

doi: 10.3788/gzxb20154406.0606004

高功率千瓦级 $(N+1) \times 1$ 光纤级联泵浦耦合器

陈霄¹, 肖起榕², 金光勇¹, 闫平², 巩马理²

(1 长春理工大学 光电信息科学与技术系, 长春 130022)

(2 清华大学 精密仪器系, 北京 100084)

摘 要: 分析了泵浦光纤不同锥区长度对 $(1+1) \times 1$ 耦合器效率的影响, 相同锥区长度不同泵浦臂数量对 $(1+1) \times 1$ 耦合器与 $(2+1) \times 1$ 耦合器效率的影响, 结果表明泵浦光纤锥型区域越长, 通过泵浦光纤进入信号光纤的泵浦光越多, 泵浦耦合器的耦合效率越高和相同锥区长度下, 泵浦臂数量越多, 泵浦耦合器耦合效率越低. 根据分析结果制作了 $(1+1) \times 1$ 耦合器与 $(2+1) \times 1$ 耦合器, 通过两个 $(N+1) \times 1$ 耦合器级联方式形成级联泵浦耦合器. 测试了由两个 $(1+1) \times 1$ 耦合器组成的级联泵浦耦合器, 在总注入泵浦功率 602 W 的情况下输出泵浦功率 564 W, 级联泵浦耦合效率高达 93.6%. 由两个 $(2+1) \times 1$ 耦合器组成的级联泵浦耦合器, 在总注入泵浦功率 1 210 W 的情况下输出泵浦功率 1 120 W, 级联泵浦耦合效率高达 92.5%, 实现了千瓦级泵浦功率输出, 且两种级联泵浦耦合器信号光损耗均小于 0.4%. 利用此方法将耦合器形成级联结构可有效提高光纤激光器系统泵浦输出能力, 实现千瓦级高功率输出.

关键词: 光纤激光器; 泵浦耦合器; 激光二极管泵浦; 光纤激光器部件; 激光

中图分类号:

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)06-0606004-5

High Output Power kW Class of Pump Light by $(N+1) \times 1$ Fiber Couplers in a Cascaded Structure

CHEN Xiao¹, XIAO Qi-rong², JIN Guang-yong¹, YAN Ping², GONG Ma-li²

(1 Province Key Laboratory of Solid Laser Technology and Application, College of Science Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 Center for Photonics and Electronics, State Key Laboratory of Tribology, Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China.)

Abstract: The impact of $(1+1) \times 1$ coupler pump arm numbers on the pump coupling efficiency was numerically studied. It is shown that pump coupling efficiency decreases with more pump arms built on the coupler, yet in a slightly decreasing manner. The coupling efficiencies of $(1+1) \times 1$ and $(2+1) \times 1$ couplers were studied and compared under the same tapered length and the same input mode field, it implies that large number of pump arms could have adverse impact on the total coupling efficiency. According to the simulation results, two side-pumped $(1+1) \times 1$ couplers were made and the two signal fibers were spliced to form a cascaded structure. A total output power of this cascaded-structured pump coupler was about 564 W, corresponding to a coupling efficiency as high as 93.6%. And, two side-pumped $(2+1) \times 1$ couplers were made respectively and the two signal fibers were spliced to form a cascaded structure. A total output power of this cascaded-structured pump coupler was about 1 120 W, corresponding to a coupling efficiency as high as 92.5%. The loss of $(N+1) \times 1$ cascaded structure coupler signal light were less than 0.4%. Achieved the kW class output power of pump light.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61307057)和清华大学激光与光子技术研究室基金(No. SKLT12B08)资助

第一作者: 陈霄(1989—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光纤激光泵浦耦合技术. Email: evenandex@163.com

导师(通讯作者): 巩马理(1959—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为新型激光器技术. Email: gongml@mail. tsinghua. edu. cn

收稿日期: 2015-01-27; 录用日期: 2015-04-30

<http://www.photon.ac.cn>

Key words: Fiber optics; Laser coupling; Diode-pumped; Fiber optics components; Laser

OCIS Codes: 060.0060; 140.3325; 140.3480; 060.2430; 140.3510

0 引言

随着高亮度半导体泵浦源、双包层掺杂有源光纤等技术创新,拥有全光纤结构的高功率激光器、放大器研究有了飞速提升.高功率全光纤结构光纤激光器、放大器设备已逐步替代传统机械设备在工业生产活动中发挥重要作用.

