

高功率光纤合束器热阻系数的研究

黄榜才, 张 鹏, 龙润泽, 韩桂云, 张培培, 王晓龙, 张雪莲, 梁小红

(中国电子科技集团公司第四十六研究所, 天津 300220)

摘 要:报道了高功率光纤合束器热阻系数的研究。实验研究了高功率光纤合束器热阻系数的测量方法, 分别在被动制冷、主动制冷和消除背向反射光条件下, 测量了加拿大 ITF 公司系列高功率光纤合束器的热阻系数, 分别为 $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$, $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$, $0.29\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$; 比较被动制冷和主动制冷两种条件下光纤合束器热阻系数的差异, 表明主动制冷可以明显降低光纤合束器热阻系数; 研究了光纤合束器背向反射光对热阻系数的影响, 发现消除背向反射光有利于降低热阻系数。研究结果对高功率光纤激光器结构设计具有重要意义。

关键词: 光纤光学; 激光器和放大器; 光纤合束; 主动制冷

中图分类号: TN253; TN248 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2015.07.011

Study on thermal resistivity of high power fiber combiner

HUANG Bang-cai, ZHANG Peng, LONG Run-ze, HAN Gui-yun,

ZHANG Pei-pei, WANG Xiao-long, ZHANG Xue-lian, LIANG Xiao-hong

(Institute 46th of Chinese Electronic Technology Group Company, Tianjin 300220, China)

Abstract: The research on thermal resistivity of high power fiber combiner is reported. The measurement method of thermal resistivity is studied. The thermal resistivity of high power fiber combiner of the Canadian ITF company is $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$, $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$, $0.29\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$ respectively under the conditions of passive cooling, active cooling and without the backward reflected light. Comparing the measured results between passive cooling and active cooling, it will be founded that the thermal resistivity under active cooling is lower. When the backward reflected light is eliminated, the thermal resistivity will be decreased also. The results are very important for the design of high power fiber laser.

Key words: fiber optics; laser and amplifier; fiber bundle; active heat sinking

1 引言

高功率的双包层光纤激光器以其优越的性能获得了广泛关注并大量应用^[1-3]。其中, 高功率光纤元器件的成熟和使用, 是高功率光纤激光器研制的重要保证。高功率光纤合束器是高功率光纤激光器泵浦光耦合的关键器件, 在高功率光纤激光器结构设计中大量应用, 因此国内外科研人员对高功率光纤合束器的研制及其性能研究非常重视^[4-6]。

热阻系数 (η , $^{\circ}\text{C}/\text{W}$) 是表征高功率光纤合束

器耐热性能的技术指标, 其定义是通过光纤合束器的光功率 (P , W) 每损耗 1 W , 在器件外壳所产生的温度变化值 (ΔT , $^{\circ}\text{C}$)。计算如式(1)所示:

$$\eta = \Delta T / \Delta P \quad (1)$$

根据定义, 高功率光纤合束器热阻系数越高, 相同光功率损耗产生的热量越多, 光纤合束器越容易发热; 反之, 热阻系数越低, 光纤合束器产生的热量越少, 耐热性能越高。因此, 高功率光纤激光器结构设计时, 应该选择热阻系数小的合束器产品。但是

作者简介: 黄榜才 (1976 -), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为高功率光纤激光器及放大器研制技术。E-mail: huangbang-cai@sohu.com

收稿日期: 2014-10-20

目前市场上出售的产品都不能提供该技术指标,用户无法了解产品的耐热性能,因此高功率光纤合束器热阻系数的测量非常必要。

本文实验研究了高功率光纤合束器热阻系数的测量方法,分别在被动制冷、主动制冷和消除背向反射光条件下,测量了加拿大 ITF 公司系列高功率光纤合束器的热阻系数,分别为 $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$, $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$, $0.29\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$;研究了被动制冷和主动制冷两种条件下光纤合束器热阻系数的差异,表明主动制冷可以明显降低光纤合束器热阻系数;研究了光纤合束器背向反射光对热阻系数的影响,发现消除背向反射光有利于降低热阻系数。

