

高功率全光纤(2+1)×1侧面抽运合束器的研制

雷成敏¹, 陈子伦^{1,2,3*}, 冷进勇^{1,2,3}, 谷炎然^{1,2,3}, 侯静^{1,2,3}

¹国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073;

²高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410073;

³大功率光纤激光湖南省协同创新中心, 湖南长沙 410073

摘要 基于拉锥-熔合法研制了一种高功率全光纤(2+1)×1侧面抽运合束器。利用仿真软件建立理论模型, 计算了合束器耦合效率, 并制备出这种侧面抽运合束器。经测试, 该合束器在抽运功率为600 W时, 两抽运臂的耦合效率分别为98.2%和96.3%, 信号光插入损耗约为0.11 dB。利用该合束器搭建了千瓦级光纤激光放大器, 双向抽运光功率达到1.8 kW时, 在1080 nm处获得的激光输出功率为1.426 kW。

关键词 激光物理; 光纤合束器; 光纤激光器; 侧面抽运; 光纤拉锥

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0501002

Development of High Power All-Fiber (2+1)×1 Side-Pumped Combiner

Lei Chengmin¹, Chen Zilun^{1,2,3}, Leng Jinyong^{1,2,3}, Gu Yanran^{1,2,3}, Hou Jing^{1,2,3}

¹College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

²Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

³Hunan Provincial Collaborative Innovation Center of High Power Fiber Laser, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract A high power all-fiber (2+1)×1 side-pumped combiner based on tapered-fused method is developed. The theoretical model of the combiner is set up through simulation software, and the coupling efficiency of combiner is calculated. A side-pumped combiner is fabricated. The coupling efficiencies are 98.2% and 96.3% for two pump arms respectively at the pump power of 600 W, and the insertion loss of signal light is about 0.11 dB. The combiner is applied to construct a kilowatt-class fiber laser amplifier. The output power is 1.426 kW at 1080 nm, when the power of bidirectional pumping light reaches 1.8 kW.

Key words laser physics; fiber combiner; fiber laser; side pumping; fiber taper

OCIS codes 060.2340; 060.1810; 060.3510

1 引言

抽运合束器是全光纤结构光纤激光器的核心元件之一。目前, 最成熟的抽运/信号合束技术是熔融拉锥光纤束技术^[1], 这是一种端面抽运技术。这种技术结构简单、耦合效率高、便于封装、易于实现, 在高功率光纤激光器系统中得到广泛的应用, 但该技术也存在明显的缺点: 1) 信号光纤纤芯的模场直径与后续熔接的输出光纤纤芯模场直径存在巨大差异; 2) 灵活性差, 很难实现相同光纤的高功率放大器的级联放大; 3) 难

收稿日期: 2016-12-09; 收到修改稿日期: 2017-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(61370045)

作者简介: 雷成敏(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事大功率光纤激光器件方面的研究。

E-mail: leichengmin23@126.com

导师简介: 侯静(1975—), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事光纤激光与光子晶体光纤方面的研究。

E-mail: houjing25@sina.com

*通信联系人。E-mail: zilun2003@hotmail.com

以用于后向抽运结构。与端面抽运技术不同,侧面抽运技术能很好地解决以上问题。侧面抽运技术是指将抽运光从双包层信号光纤的侧面耦合到双包层信号光纤的内包层,它可以直接在信号光纤的侧面上进行处理,不占用信号光纤的两端,同时信号光纤不被截断,信号光通过率高。2009年12月,Jauregui C等^[2]设计了一种含有7根抽运光纤的侧面抽运合束器,可以承受86 W的抽运功率,耦合效率为80%。2012年12月,Theeg T等^[3]研制了一种基于拉锥抽运光纤的侧面抽运合束器,基于该合束器搭建并测试了激光器和放大器^[4],合束器能承受的最大抽运功率达到440 W。清华大学的Xiao Q R等^[5]在2010年9月实现的全光纤侧泵耦合器的耦合效率和耦合功率分别达到90.1%和144.7 W,基于该耦合器搭建的激光器的输出功率和斜率效率分别为102.5 W和77.1%。2013年8月该研究小组实现了侧面抽运信号合束器^[6],抽运耦合效率和信号传输效率都超过了96%,抽运功率达到了398 W。2015年4月,该研究小组还报道了一种 $(2+1)\times 1$ 侧面抽运信号合束器^[7],可承受抽运功率达1160 W,耦合效率达到98.6%。2015年12月,北京工业大学的Tan Q R等^[8-9]报道了一种适用于高功率光纤激光器的级联侧面抽运合束器,单臂耦合效率为98.5%,级联5个抽运点的总耦合效率为97.5%,利用该合束器,采用双向抽运方式,搭建了输出功率为780 W的连续光振荡器,验证了侧面抽运合束器用于多点抽运的可能性。本文基于拉锥-熔合法,研制了一种适用于千瓦级高功率光纤激光放大器的 $(2+1)\times 1$ 侧面抽运合束器,对其耦合效率、信号光通过率、反向隔离度等参数进行了测试,并采用双向抽运结构搭建了千瓦级光纤激光放大器。

