外界环境进行热传导,对其内部光纤结构进行冷却控温。实验中将合束器置于水冷板上,使其外壳底部与水冷板充分接触,在环境温度为 22 °C 条件下,进行了无强制水冷、20 °C 强制水冷、16 °C 强制水冷三组对比。图 7 是泵浦功率相同的条件下,不同冷却条件下合束器

温度分布特性。从图像右侧温标看出,强制水冷温度越低,合束器内部的温度越低,证实通过壳体与水冷板的热传导,间接地降低了合束器内部光纤的工作温度。也即是,外界环境温度对合束器工作温度有一定的影响,通过降低外界环境温度或增加冷却措施,可以控制合束器的工作温度,提升可承受功率。



(a) 无水冷

(b) 20℃水冷

(c) 16℃水冷

图 7 不同冷却条件下合束器内部温度图像

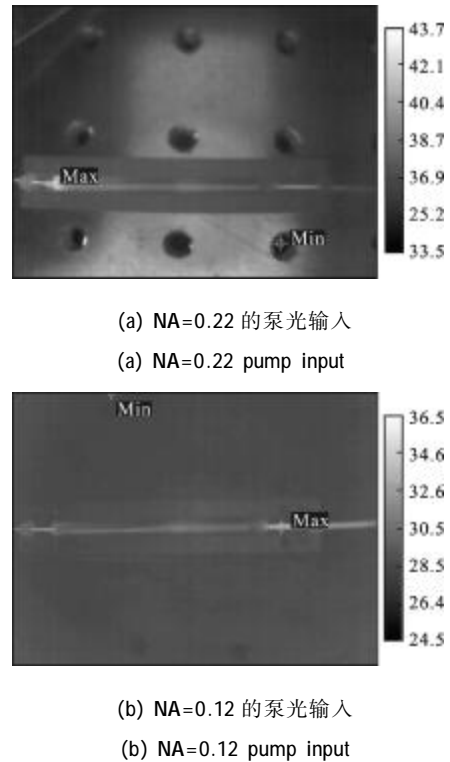
Fig.7 Image of combiner inner temperature in different cooling conditions

2.1.4 泵源亮度对合束器温度的影响

实验研究了不同亮度 LD 对合束器工作特性的影响。选取某款输入光纤数值孔径为 0.22,输出光纤数值孔径为 0.46 的 7×1 合束器,使用 NA=0.22 和 NA=0.12 两种泵源进行对比。实验结果表明,在相同的输出功率情况下,数值孔径越小,合束器的温度越低。典型的温度分布如图 8 所示,图 8(a)为 NA=0.22 的泵光输入的情况,图(b)为 NA=0.12 的泵光输入的情况,合束器内温度分布不同,且温度最高点位置也不同。图(a)中温度最高点在输出端光纤的去涂覆处,这与 3×1 合束器的测试及原因相同。图(b)中温度最高点在输入端的光纤组上,是由于 NA=0.12 的泵光在 NA=0.22 光纤中传输的光损耗大于泵光在 NA=0.46 的光纤中传导时由去涂覆处界面变化造成的损耗。

实验还发现,即使在相同输出功率和回光功率的情况下,温度分布也不相同。可见温度分布不由回光功率唯一确定,还与回光的亮度等因素有关。在高亮度泵光的情况下,合束器内部温度分布相对平缓,

若使用均匀的强制水冷措施,冷却效果更好。



(a) NA=0.22 的泵光输入

(a) NA=0.22 pump input

(b) NA=0.12 的泵光输入

(b) NA=0.12 pump input

图 8 不同亮度下合束器内部温度图像

Fig.8 Image of combiner inner temperature in different pump brightness input

2.2 国产新型高功率(N+1)×1 合束器测试

为了验证国产高功率合束器的功率特性,与国内某公司合作研制了一款高功率合束器,并对该国产新型高功率(N+1)×1 合束器测试进行了测试。合束器输入光纤为 200/220 μm、NA=0.22,输出光纤为 20/400 μm 的双包层光纤,内包层 NA=0.08,外包层 NA=0.46,高功率 LD(200/220 μm、NA=0.22)接入合束器的泵浦臂,合束器输出端切 8°斜角,用功率计测量输出光功率及信号臂中回光功率,得到图 9 所

