

高功率侧面抽运耦合器及其应用研究

谭祺瑞 葛廷武 董繁龙 张雪霞 王智勇

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

摘要 抽运耦合器是高功率光纤激光器的关键无源光器件,可以将多路抽运光高效率地耦合进双包层光纤中,从而为光纤激光器提供所需的抽运功率,所以抽运耦合器是研制高功率光纤激光器首先要解决的问题。采用氢氧焰熔接方法,研制了一种高功率侧面抽运耦合器,在最大抽运功率为100 W时,耦合效率94%,信号光插入损耗0.15 dB,附加损耗0.2 dB,主光纤分光比99%,方向性22.5 dB。利用该耦合器搭建了百瓦级光纤激光器,当总抽运功率为185 W时,在1080 nm处获得的激光输出为103 W,光-光转换效率为56%。该高功率侧面抽运耦合器可用于输出功率为百瓦级和千瓦级的高功率光纤激光器。

关键词 激光器; 耦合器; 侧面抽运; 高功率; 光纤激光器

中图分类号 TN245; TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0102004

High-Power Side-Pump Coupler and its Applications

Tan Qirui Ge Tingwu Dong Fanlong Zhang Xuexia Wang Zhiyong

Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract Pump coupler is the key passive optical component for the high power fiber laser. Multiple pump lights are efficiently coupled into the double-clad fiber, the required pump power can be provided for the realization of high power fiber laser. Pump coupler is the first problem to be solved for the research of the high power fiber laser. A high power side-pump coupler is developed with the method of hydrogen-oxygen flame fusion, when the maximum pump power is 100 W, the coupling efficiency is 94%, the signal insertion loss is 0.15 dB, the additional loss is 0.2 dB, the splitting ratio of main fiber is 99%, and the directionality is 22.5 dB. A hundred-watts fiber laser with an output power of 103 W at 1080 nm is built when the maximum pump power is 185 W. Optical-optical conversion efficiency is 56%. The high power side-pump coupler can be used as the pump coupler of the hundred-watts, and even kilowatt high power fiber lasers.

Key words lasers; coupler; side-pump; high-power; fiber lasers

OCIS codes 140.3325; 060.2340; 230.2285

1 引言

抽运耦合器是高功率光纤激光器的关键无源光器件,在不影响主光纤中信号光传输的前提下,可以将多路由半导体激光器(LD)产生的大功率抽运光耦合进双包层光纤中,从而为高功率光纤激光器提供工作所需的抽运光功率^[1-3]。所以抽运耦合器是研制全光纤结构高功率光纤激光器首先要解决的一个问题,高功率抽运耦合器的研制已经成为该领域的研究热点。2008年清华大学巩马理等^[4]提出了采用CO₂激光器制作熔接型侧面耦合器的方法,并用该耦合器耦合高功率半导体激光器产生的抽运光,获得的耦合功率达到7.23 W,耦合效率优于70.5%。2010年德国耶拿大学和夫琅和费研究所Jauregui等^[5]研制了一种7路侧面抽

收稿日期: 2014-07-11; 收到修改稿日期: 2014-08-14

基金项目: 工业用高功率全光纤激光器的开发(2010ZX04013-052)

作者简介: 谭祺瑞(1985—),男,博士研究生,主要从事高功率光纤激光器方面的研究。E-mail: tanqirui@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 王智勇(1970—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事高功率光纤激光器、大功率半导体激光器等方面的研究。E-mail: zywang@bjut.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

运耦合器,最大耦合进波长 976 nm 的抽运光 86 W,各路耦合效率均达到了 80%以上。2011 年中国电子科技集团公司第四十六研究所李瑞辰等^[6]研制了一种熔锥型侧面抽运耦合器,实现了 70%的耦合效率,信号光通过率为 98%,信号输入与抽运输入的隔离度大于 50 dB,抽运输入对输出端反向传输光的隔离度为 27 dB。2012 年德国汉诺威激光中心的 Theeg 等^[7]将 6 路无芯光纤与双包层光纤侧面熔接^[7],通过控制无芯光纤与双包层光纤的融合深度及无芯光纤在耦合区的倾斜角度来获得最佳耦合效率。他们用此方法制成(6+1)×1 耦合器,再将抽运光纤与 6 路无芯光纤熔接,耦合效率在 89%~95%之间,可最大耦合进 400 W 抽运光,信号光插入损耗小于 15 dB。从以上研究状况可以看出,研究人员对高功率抽运耦合器的研制取得了一定的成果,但目前研制出来的耦合器难以满足在高效率耦合大功率抽运光的同时保持低信号光插入损耗、低附加损耗及良好的稳定性,这就限制了高功率光纤激光器的输出功率。