2 实验研究

2.1 实验装置及方法

本实验测量对象为加拿大 ITF 公司 7×1 系列高功率多模光纤合束器,7 根输入光纤是纤芯直径 $105\text{ }\mu\text{m}$ 、包层直径 $125\text{ }\mu\text{m}$ 的多模光纤,NA 值为 0.22;输出光纤是纤芯直径 $200\text{ }\mu\text{m}$ 、包层直径 $220\text{ }\mu\text{m}$ 的多模光纤,NA 值为 0.22。该系列合束器采用了散热能力较好的方形小铝块封装方式,根据厂家产品资料,单根输入光纤最大承受功率为 50 W ,据此估算产品整体承受最大功率 350 W ,但是均未提供产品热阻系数值。

为了匹配合束器参数,实验采用了 7 个最大输出功率 30 W 多模单发射体半导体激光器作为测试光源,工作波长为 915 nm ,输出光纤也是纤芯直径 $105\text{ }\mu\text{m}$ 、包层直径 $125\text{ }\mu\text{m}$ 的多模光纤,NA 值为 0.22。多模单发射体半导体激光器全部安装在水冷板上,输出光纤与测试合束器输入光纤直接熔接。测试合束器输出光纤输出到功率计进行测量。合束器的表面温度采用热电偶进行测量。整个实验装置如图 1 所示。

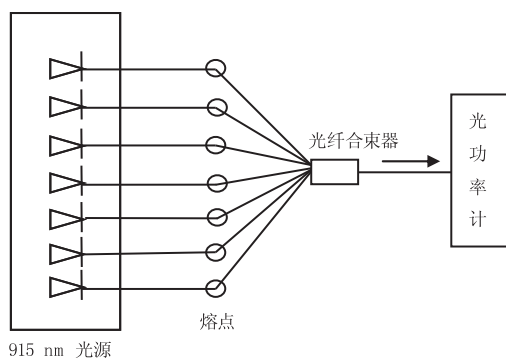


图1 高功率光纤合束器测试装置图

Fig.1 Measure setup for the high power fiber combiners

实验时,先行对 7 只单发射体半导体激光器加

载 $1\sim 10\text{ A}$ 驱动电流 $I(i=1,2\sim 10)$,并测量出每个整数安培驱动电流下 7 只单发射体半导体激光器的总输出功率,记为 $P_{in}(i=1,2\sim 10)$;该功率经过合束器之后会有部分损耗,剩余输出功率记为 $P_{out}(i=1,2\sim 10)$,由此可获得每个整数电流下合束器的损耗为:

$$\Delta P(i) = P_{in}(i) - P_{out}(i) \quad (2)$$

与此同时,采用热电偶测量 $1\sim 10\text{ A}$ 每个整数电流下光纤合束器的表面温度,记为 $T(i=1,2\sim 10)$,由此可获得测量合束器的热阻系数值为:

$$\eta = \frac{T(10) - T(1)}{\Delta P(10) - \Delta P(1)} \quad (3)$$

2.2 实验内容

2.2.1 被动制冷时合束器热阻系数的测量

首先,在上述实验装置中高功率光纤合束器放置在光学平台上进行固定,完全依靠被动散热。按照 2.1 节所述实验方法,测量了编号为 2181941 光纤合束器在 $1\sim 10\text{ A}$ 整数驱动电流 I 时的 $P_{in}(i)$, $P_{out}(i)$, $T(i)$ 值,并得到 $\Delta P(i)$,如表 1 所示。

表1 不同驱动电流时实验测量数据

I/A	P_{in}/W	P_{out}/W	$\Delta P/\text{W}$	$T/^{\circ}\text{C}$
1	12.5	11	1.5	21.7
2	33	29.4	3.6	22.6
3	54.3	47.7	6.6	23
4	78.5	70.6	7.9	23.5
5	100.2	88.2	12	24
6	116.6	102.6	14	24.7
7	143.3	126.4	16.9	25.8
8	163.4	143.7	19.7	26.6
9	182.6	160.7	21.9	27.3
10	196.7	173.2	23.5	28.5