在光纤激光器系统中,泵浦耦合器是连接泵浦源与光纤激光器系统的重要器件.其作用为将泵浦源内的泵浦光直接注入光纤激光器系统实现泵浦光至激光的有效转换.耦合器按结构可分为 $N \times 1$ 和 $(N+1) \times 1$ 这两类^[1].侧面泵浦耦合是将泵浦光从光纤的侧面耦合进入增益光纤内包层,因此制作方法相对较多,主要有贴合棱镜侧面泵浦耦合^[2]、V型槽侧面泵浦耦合^[3]、嵌入反射镜侧面耦合^[4]、双包层光纤侧面磨抛泵浦耦合^[5]、光纤盘集中侧面泵浦耦合^[6]、衍射光栅侧面耦合^[7]、热缩管压缩侧面耦合^[8-9]、GT-wave 技术^[10]及直接侧面融合技术^[11-15].泵浦耦合器输出功率是评定耦合器质量特性的一个重要指标. IPG 公司已实现单模 10 kW 量级的全光纤结构高功率激光输出^[16],但 IPG 公司对激光器系统使用耦合器严格保密.加拿大 ITF 公司已将泵浦耦合器商品化,其 $(6+1) \times 1$ 光纤泵浦耦合器可将 2 400 W 泵浦光注入光纤激光系统,泵浦耦合器单臂耐受泵浦功率为 400 W^[17].

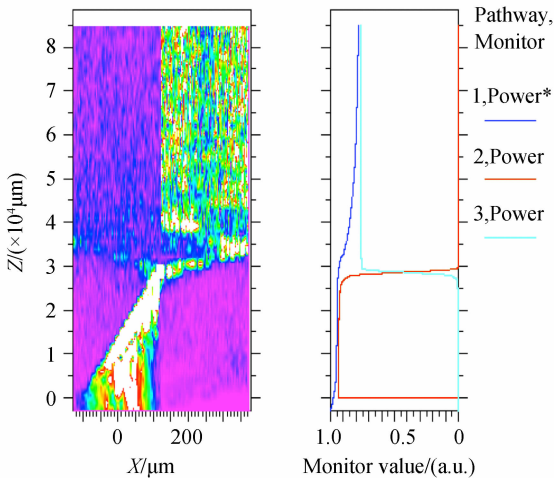
本文重点分析了侧面泵浦 $(N+1) \times 1$ 耦合器各实验条件对耦合器耦合效率和输出功率的影响.根据分析结果制作了侧面泵浦 $(N+1) \times 1$ 耦合器,通过两个

$(N+1) \times 1$ 耦合器级联方式形成级联泵浦耦合器.测试了由两个侧面泵浦 $(1+1) \times 1$ 耦合器组成的级联泵浦耦合器,在总注入泵浦功率 602 W 下输出泵浦功率 564 W,级联泵浦耦合效率高达 93.6%.由两个 $(2+1) \times 1$ 耦合器组成的级联泵浦耦合器,在总注入泵浦功率 1 210 W 下输出泵浦功率 1 120 W,级联泵浦耦合效率高达 92.5%,实现了千瓦级泵浦功率输出,且两种级联泵浦耦合器信号光损耗均小于 0.4%.

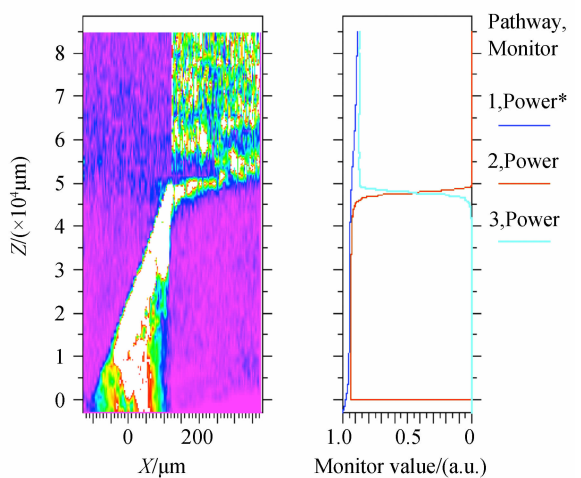
1 模型仿真

通过有限差分光束传播算法 (Beam Propagating Method, BPM) 构建 $(1+1) \times 1$ 耦合器模型 (泵浦光纤: $220/242 \mu\text{m}$; $\text{NA}=0.22$, 信号光纤: $30/250 \mu\text{m}$; $\text{NA}=0.46$) 并对其耦合过程进行仿真.分析了相同模场、不同锥区长度对 $(1+1) \times 1$ 泵浦耦合器耦合效率的影响.所有仿真图内,红色线与绿色线代表耦合器模型泵浦光纤内功率耦合变化,浅蓝色线代表耦合器模型信号光纤内功率耦合变化,深蓝色线代表耦合器模型总注入场功率.