2 理论仿真

$(2+1)\times 1$ 结构侧面抽运合束器的理论模型及相关参数如图1所示,该合束器包括2根抽运光纤($220\ \mu\text{m}/242\ \mu\text{m}$, $NA=0.22$)和1根信号光纤($20\ \mu\text{m}/400\ \mu\text{m}$,包层 NA 为 $0.06/0.46$)。抽运光纤过渡区和锥腰区长度 L_{taper} 和 L_{waist} 分别设定为 $0.9\ \text{cm}$ 和 $0.1\ \text{cm}$, D_{waist} 为锥腰直径。经拉锥处理的抽运光纤的过渡区和锥腰区与信号光纤表面紧密贴合并经高温加热后熔合,因此有一定的嵌入深度,假设嵌入深度在拉锥抽运光纤的过渡区沿 $\delta\cdot L_{\text{taper}}$ 逐渐增大并在锥腰区达到最大值 h 。数值仿真通过 Rsoft 软件完成。图2给出了 $h=2\ \mu\text{m}$ 和 $0\ \mu\text{m}$ 时总抽运耦合效率随 D_{waist} 的变化情况($\delta=0.15$),其中两抽运臂的注入功率各占50%,入射模场为 LP_{87} 模。在不考虑 h 时(即 $h=0$ 时),合束器的耦合效率较低,而当 $h=2\ \mu\text{m}$ 时,耦合效率最高可达98.2%($D_{\text{waist}}=20\ \mu\text{m}$)。因此,在较短的拉锥长度内,嵌入深度对合束器耦合效率的影响较大。 δ 和 h 相同的情况下,都有一个最佳的 D_{waist} 使得耦合效率最高,而不是 D_{waist} 越大(或越小)越有利于耦合效率的提高。

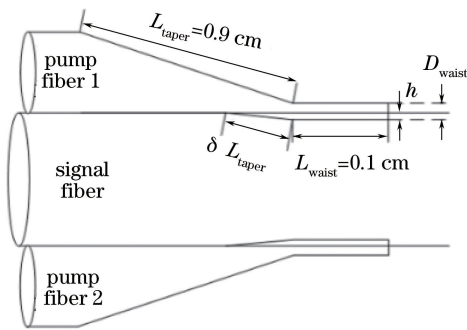


图1 侧面抽运合束器的仿真模型
Fig. 1 Simulation model of the side-pumped combiner

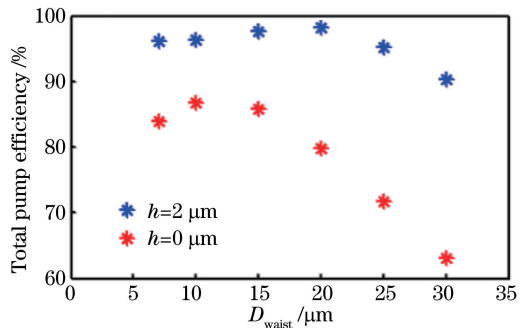


图2 合束器耦合效率随锥腰直径的变化情况
Fig. 2 Change of coupling efficiency of combiner with taper waist diameter