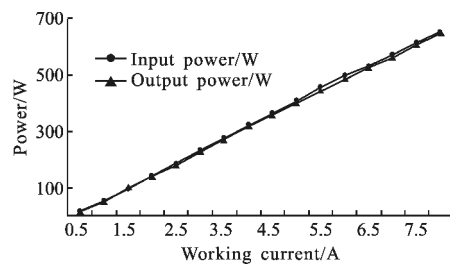


图 9 合束器输入、输出功率与工作电流的关系

Fig.9 Relationship between input, output power and working current of combiner

示的功率曲线。原泵浦功率与输出功率曲线基本重合,可见损耗的泵浦光较少,实验测得该款合束器的泵浦臂插损在 0.1 dB 左右,且回光功率随着泵浦功率呈线性增加。

由于制造和封装都采用了特殊工艺,未能观察到合束器内部的工作温度。合束器放置在强制水冷为 16℃的水冷板上,壳体温度控制在 20℃以下,输入输出光纤两端的温度未超过 32℃,图 10 是合束器实际工作时的图像,此时合束器承受了 648 W 的泵浦光功率。

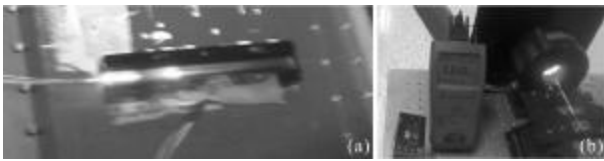


图 10 合束器工作图像

Fig.10 Image of combiner at work

3 结 论

国产合束器在制造工艺和封装设计上与国外的产品存在一定的差距,合束器的泵浦功率一直受到限制。文中立足国产器件,测试国产两种类型合束器的功率和温度特性。结果表明,损耗、回光功率是合束器温升的来源,通过工艺改进减少合束器结构中的损耗是基本途径;由于回光功率是导致合束器温升的重要因素之一,合束器在反向泵浦结构中,反向的光损耗将是制约合束器承受功率的重要因素;控制环境温度和使用外界强制冷却能通过封装传导散热,可以降低合束器内部工作温度。

对改进拉制工艺和封装设计的国产某型高功率的(N+1)×1 合束器进行测试,结果表明单臂能够承受大于 100 W 的泵光输入。表明国产高功率合束器有了较大的突破,基于此关键器件的性能,有望实现全国产千瓦级的光纤激光器,这将是冲破技术封锁,实现自力更生的基础,对我国激光技术的发展具有重要的意义。

参考文献:

[1] IPG photonics successfully tests world's first 10kilowatt

single-mode production laser [EB/OL]. 2009, <http://www.ipgphotonics.com>.

- [2] Lou Qihong, Zhou Jun, Zhu Jianqiang, et al. Recent progress of high-power fiber lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(2): 135.(in Chinese)
楼祺洪,周军,朱健强,等.高功率光纤激光器研究进展[J].*红外与激光工程*, 2006, 35(2): 135.
- [3] Li Wei, Wu Zichun, Chen Xi, et al. High power fiber laser output power through 1kW [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(6): 890.(in Chinese)
李伟,武子淳,陈曦,等.大功率光纤激光器输出突破 1kW [J].*强激光与粒子束*, 2006, 18(6): 890.
- [4] Zhao Hong, Zhou Shouhuan, Zhu Chen, et al. High power fiber laser outputpower more than 1.2 kW [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(10): 930.(in Chinese)
赵鸿,周寿桓,朱辰,等.大功率光纤激光器输出功率超过 1.2kW[J].*激光与红外*, 2006, 36(10): 930.
- [5] Lou Qihong, He Bing, Xue Yuhao, et al. 1.75 kW domestic Yb-doped double-clad fiber lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(5): 1277.(in Chinese)
楼祺洪,何兵,薛宇豪,等.1.75 kW 国产掺 Yb 双包层光纤激光器[J].*中国激光*, 2009, 36(5): 1277.
- [6] Yan P, Yin S P, Hu J W, et al. 1.1 kW ytterbium monolithic fiber laser with assembled end-pump scheme to couple high brightness single emitters [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(11): 697-699.
- [7] Liu Deming, Yan Changling. Key technologies and applications for high power fiberlaser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S): 105-109.(in Chinese)
刘德明,阎嫦玲.高功率光纤激光器的关键技术及应用[J].*红外与激光工程*, 2006, 35(S): 105-109.
- [8] Francois Seguin, Alexandre Wetter, Lilian Martineau, et al. Tapered fused bundle coupler package for reliable high optical power dissipation[C]//SPIE, 2006: 61021N.
- [9] AlexandreWetter, MathieuFanucher, Michael Lovelady, et al. Tapered fused-bundle splitter capable of 1kW CW operation [C]//SPIE, 2007.
- [10] Francois Gonthier, Lilian Martineau, NawfelAzami, et al. High-power all-fiber components the missing link for high-power fiber lasers[C]//SPIE, 2004, 5335.