仿真模型在相同高斯模场注入的情况下,制备锥区长度分别为 3 cm、5 cm、8 cm 和 10 cm 的 $220/242 \mu\text{m}$ 泵浦光纤与 $30/250 \mu\text{m}$ 信号光纤制作 $(1+1) \times 1$ 泵浦耦合器.锥区长度为 3 cm 的泵浦光纤使得耦合器最终耦合效率为 76.52%,见图 1(a).锥区长度 5 cm 的泵浦光纤使得耦合器最终耦合效率为 87.54%,见图 1(b).锥区长度 8 cm 的泵浦光纤使得耦合器最终耦合效率为 90.35%,见图 1(c).锥区长度 10 cm 的泵浦



(a) $(1+1) \times 1$ coupler with tapered length of 3 cm, resulting in a coupling efficiency of 76.52%



(b) $(1+1) \times 1$ coupler with tapered length of 5 cm, resulting in a coupling efficiency of 87.54%

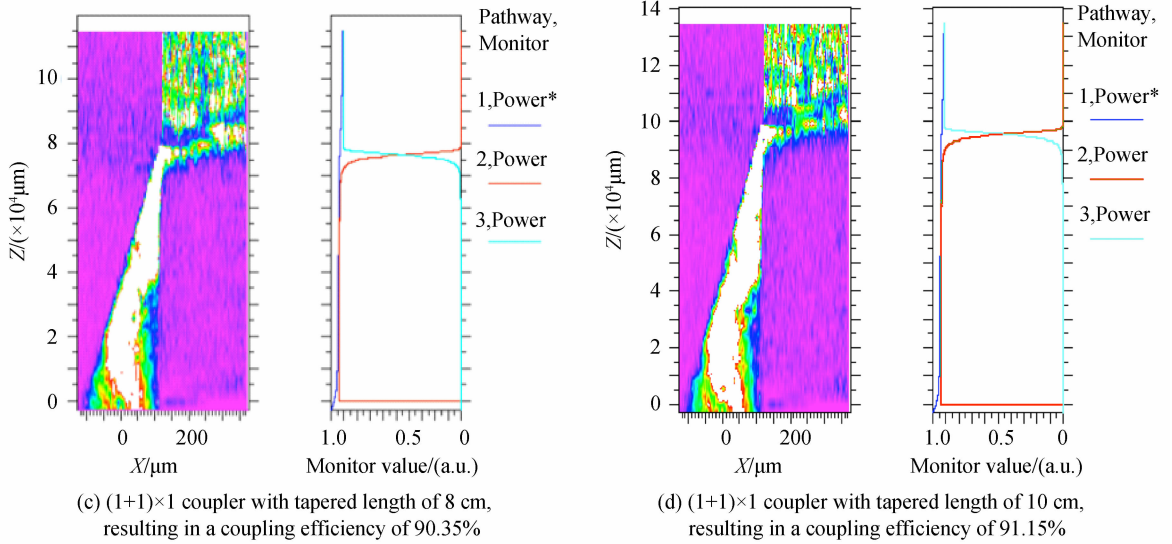


图1 相同模场,不同锥区长度 $(1+1)\times 1$ 耦合器耦合效率仿真模拟对比

Fig.1 Same mode field,different pump length of $(1+1)\times 1$ coupler coupling efficiency simulation contrast

光纤使得耦合器最终耦合效率为 91.15%，见图 1(d)。通过对比最终耦合效率的高低可明显看出，锥区的长、短对耦合器耦合效率有一定影响，制备的锥区区域越长，通过泵浦光纤进入信号光纤的泵浦光越多，泵浦耦合器的耦合效率越高。