本文采用氢氧焰熔接的方法,研制了一种高功率侧面抽运耦合器,并对其最大抽运功率、耦合效率、信号光插入损耗、附加损耗、主光纤分光比、方向性和稳定性等参数进行了测试,最后采用腔内抽运结构搭建了百瓦级光纤激光器。

2 实验装置

根据高功率侧面抽运耦合器的结构特点,采用如图 1 所示的实验装置。热源采用氢氧焰,燃烧产物易挥发,不会引入影响抽运光耦合的杂质。另外氢氧焰温度高,火焰大小可控制,满足不同直径光纤之间熔接对温度的需求。侧面熔接可在保证抽运光纤高强度地熔接到主光纤侧壁上的同时保证主光纤形状不变,不影响主光纤信号光的传输。电脑可控制 4 个夹具和氢氧焰火头的位置,通过控制夹具位置可精确调节抽运光纤与主光纤之间的距离,通过调节氢氧焰火头的大小和位置可控制两根光纤的熔融深度和耦合区长度,从而实现良好的侧面熔接效果。半导体激光器和功率计可以对耦合效率实现在线监测。表 1 是实验所选用的抽运光纤和主光纤参数。

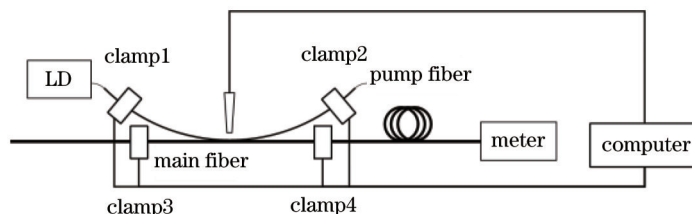


图 1 实验装置图

Fig.1 Experimental setup

表 1 光纤参数

Table 1 Fiber parameters

	Pump fiber	Main fiber
Core diameter / μm	105	20
Cladding diameter / μm	125	400
Coating diameter / μm	250	550
NA	0.22	0.06/0.46

3 参数测试

图 2 是测试高功率侧面抽运耦合器各项参数的装置图。图 2(a)用于测试耦合效率、附加损耗、主光纤分光比和方向性,采用 105/125 μm 光纤输出的半导体激光器作为抽运源,其最大输出功率为 100 W,中心波长为 976 nm,图 3 是该半导体激光器的光谱图。图 2(b)用于测试信号光插入损耗,其中测试光源的信号光中心波长为 1080 nm,最大输出功率为 10 W。在抽运耦合器双包层光纤的输出端,制作包层光剥离器,剥除纤芯泄漏到内包层中的信号光,同时为了保证测试结果的准确性,避免光纤端面的菲涅耳反射影响,将其输出端切割 8°角。

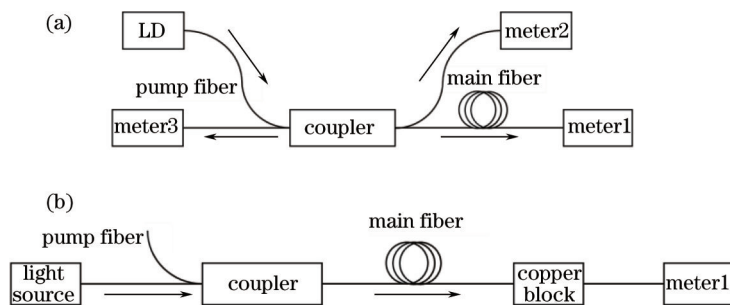


图2 光纤耦合器参数测试。(a)耦合效率,附加损耗,主光纤分光比和方向性测试示意图;(b)信号光插入损耗测试示意图

Fig.2 Test of fiber coupler. (a) Test schematic of coupling efficiency, additional loss, splitting ratio of main fiber and directionality; (b) test schematic of signal insertion loss

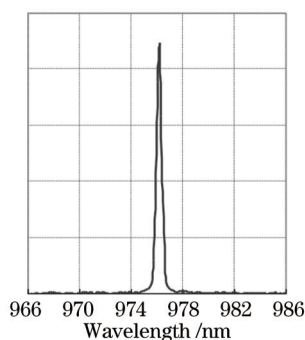


图3 100 W 半导体激光器光谱图

Fig.3 Spectrum of 100 W semiconductor laser

3.1 最大抽运功率、耦合效率、稳定性测试

耦合器的耦合效率和稳定性测试如图4所示,从图4(a)的曲线斜率均值可知耦合效率在94%左右。随着输入功率的增加,耦合器输出功率近似线性增加,说明功率的变化对耦合效率没有影响。图4(b)是抽运耦合器在输入100 W抽运光时,工作60 min的输出功率测试图,从图中可知输出功率变化范围小于0.3 W。测试过程中耦合器没有封装,说明耦合器在自然风冷环境中可在100 W抽运光下稳定工作,耦合区没有因积累大量的热而导致耦合效率下降或烧毁。