3 器件制备与测试

制作平台以氢氧焰为加热源,加热的温度可以通过氢气和氧气的流量来控制。制作合束器的过程共分三步:1)抽运光纤预处理。首先利用实验室的光纤拉锥平台,对两根抽运光纤($220\ \mu\text{m}/242\ \mu\text{m}$, $NA=0.22$)分别进行拉锥处理,拉锥后锥腰直径约为 $20\ \mu\text{m}$,过渡区长度约为 $0.9\ \text{cm}$,锥腰区长度约为 $0.1\ \text{cm}$ 。2)抽运光纤与信号光纤的贴合。在特制的平台上,剥除涂覆层的双包层信号光纤($20\ \mu\text{m}/400\ \mu\text{m}$, NA 为

0.06/0.46)与拉锥抽运光纤都被特制的夹具固定,使得抽运光纤能够舒展地贴合在信号光纤表面并保证信号光纤不变形。3) 信号光纤与抽运光纤的侧面熔合。熔合平台的火焰也采用氢氧焰,氢氧焰温度的高低和熔合时间的长短可以控制抽运光纤与信号光纤的熔合深度。所制作的抽运合束器显微镜视图如图 3 所示,该合束器的熔合时间约为 60 s,图中 I 区域为熔合区域,II 区域为抽运光纤的尾端,在熔合完成后可取离合束器,封装时不保留。



图 3 侧面抽运合束器的显微镜图

Fig. 3 Microscope image of the side-pumped combiner

建立平台对侧面抽运合束器的基本性能进行实验测试,如图 4 所示,其中 LD 为半导体激光器抽运源,CLS 为包层光滤除器。图 4(a)用于测试合束器的抽运耦合效率,图 4(b)用于测试合束器的信号光插入损耗。实验使用最大输出功率为 600 W 的 LD 作为抽运源,中心波长为 976 nm,采用 220 μm /242 μm ($\text{NA}=0.22$)的抽运光纤输出。激光振荡器的输出波长为 1080 nm,最大输出功率为 85.4 W。如图 4(b)所示,输出端做包层光滤除处理,以滤除由于纤芯泄漏到内包层的信号光。图 5(a)给出了合束器的输出功率随两个抽运臂的抽运功率变化曲线,经测量得到两抽运臂的耦合效率分别为 98.2%和 96.3%。1080 nm 信号光经过合束器后,产生的插入损耗随信号功率的变化曲线如图 5(b)所示,插入损耗在不同信号功率注入时呈现不同的值,但波动较小,可认为是测量误差引起的,得到的平均损耗约为 0.11 dB。

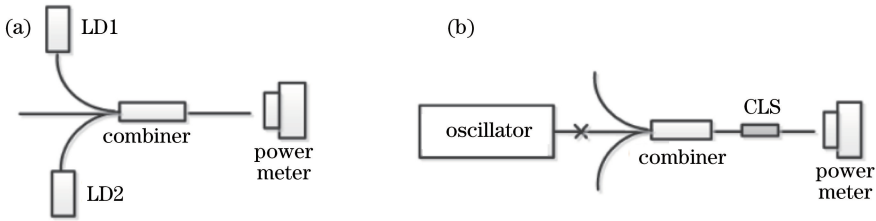


图 4 侧面抽运合束器测试平台。(a)抽运耦合效率;(b)插入损耗

Fig. 4 Testing system of the side-pumped combiner. (a) Pump coupling efficiency; (b) insertion loss

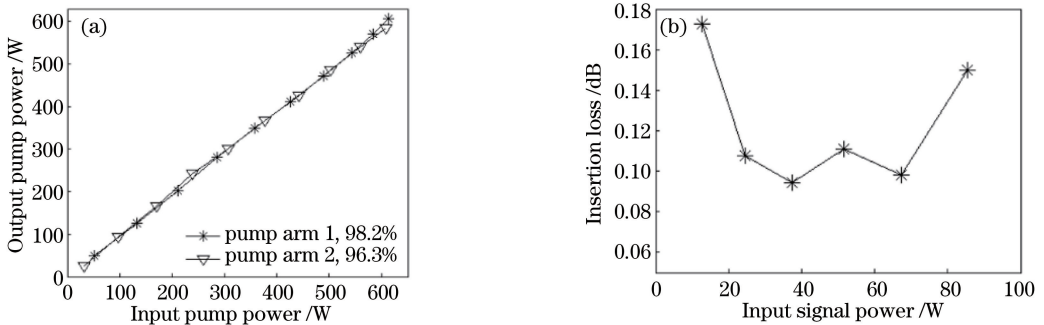


图 5 侧面抽运合束器的性能。(a)抽运耦合效率;(b)插入损耗

Fig. 5 Performance of the side-pumped combiner. (a) Pump coupling efficiency; (b) insertion loss