相同模场、相同锥区长度、不同泵浦臂数量下 $(1+1)\times 1$ 耦合器和 $(2+1)\times 1$ 耦合器耦合效率仿真模拟对比,见图 2。仿真模型在相同高斯模场注入的情况下,制备锥区长度为 8 cm 的 220/242 μm 泵浦光纤与 30/250 μm 信号光纤制作 $(1+1)\times 1$ 耦合器和 $(2+1)\times 1$ 耦合器。侧面泵浦 $(1+1)\times 1$ 耦合器最终耦合效率为 90.35%，见图 2(a)。侧面泵浦 $(2+1)\times 1$ 耦合器最终耦合效率为 89.66%，见图 2(b)。通过对比最终耦合效率的高低可明显看出，侧面泵浦耦合器中耦合效率随着泵浦臂数量增多呈下降趋势。

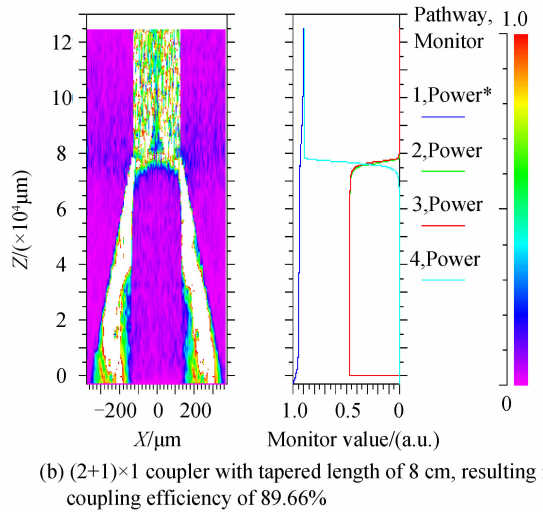


图2 相同模场、相同锥区长度、不同泵浦臂数量下 $(1+1)\times 1$ 耦合器和 $(2+1)\times 1$ 耦合器耦合效率仿真模拟对比

Fig.2 Same mode field, same pump length, different number of pumping arm of $(2+1)\times 1$ coupler coupling efficiency simulation contrast

2 实验制作

实验使用 220/242 μm 、 $\text{NA}=0.22$ 作为耦合器泵浦光纤;30/250 μm 、 $\text{NA}=0.46$ 作为耦合器信号光纤制作 $(1+1)\times 1$ 耦合器,见图 3。

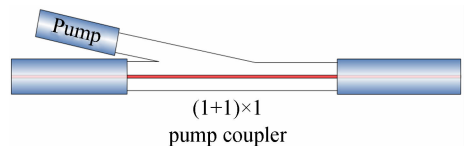
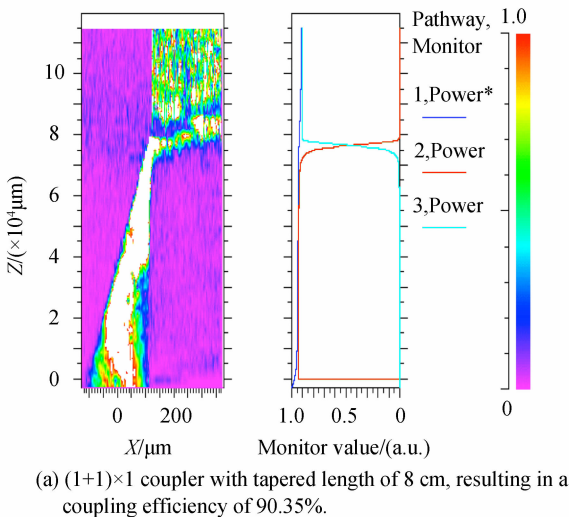


图3 $(1+1)\times 1$ 耦合器

Fig.3 The schematic diagram of a $(1+1)\times 1$ coupler



侧面泵浦 $(1+1)\times 1$ 耦合器泵浦功率实验测试系统,见图4.使用1个带尾纤(200/220 μm)输出功率为350 W的半导体激光器作为泵浦源,泵浦源尾纤与 $(1+1)\times 1$ 耦合器泵浦臂连接,连接方式为焊点熔融对接,焊点损耗小于2%.耦合器光纤输出端做直角处理,通过功率计测得耦合器输出功率324 W,泵浦耦合效率为94.6%.