根据公式(3),可得到编号为 2181941 光纤合束器的热阻系数值 η 为 $0.31\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。在直角坐标系中,以 $T(i,i=1,2\sim 10)$ 为纵坐标, $\Delta P(i)$ 为横坐标,得到光纤合束器损耗与表面温度关系曲线如图 2 所示。

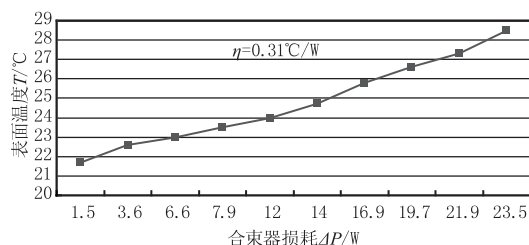


图2 高功率光纤合束器表面温度与损耗

Fig.2 Graph of the outer temperature and power loss of the high power fiber combiners

2.2.2 主动制冷对合束器热阻系数测量的影响

在高功率光纤合束器的实际应用中,考虑到散热需要一般都按照主动制冷方式对其进行安装。在主动制冷条件下,编号为2181941高功率光纤合束器安装于 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 恒温制冷片上。实验其他装置如图1所示,按照2.1节所述实验方法,测量了1~10 A整数驱动电流 I 时的 $P_{in}(i)$, $P_{out}(i)$, $T(i)$ 值,并得到 $\Delta P(i)$,如表2所示。

表2 主动制冷时不同驱动电流下实验测量数据

I/A	P_{in}/W	P_{out}/W	$\Delta P/\text{W}$	$T/^\circ\text{C}$
1	12.5	11.1	1.4	20.5
2	33	29.5	3.5	20.8
3	54.3	48.6	5.7	21
4	78.5	69.2	9.3	21.5
5	100.2	87.6	12.6	21.8
6	116.6	105.7	10.9	22.2
7	143.3	125	18.3	22.6
8	163.4	142.7	20.7	23
9	182.6	158.8	23.8	23.5
10	196.7	172.2	24.5	23.9

根据公式(3),可得到编号为2181941光纤合束器的热阻系数值 η 为 $0.15^\circ\text{C}/\text{W}$ 。在直角坐标系中,以 $T(i, i=1, 2 \sim 10)$ 为纵坐标, $\Delta P(i)$ 为横坐标,得到光纤合束器损耗与表面温度关系曲线如图3所示。

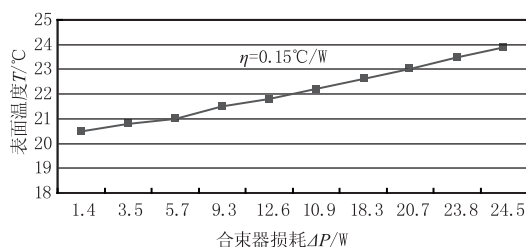


图3 主动制冷时光纤合束器表面温度与损耗

Fig. 3 Graph of the outer temperature and power loss of the fiber combiners with active heat sinking

2.2.3 背向反射光对合束器热阻系数测量的影响

在2.2.1小节中,光纤合束器输出光纤端面采用了垂直切割的方式,由于输出端面4%的非涅尔反射,必然有部分泵浦光重新回到合束器耦合区域。为了研究背向反射光对高功率光纤合束器热阻系数的影响,实验对光纤合束器输出端面采用了 8° 角切割处理以消除端面反射。按照2.1节所述实验方法,测量了编号为2181941光纤合束器在1~10 A整数驱动电流 I 时的 $P_{in}(i)$, $P_{out}(i)$, $T(i)$ 值,并得到 $\Delta P(i)$,如表3所示。