4 高功率光纤激光放大器

将制备的合束器应用于高功率光纤激光放大器中,如图 6 所示,采用双向抽运结构。激光振荡器的输出光波长为 1080 nm,输出功率为 64 W。放大器中采用的增益光纤长度为 16 m,纤芯直径为 20 μm ($\text{NA} =$

0.06),内包层直径为 $400\ \mu\text{m}$ ($NA=0.46$)。两个抽运源的最大输出功率均为 $900\ \text{W}$,输出光纤的纤芯/包层直径为 $200\ \mu\text{m}/360\ \mu\text{m}$ ($NA=0.22$)。侧面抽运合束器的最大优势是反向隔离度高,可以应用于后向抽运结构,很好地阻隔高功率包层激光反向耦合进入抽运源避免对其造成损伤。因此,将两个抽运源分别与合束器的其中一根抽运光纤熔接,另外一根抽运光纤切平角作为测试端(图6中A、B),用于监测返回到合束器抽运光纤的回光功率,以验证合束器是否能够很好地阻隔反向激光。不同的是,从A点输出的光主要是反向传输的掺镱光纤(YDF)未吸收完的抽运光,而B点输出的光不仅包括正向传输的残余抽运光,也包括由于合束器本身的插入损耗以及熔接误差等原因而进入抽运臂的信号激光。

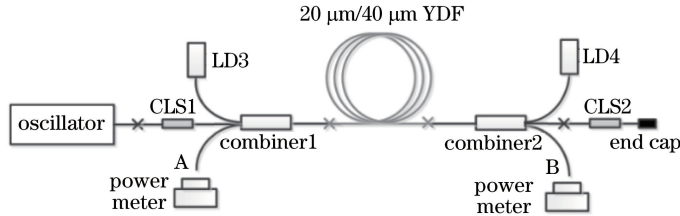


图6 千瓦级高功率光纤激光放大器系统实验装置

Fig. 6 Experimental setup of the kilowatt-class high power fiber laser amplifier system

经测量,当没有抽运光注入只有 $64\ \text{W}$ 种子光注入时,B点监测功率为 $21.8\ \text{mW}$,说明合束器对信号激光的隔离度达到 $34.7\ \text{dB}$ 。也就是说,即使信号光功率被放大到千瓦量级,泄漏到抽运臂的信号光也不会对抽运源造成损伤。因此,B点的监测功率主要还是来自反向耦合进入抽运臂的残留抽运光。图7给出了A、B两点的监测功率随输入抽运功率的变化情况,实验过程中两LD的输出功率同步增加,始终保持同一水平。监测功率呈现先增长后降低的趋势,这是由于LD在低驱动电流下,波长不稳定,未吸收的残留抽运光较多导致的。在抽运功率达到最大的 $1800\ \text{W}$ 时,LD已经处于稳波长状态,A、B点的监测功率只有 $1\ \text{W}$ 左右,说明合束器的反向耦合效率都较低,在高功率状态下可以有效阻隔反向抽运光。图8给出了输出信号光功率随输入抽运光功率变化的曲线。放大器在最大抽运功率 $1800\ \text{W}$ 时,获得了 $1426\ \text{W}$ 的 $1080\ \text{nm}$ 激光输出功率,对应的斜率效率为 75.7% 。斜率效率不高是因为抽运源可输出 $900\ \text{W}$ 高功率,其输出抽运光的 NA 比耦合效率测试所用的抽运源的 NA 更大,使得应用到光纤激光器中的合束器抽运耦合效率比测试时低^[3]。