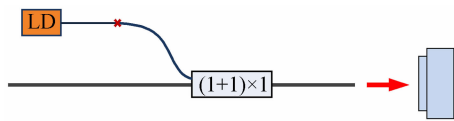


图4 $(1+1)\times 1$ 耦合器实验测试图

Fig. 4 Schematic diagram of the experimental setup for testing the pump light coupling performance of the $(1+1)\times 1$ coupler

实验使用220/242 μm 、 $\text{NA}=0.22$ 作为耦合器泵浦光纤;30/250 μm 、 $\text{NA}=0.46$ 作为耦合器信号光纤制作 $(2+1)\times 1$ 耦合器,见图5.

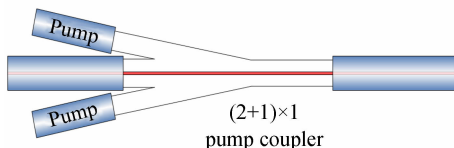


图5 $(2+1)\times 1$ 耦合器示意图

Fig. 5 The schematic diagram of a $(2+1)\times 1$ coupler

侧面泵浦 $(2+1)\times 1$ 耦合器泵浦功率实验测试系统,见图6.用2个带尾纤(200/220 μm)输出功率为350 W的半导体激光器作为泵浦源,泵浦源尾纤与 $(2+1)\times 1$ 耦合器泵浦臂连接,连接方式为焊点熔融对接,焊点损耗小于2%.耦合器光纤输出端做直角处理,通过功率计测得耦合器输出功率643W,泵浦耦合效率为93.7%.

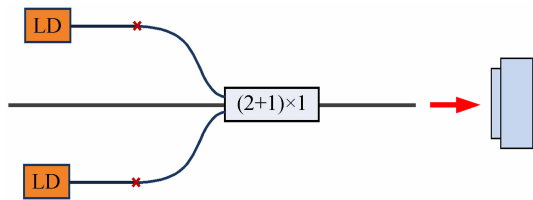


图6 $(2+1)\times 1$ 耦合器实验测试图

Fig. 6 Schematic diagram of the experimental setup for testing the pump light coupling performance of the $(2+1)\times 1$ coupler

用光纤熔接技术将两个侧面泵浦 $(1+1)\times 1$ 耦合器首尾焊接,见图7.侧面泵浦 $(1+1)\times 1$ 耦合器的输出信号光纤与侧面泵浦 $(1+1)\times 1$ 耦合器的输入信号光纤熔融焊接,形成一个 $(1+1)\times 1$ 耦合器级联泵浦结构.

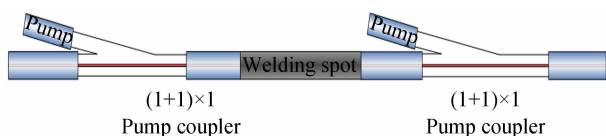


图7 级联泵浦耦合器结构

Fig. 7 The schematic diagram of $(1+1)\times 1$ cascade pump coupler

用光纤熔接技术将两个侧面泵浦 $(2+1)\times 1$ 耦合器首尾焊接,见图8.侧面泵浦 $(2+1)\times 1$ 耦合器的输出信号光纤与侧面泵浦 $(2+1)\times 1$ 耦合器的输入信号光纤熔融焊接,形成一个 $(2+1)\times 1$ 耦合器级联泵浦结构.

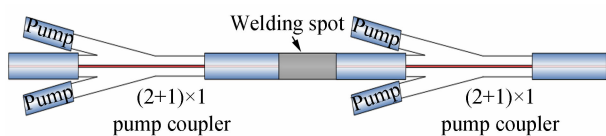


图8 级联泵浦耦合器结构示意图

Fig. 8 The schematic diagram of $(2+1)\times 1$ cascade pump coupler

$(1+1)\times 1$ 级联泵浦耦合器泵浦功率测试系统,见图9.用2个带尾纤(200/220 μm)输出功率为350 W的半导体激光器作为泵浦源.泵浦源尾纤分别与两个 $(1+1)\times 1$ 耦合器泵浦臂连接,连接方式为焊点熔融对接,焊点损耗均小于2%. $(1+1)\times 1$ 级联泵浦耦合器光纤输出端做直角处理,通过功率计显示级联结构的泵浦耦合器输出功率达到564 W,耦合效率为93.6%.