表3 不同驱动电流时实验测量数据

I/A	P_{in}/W	P_{out}/W	$\Delta P/\text{W}$	$T/^\circ\text{C}$
1	12.5	11.4	1.1	21.8
2	33	30	3	22.1
3	54.3	48.8	5.5	22.6
4	78.5	71.2	7.3	23.3
5	100.2	90.4	9.8	24
6	116.6	106	10.6	24.5
7	143.3	130.2	13.1	25.2
8	163.4	148.6	14.8	25.8
9	182.6	165.8	16.8	26.2
10	196.7	178.5	18.2	26.7

根据公式(3),可得到编号为2181941光纤合束器的热阻系数值 η 为 $0.29^\circ\text{C}/\text{W}$ 。与未消除背向反射光被动制冷时测量的光纤合束器热阻系数相比,消除背向反射光测量的热阻系数值更低。

3 结果分析

通过2.1节中实验装置和方法,实验分别获得了被动制冷、主动制冷和消除背向反射光条件下,高功率光纤合束器热阻系数的大小,研究结果对了解高功率光纤合束器的耐热性能具有重要意义。根据热阻系数的定义,热阻系数越大,表明相同功耗情况下引起的温度上升越高,合束器表面越热。因此,热阻系数定量地描述了一个光纤合束器的耐热特性。

与此同时,依据光纤合束器热阻系数的测量值,可以准确地计算和预测合束器的内部温度情况,这对高功率光纤激光器研究设计工作具有重要参考价值。根据有关研究,光纤合束器内部热阻系数是其表面热阻系数的两倍关系^[7]。以编号为2181941光纤合束器为例,其表面热阻系数为 $0.31^\circ\text{C}/\text{W}$,则内部热阻系数为 $0.62^\circ\text{C}/\text{W}$ 。根据式(1)可知,编号2181941光纤合束器表面温度、内部温度与功耗关系曲线如图4所示。

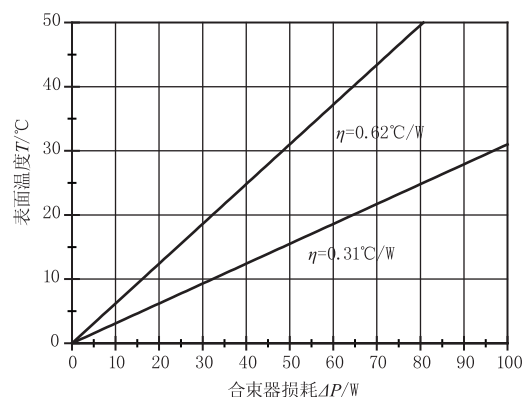


图4 高功率光纤合束器表面温度、内部温度与损耗关系

Fig. 4 Relationship of the high power combiners outer temperature and inner temperature with the loss

图4表明:在已知热阻系数的情况下,光纤合束器表面温度、内部温度随着功率损耗的增加单调递增,具有良好的线性关系。光纤合束器内部温度的上限值为70℃,如果环境温度为20℃,当光纤合束器功耗达到80W时,其内部温度上升50℃后将达到70℃的上限值,存在烧毁的危险。

在2.2.2小节中研究了主动制冷条件下光纤合束器热阻系数的测量。研究发现:主动制冷时光纤合束器的热阻系数降低到0.15℃/W,明显比被动制冷条件下的测量值低。分析认为:主动制冷条件下,光纤合束器热量被迅速散发,因此温度上升现象可以得到一定程度的改善,表2中 T 值的测量与此吻合。上述结果表明对于一个特定的光纤合束器,采用主动制冷安装可以提高产品的耐热性能。因此,在高功率光纤激光器结构设计时,光纤合束器建议采用水冷等控温方式安装。