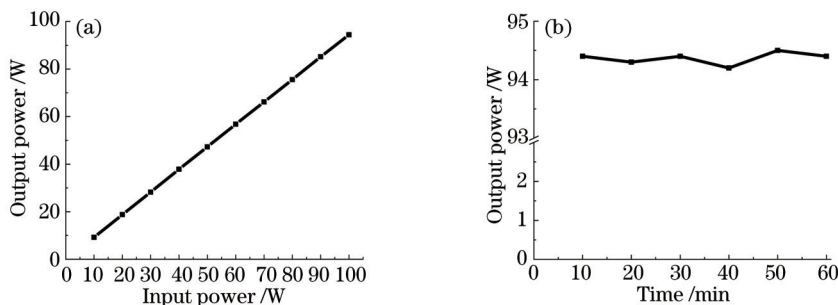


图4 (a) 耦合效率;(b) 稳定性测试

Fig.4 (a) Test of coupling efficiency and (b) stability

3.2 附加损耗、方向性、主光纤分光比测试

附加损耗是描述耦合器两个输出端口的光功率总和相对于输入抽运光功率的减小值,在图2(a)中令输入功率为 P_{in} ,功率计1的示数为 P_{out1} ,功率计2的示数为 P_{out2} ,功率计3的示数为 P_{out3} ,则附加损耗的计算式为

$$L_{\text{excess}} = -10 \lg \frac{P_{\text{out1}} + P_{\text{out2}}}{P_{\text{in}}} \quad (1)$$

当输入抽运光功率为100 W时,功率计1示数为94.4 W,功率计2示数为1.01 W,附加损耗0.2 dB,主光

纤分光比 99%。方向性是描述耦合器抽运光定向传输特性的参数,其定义为非输入抽运光一端输出光功率占输入抽运光功率的比值,计算式如下:

$$D = -10 \lg \frac{P_{out3}}{P_{in}} \quad (2)$$

在图 2(a)中功率计 3 示数为 0.56 W,方向性为 22.5 dB。从附加损耗和方向性两参数可以看出在耦合区泄漏到空气中的抽运光占总抽运光功率的 4%,若在耦合区外涂覆低折胶作为外包层可减少抽运光的泄漏。

3.3 信号光插入损耗测试

如图 2(b)所示,光源信号光功率为 10 W,经过耦合器后,双包层光纤信号光功率为 9.74 W,信号光插入损耗为 0.11 dB,说明双包层光纤的形变较小,抽运光纤和双包层光纤的熔接深度适宜。图 5 是信号光稳定性测试,可以看出 60 min 内信号光功率变化范围小于 0.02 W,说明抽运耦合器对信号光的通过率保持稳定。

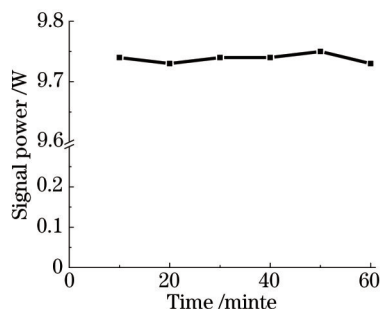


图 5 信号光稳定性测试

Fig.5 Test of signal light stability

4 百瓦光纤激光器

为了测试抽运耦合器在高功率光纤激光器中的工作情况,采用腔内抽运方式搭建了百瓦级光纤激光器,如图 6 所示。抽运源为 3 个功率 60 W、中心波长 976 nm、105/125 μm 光纤输出的半导体激光器。耦合器 1 为耦合效率 94%、信号光插入损耗 0.15 dB,耦合器 2 为耦合效率 92%、信号光插入损耗 0.15 dB,耦合器 3 为耦合效率 93%、信号光插入损耗 0.2 dB,其中耦合器 1 和 2 正向抽运,耦合器 3 反向抽运。抽运光经 3 个耦合器对长度为 20 m、纤芯包层为 20/400 的双包层掺镱光纤进行抽运,该增益光纤的抽运吸收系数为 1.26 dB/m。采用一对光纤光栅作为谐振腔的反射镜,其中全反光栅 1 对 1080 nm 波长激光的反射率为 98%,透射光栅 2 对 1080 nm 波长激光的反射率为 10%。