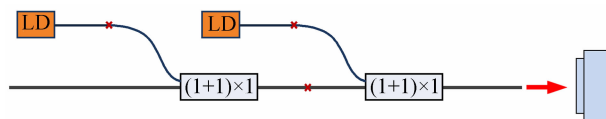


图9 $(1+1)\times 1$ 级联泵浦耦合器泵浦功率测试图

Fig. 9 Schematic diagram of the experimental setup for testing the $(1+1)\times 1$ pump light coupling performance of the cascade pump coupler

$(2+1)\times 1$ 级联泵浦耦合器泵浦功率测试系统,见图10.用4个带尾纤(200/220 μm)输出功率为350 W的半导体激光器作为泵浦源.泵浦源尾纤分别

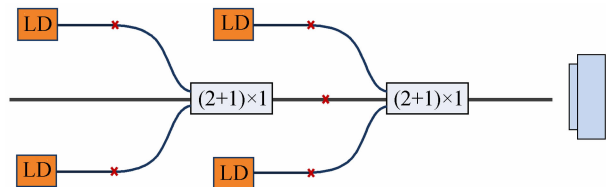


图10 $(2+1)\times 1$ 级联泵浦耦合器泵浦功率测试图

Fig. 10 Schematic diagram of the experimental setup for testing the $(2+1)\times 1$ pump light coupling performance of the cascade pump coupler

与两个 $(2+1)\times 1$ 耦合器泵浦臂连接,连接方式为焊点熔融对接,焊点损耗均小于 2% 。 $(2+1)\times 1$ 级联泵浦耦合器光纤输出端做直角处理,通过功率计显示级联结构的泵浦耦合器输出功率达到 $1\ 120\ \text{W}$,耦合效率为 92.5% 。

级联泵浦耦合器信号光损耗测试图,见图 11。实验中用一对光纤光栅、增益光纤、一支端面泵浦 3×1 耦合器。泵浦光通过端面泵浦 3×1 耦合器进入增益光纤,通过光纤光栅形成震荡输出激光。测得初始激光输出功率为 $395\ \text{W}$,震荡系统光-光转换效率为 65.8% 。用熔融焊接技术将级联泵浦耦合器与搭建的光纤振荡器进行熔接,测得组合系统输出激光 $390\ \text{W}$ 。因震荡系统与级联泵浦耦合器之间有熔接点造成光功率损耗,因此保留系统熔接点在靠近级联泵浦耦合器一端,将光纤截断作直角处理后测得激光输出功率为 $391.5\ \text{W}$,熔接点损耗 $3.5\ \text{W}$,熔接损耗小于 0.89% 。组合系统级联泵浦耦合器信号光损耗小于 0.4% 。

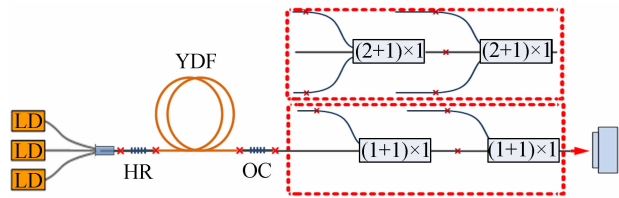


图 11 级联泵浦耦合器信号光损耗测试图

Fig. 11 Schematic diagram of the experimental setup for testing signal loss of the cascade pump coupler

3 结论

分析了泵浦光纤不同锥区长度对 $(1+1)\times 1$ 耦合器效率的影响。锥区长度为 $3\ \text{cm}$ 的泵浦光纤使得耦合器最终耦合效率为 76.52% 。锥区长度 $5\ \text{cm}$ 的泵浦光纤使得耦合器最终耦合效率为 87.54% 。锥区长度 $8\ \text{cm}$ 的泵浦光纤使得耦合器最终耦合效率为 90.35% 。锥区长度 $10\ \text{cm}$ 的泵浦光纤使得耦合器最终耦合效率为 91.15% 。泵浦光纤锥型区域越长,通过泵浦光纤进入信号光纤的泵浦光越多,泵浦耦合器的耦合效率越高。同时,分析了相同模场、相同锥区长度、不同泵浦臂数量下 $(1+1)\times 1$ 耦合器和 $(2+1)\times 1$ 耦合器耦合效率仿真模拟对比。仿真模型在相同高斯模场注入的情况下,制备锥区长度为 $8\ \text{cm}$ 的 $220/242\ \mu\text{m}$ 泵浦光纤与 $30/250\ \mu\text{m}$ 信号光纤制作 $(1+1)\times 1$ 耦合器和 $(2+1)\times 1$ 耦合器。侧面泵浦 $(1+1)\times 1$ 耦合器最终耦合效率为 90.35% 。侧面泵浦 $(2+1)\times 1$ 耦合器最终耦合效率为 89.66% 。通过对比最终耦合效率的高低可明显看出,侧面泵浦耦合器中耦合效率随着泵浦臂数量增多呈下降趋势。实验根据分析结果制作了 $(1+1)\times 1$ 耦合器与 $(2+1)\times 1$ 耦合器,通过两个 $(N+1)\times 1$ 耦合器级联的方式形成级联泵浦耦合器。实验测试了由两