根据2.2.3小节中研究结果,与未消除背向反射光被动制冷时测量的光纤合束器热阻系数相比,消除背向反射光测量的热阻系数值更低。这表明由于光纤端面反射造成的回光反向经过光纤合束器时产生损耗,并引起光纤合束器的温度上升。分析原因与光纤合束器的内部结构有很大的关系。 7×1 系列高功率多模光纤合束器的7根输入光纤经过拉锥后形成如图5所示截面,7根光纤纤芯外面是掺氟石英包层,当单根光纤内的返回光与上述光纤锥区耦合时,部分光会进入掺氟石英包层并从封装材料中泄露出去从而形成损耗,因此引起光纤合束器温度的上升,对于承受功率达到1000W以上的高功率光纤合束器,减少甚至消除后向传输光损耗是器件设计的关键。

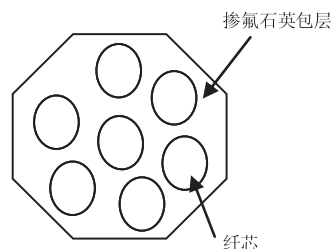


图5 7根输入光纤拉锥后形成的端面图

Fig.5 Taper picture of the seven input fibers

4 结论

本文利用自己搭建的光纤合束器热阻系数测试实验装置,分别在被动制冷、主动制冷和消除背向反射光条件下,测量了加拿大ITF公司系列高功率光纤

合束器的热阻系数,分别为0.32℃/W,0.15℃/W,0.29℃/W;利用测量的热阻系数值,可以准确计算出光纤合束器内部温度。通过比较被动制冷和主动制冷两种条件下光纤合束器热阻系数的差异,表明主动制冷可以明显降低光纤合束器热阻系数;研究了光纤合束器背向反射光对热阻系数的影响,发现消除背向反射光有利于降低热阻系数。研究结果对高功率光纤合束器结构设计及应用具有重要意义。

参考文献:

- [1] Y Jeong, J K Sahu, D N Payne, et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. Opt. Express, 2004, 12 (25): 6088 - 6092.
- [2] HUANG Bangcai, LIU Fengnian, XU Lingling, et al. Distributed side-pump double-clad fiber amplifier [J]. Laser & Infrared, 2008, 38(9): 879 - 882. (in Chinese)
黄榜才, 刘丰年, 徐玲玲, 等. 侧面分布式泵浦双包层脉冲光纤放大器 [J]. 激光与红外, 2008, 38(9): 879 - 882.
- [3] ZHANG Liming, ZHOU Shouheng, ZHAO Hong, et al. Study of 1kW all-fiber laser experience [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(10): 1127 - 1130. (in Chinese)
张利明, 周寿桓, 赵鸿, 等. 1kW 全光纤激光器实验研究 [J]. 激光与红外, 2012, 42(10): 1127 - 1130.
- [4] A Wetter, M Faucher, M Lovelady. Tapered fused-bundle splitter capable of 1kW CW operation [J]. Proceeding of SPIE, Fiber lasers IV: Technology, systems, and Applications, photonics west 2007, 6453: 645301.
- [5] HUANG Bangcai, ZHANG Peng, DUAN Yunfeng, et al. Side-pump fiber coupler for high power fiber amplifiers [J]. Chinese Journal of lasers, 2008, 35(s2): 155 - 157. (in Chinese)
黄榜才, 张鹏, 段云峰, 等. 一种用于高功率光纤放大器的侧面抽运耦合器 [J]. 中国激光, 2008, 35(s2): 155 - 157.
- [6] ZHANG Peng, DUAN Yunfeng, HUANG Bangcai, et al. Side-pump fiber coupler for the $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -codoped fiber amplifiers [C]. Nanjing: OFCIO, 2009: 395 - 397. (in Chinese)
张鹏, 段云峰, 黄榜才, 等. 用于双包层 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤放大器的侧面抽运耦合器 [C]. 南京: OFCIO, 2009: 395 - 397.
- [7] F Seguin, A Wetter, L Martineau, et al. Taper fused bundle coupler package for reliable high optical power dissipation [J]. SPIE, 2006, 6102: 61021N.