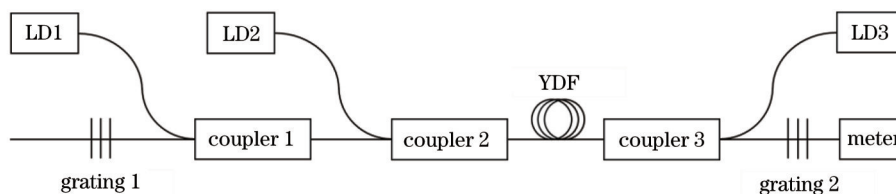


图 6 100 W 光纤激光器

Fig.6 Schematic of 100 W fiber laser

图 7 是光纤激光器输出功率与抽运功率的关系图和输出激光的光谱图,总抽运功率为 185 W,在 1080 nm 处获得的激光输出功率为 103 W,光-光转换效率为 56%,在保持信号光插入损耗较小的前提下,提高抽运耦合器的耦合效率,光-光转换效率可得到进一步的提升。另外,通过增加抽运耦合器的数量,在保持单路抽运功率不变的情况下可以提高总抽运功率,进而可以实现千瓦级光纤激光器。

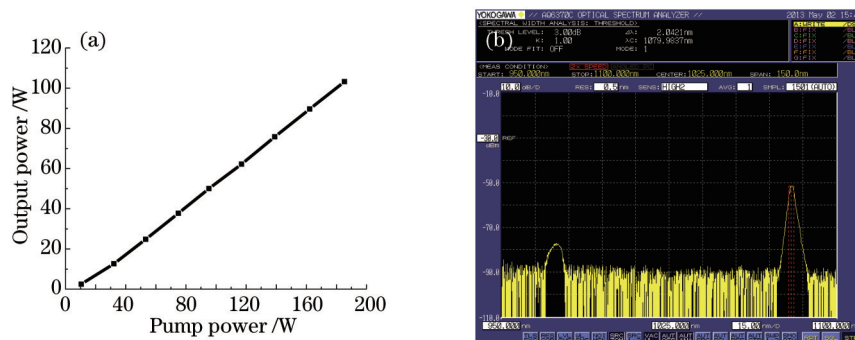


图 7 (a)输出功率与抽运功率关系和(b)光谱图

Fig.7 (a) Output power versus pump power; (b) spectrum

5 结 论

采用氢氧焰侧面熔接的方法研制了一种高功率侧面抽运耦合器,其最大耦合抽运光功率为 100 W,耦合效率为 94%,信号光插入损耗 0.15 dB,附加损耗 0.2 dB,主光纤分光比 99%,方向性 22.5 dB。在以后实验过程中,通过改进工艺可进一步减小信号光插入损耗,并控制熔接区抽运光纤和双包层光纤的熔接深度及耦合区长度,进一步提高耦合效率。为了测试所研制的抽运耦合器在光纤激光器中的工作情况,最后采用腔内抽运方式搭建了百瓦级光纤激光器,总抽运功率为 185 W,在 1080 nm 处获得的激光输出功率为 103 W,光-光转换效率为 56%。说明所研制的高功率侧面抽运耦合器可用于百瓦级和千瓦级高功率光纤激光器。

参 考 文 献

- 1 Duan Kailiang, Zhao Baoyin, Zhao Wei, *et al.*. 1000 W all fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(12): 3219.
段开棕, 赵保银, 赵 卫, 等. 1000 W 全光纤激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3219.
- 2 Yan Ping, Xiao Qirong, Fu Chen, *et al.*. 1.6 kW Yb-doped all-fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0416001.
闫 平, 肖起榕, 付 晨, 等. 1.6 kW 全光纤掺镱激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0416001.
- 3 Dai Shoujun, He Bing, Zhou Jun, *et al.*. 1.5 kW near single-mode all-fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0702001.
代守军, 何 兵, 周 军, 等. 1.5 kW 近单模全光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0702001.
- 4 Ou Pan, Yan Ping, Gong Mali, *et al.*. Fused side-coupler for double-clad fiber lasers[J]. Laser Technology, 2008, 32(1): 8-10.
欧 攀, 闫 平, 巩马理, 等. 双包层光纤激光器的熔接型侧面耦合器[J]. 激光技术, 2008, 32(1): 8-10.
- 5 Cesar Jauregui, Steffen Bohme, Georgios Weniadiadis, *et al.*. Side-pump combiner for all-fiber monolithic fiber lasers and amplifiers [J]. J Opt Soc Am B, 2010, 27(5): 1011-1015.
- 6 Li Ruichen, Zhang Peng, Pang Lu, *et al.*. Fused biconical taper side-pumped fiber coupler[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(3): 522-525.
李瑞辰, 张 鹏, 庞 璐, 等. 熔锥型侧面抽运耦合器的研究[J]. 应用光学, 2011, 32(3): 522-525.
- 7 Thomas Theeg, Hakan Sayinc, Jörg Neumann, *et al.*. Pump and signal combiner for bi-directional pumping of all-fiber lasers and amplifiers[J]. Optics Express, 2012, 20(27): 28125-28140.

栏目编辑: 张 雁