个 $(1+1)\times 1$ 耦合器组成的级联泵浦耦合器,在总注入泵浦功率 $602\ \text{W}$ 下输出泵浦功率 $564\ \text{W}$,级联泵浦耦合效率高达 93.6% ,由两个 $(2+1)\times 1$ 耦合器组成的级联泵浦耦合器,在总注入泵浦功率 $1210\ \text{W}$ 下输出泵浦功率 $1120\ \text{W}$,级联泵浦耦合效率高达 92.5% ,实现了千瓦级泵浦功率输出。两种级联泵浦耦合器信号光损耗均小于 0.4% 。利用此方法将耦合器形成级联结构可有效提高光纤激光器系统泵浦输出能力,实现了千瓦级高功率输出。

参考文献

- [1] WEBER T, LÜTHY W, WEBER H P. Side-pumped fiber laser[J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 1996, **63**(2): 131-134.
- [2] RIPIN D J, GOLDBERG L. High efficiency side coupling of light into optical fibers using imbedded v-grooves [J]. *Electronics Letters*, 1995, **31**(25): 2204-2205.
- [3] TEMYANKO V, MANSURIPUR M. Efficient and scalable side pumped scheme for short high-power optical fiber lasers and amplifiers[J]. *Photonics Technology Letts*, 2004, **16**(9): 2024-2026.
- [4] MOORE S W, KOPLOW J P, HANSEN A, et al. Embedded-Mirror Side pumped of Double-Clad Fiber Lasers and Amplifiers[C]. SPIE, 2008: 870-871.
- [5] XIAO Qi-rong, YAN Ping, GONG Ma-li, et al. 100 W Ytterbium-doped monolithic fiber laser with fused angle-polished side-pumped configuration[J]. *Laser Physics Letters*, 2011, **8**(2): 125-129.
- [6] HUANG Chieh-wei, HUANG Ding-wei, CHANG Chun-lin, et al. Demonstration of side coupling between high power laser diode array and double-clad fiber using sub-wavelength grating [C]. CLOE, 2011.
- [7] CESAR J, STEFFEN B, GEORGIOS W, 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.
- [8] GONTHIER F. Novel designs for pump and signal fiber combiners[C]. SPIE, 2010, **7580**: 758019.
- [9] GRUDININ A B, PAYNE D N, TURNER P W, et al. Multi-fiber arrangements for high-power fiber lasers and amplifiers: US, 6826335[P]. 2004-11-30.
- [10] THOMAS T, HAKAN S, JÖRG N, et al. Pump and signal combiner for bi-directional pumping of all-fiber lasers and amplifiers[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(27): 28125-28141.
- [11] THOMS T, HAKAN S, JÖRG N, 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.
- [12] V P G, I S. Coupling arrangement between a multi-mode light source and an optical fiber through an intermediate optical fiber length; US, 5999673[P]. 1999-04-16.
- [13] SINTOV Y, GLICK Y, KOPLOWITC T, et al. A novel side coupling tech-nique for rugged all-fiber lasers and amplifiers[C]. SPIE, 2007, **6552**: 1-9.
- [14] GLICK Y, SINTOV, Y KOPLOWITC T, et al. Strictly-all-fiber 1070nm high power source in a distributed side-coupled pump configuration[C]. CLEO, 2007: CFI4.
- [15] GONTHIER F, GARNEAU M, VACHON N, et al. Fiber outer cladding coupler for multi-clad fibers [P]: US, AU2007214209.
- [16] IPG Photonics Corporation. IPG Photonics successfully tests world's first 10-kilowatt single-mode production laser[EB/OL]. [2009-06-15]. <http://www.ipgphotonics.com/newsproduct.htm>.
- [17] DAN N, PARK J, MITCHEL L, et al. High-efficiency $(6+1)\times 1$ combiner for high power fiber lasers and amplifiers [C]. SPIE, 2013, **8601**: 860139.