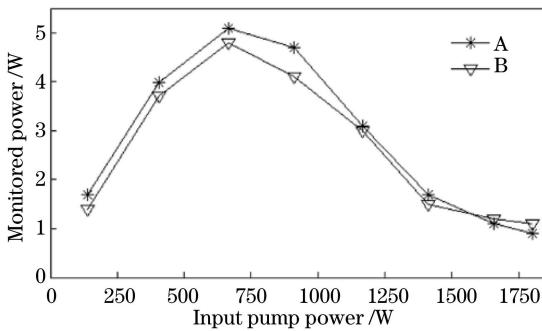


图7 A、B点监测功率

Fig. 7 Monitored power of A and B

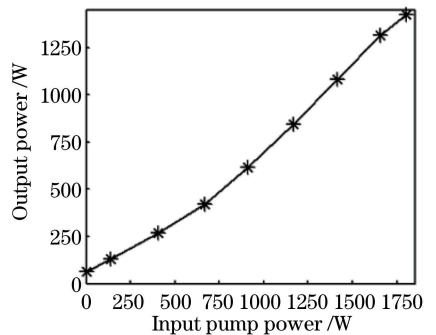


图8 信号光输出功率情况

Fig. 8 Characteristic of the signal light output power

5 结 论

本文介绍了一种适用于高功率光纤激光放大器的全光纤 $(2+1)\times 1$ 侧面抽运合束器,建立合束器模型,除抽运光纤拉锥参数外引入嵌入深度,对合束器耦合效率进行了计算。利用拉锥熔合法成功制作了一种合束器,两抽运臂的耦合效率分别为 98.2% 和 96.3% ,平均信号光插入损耗约为 $0.11\ \text{dB}$ 。采用双向抽运方式,利用制备的合束器搭建了千瓦级高功率光纤激光放大器系统,当放大器抽运功率为 $1800\ \text{W}$ 时,在 $1080\ \text{nm}$ 处获得的激光输出功率为 $1426\ \text{W}$,斜率效率为 75.7% 。实验结果表明,合束器可对反向抽运光进行有效隔离,说明所研制的侧面抽运合束器可用于高功率双向抽运或后向抽运光纤激光系统,为光纤激光器光束质量

和输出功率的同步提升提供重要的技术支撑和保障。

致谢 感谢中国电子科技集团四十六研究所提供大模场面积掺镱光纤,以及对本次实验的帮助和支持。

参 考 文 献

- [1] Digiovanni D J, Stentz A J. Tapered fiber bundles for coupling light into and out of cladding-pumped fiber devices: U. S. , 5864644[P]. 1999-01-26.
 - [2] Jauregui C, Böhme S, Wenetiadis G, *et al.* Side-pump combiner for all-fiber monolithic fiber lasers and amplifiers[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(5): 1011-1015.
 - [3] Theeg T, Sayinc H, Neumann J, *et al.* Pump and signal combiner for bi-directional pumping of all-fiber lasers and amplifiers[J]. Optics Express, 2012, 20(27): 28125-28141.
 - [4] Theeg T, Sayinc H, Neumann J, *et al.* All-fiber counter-propagation pumped single frequency amplifier stage with 300-W output power[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(20): 1864-1867.
 - [5] Xiao Q R, Yan P, Yin S, *et al.* 100 W ytterbium-doped monolithic fiber laser with fused angle-polished side-pumping configuration[J]. Laser Physics Letters. 2011, 8(2): 125-129.
 - [6] Xiao Q R, Yan P, Ren H C, *et al.* A side-pump coupler with refractive index valley configuration for fiber lasers and amplifiers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(16): 2715-2722.
 - [7] Chen X, Xiao Q R, Jin G Y, *et al.* High coupling efficiency and low signal light loss $(2+1)\times 1$ coupler[J]. Chinese Physics B, 2015, 24(6): 064208.
 - [8] Tan Q R, Ge T W, Zhang X X, *et al.* Cascaded combiners for a high power CW fiber laser[J]. Laser Physics, 2016, 26(2): 025102.
 - [9] Tan Qirui, Ge Tingwu, Dong Fanlong, *et al.* High-power side-pump coupler and its applications[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0102004.
- 谭祺瑞, 葛廷武, 董繁龙, 等. 高功率侧面抽运耦合器及其应用研究[J]. 中国激光. 2015, 42(1): 0102004.