

10 kW 级单纤泵浦耦合器件设计与实验研究

林宏奂, 郭超, 赵鹏飞, 李成钰, 李琦, 王波鹏, 黄志华, 楚秋慧, 唐选

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要: 针对制约单纤系统向更高功率输出面临的泵浦光源亮度受限和有源光纤泵浦注入区域温度控制受限的问题, 提出一种新型的端面泵浦耦合器件。通过扩大信号光纤的包层直径, 有效提升了可注入光纤系统的泵浦功率, 同时有效降低了有源光纤端面泵浦注入区域的温度。在实验中获得了 9.95kW 的泵浦激光注入, 并在单纤系统中实现了 6 kW 的输出。该器件具备 10 kW 以上的泵浦耦合能力, 具备应用于万瓦级单纤系统的潜力。

关键词: 泵浦耦合器; 高功率光纤激光系统; 泵浦耦合; 热管理

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.S206003

Design and experiment of 10kW class monolithic fiber pump coupling device

Lin Honghuan, Guo Chao, Zhao Pengfei, Li Chengyu, Li Qi, Wang Bopeng,
Huang Zhihua, Chu Qiuhui, Tang Xuan

(Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: The new designed fiber end-pump coupling device was reported to solve the problem in a monolithic fiber system outputting higher level of signal power, which was limited by pump brightness and temperature control of the pump injection area. By enlarging the signal fiber cladding diameter, more pump power could be injected in fiber system and the temperature of the pump injection area was successfully reduced. In experiment, 9.95 kW pump laser was injected to a monolithic fiber laser system, and over 6 kW signal output was realized. This fiber end-pump coupling device is capable of 10 kW class pump injection and promising for the application in a 10 kW class monolithic fiber laser system.

Key words: pump coupling device; high power fiber laser system; pump coupling; thermal management

收稿日期: 2016-08-05; 修订日期: 2016-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(11404305, 11474257)

作者简介: 林宏奂(1978-), 男, 副研究员, 硕士, 主要从事高能光纤激光技术方面的研究。Email: happylin2003@yeah.net

通讯作者: 唐选(1983-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事高能光纤激光技术方面的研究。Email: tangxuan@yinhe596.cn

0 引言

高功率光纤激光系统由于其具备优异的光束质量、高的转换效率、易于热管理、低成本等优势,已经在工业加工等领域有着广泛的应用。随着双包层光纤以及二极管泵浦激光器的出现和发展,近 10 年来高功率光纤激光器经历了一个繁荣发展期。2004 年 Y. Jeong 等报道了首台千瓦级输出的具有近衍射极限的光纤激光器^[1],随后,光纤激光的输出功率水平在不断提升,同时不同类型的高功率光纤激光器也相继出现^[2-6]。然而,随着高功率光纤激光器的快速发展,作为光纤激光器关键元件的泵浦激光器的发展却显现了滞后的趋势,其亮度提升的速度,已经不能满足光纤激光器功率提升的需要。即目前泵浦激光光源的亮度水平只能在有限直径的双包层光纤中注入有限的泵浦功率,这个泵浦功率水平限制了激光器能够输出的信号功率。另外,由于光纤注入的泵浦功率越来越大,有源光纤泵浦注入点附近由于量子亏损效应等原因产生的热量越来越大,其温度越来越高,也成为影响光纤激光器可靠工作的限制因素。

为解决上述两大限制单纤激光系统向更高功率输出的瓶颈问题,IPG 公司提出了同带泵浦的方法,即采用 1018 nm 光纤激光器泵浦有源光纤实现更高功率输出。由于光纤激光器的亮度水平至少比二极管激光器的亮度高一个量级,其提供的能够耦合进入有源光纤的功率极容易达到 10 kW 以上的水平。另外,由于掺镱有源光纤对 1018 nm 泵浦光的吸收较一般的 976 nm 和 915 nm 二极管泵浦源弱很多,量子亏损也低很多,有源光纤泵浦注入点附近温度比采用传统二极管泵浦激光器的系统温度要低很多。因此,IPG 公司采用上述方法首次实现了 10 kW 的输出^[7]。但是 1018 nm 光纤激光器本身是由二极管泵浦,因此在理论效率上,同带泵浦的总体效率低于采用二极管泵浦源直接泵浦的系统,同时系统也更复杂。

文中报道一种新型端面泵浦耦合器件,通过采用 30/900 μm 光纤作为输出信号光纤,有效增大了光纤泵浦传输包层的直径,增加了在现有二极管泵浦激光光源亮度条件下耦合进入双包层光的泵浦功率水平,同时由于包层面积的增大,有源光纤泵浦注

入点的有效吸收系数降低,从而有效降低了注入点的温度,使直接采用二极管泵浦激光光源泵浦有源光纤实现万瓦级输出成为可能。实验中,采用该器件获得了 9.95 kW 的泵浦激光注入,并在单纤系统中实现了 6 kW 的输出。该器件具备 10 kW 以上的泵浦耦合能力,具备应用于万瓦级单纤系统的潜力。

1 泵浦耦合器件的设计

泵浦耦合器结构示意图如图 1 所示。器件采用一根 Nufern 30/400 GDF (纤芯 $NA=0.06$, 包层 $NA=0.46$) 作为输入信号光纤,6 根 Nufern 300/330/360 多模光纤 ($NA=0.02$) 作为泵浦光纤排列在输入信号光纤周围。器件采用一根 30/900 自制光纤 (纤芯 $NA=0.06$, 包层 $NA=0.46$) 作为输出光纤。相比于传统 400 μm 包层光纤,该光纤包层直径更大,因此作为泵浦耦合器件的输出光纤可以容纳更大直径的泵浦光纤,使得在同样亮度水平下,器件可以耦合更高的泵浦功率。同时,光纤的包层直径加大,必须采用与之匹配的有源光纤才能构成激光系统,使得有源光纤的芯包比降低,从而降低有源光纤对泵浦的吸收,降低泵浦注入点附近的温度。为降低信号的插入损耗,在实际泵浦耦合器的制作中,特别拉锥过程中需要控制拉锥工艺,使 6 根多模光纤变径而中间 30/400 GDF 光纤直径基本保持不变,拉锥结束后,6+1 结构的光纤束外径为 900 μm ,与输出光纤外径一致。

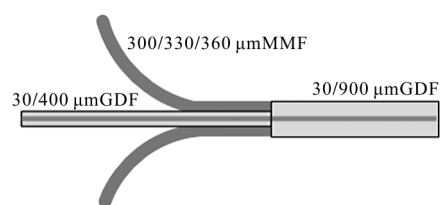


图 1 泵浦耦合器结构示意图

Fig.1 Structure schematic of pump coupling device

对不同包层直径的有源光纤温度进行模拟,如图 2 和图 3 所示。假设 2 种有源光纤都采用端面泵浦的方式,注入泵浦功率为 10.4 kW,中心波长为 976 nm,输出信号波长为 1064 nm。假定 2 种系统要泵浦激光总的吸收都要达到 18 dB 才能获得较优的光-光转换效率,在不同的光纤掺杂浓度条件下,2 种具有相同芯径 (30 μm) 的有源光纤在不同的掺杂浓度下需要的长度如图 2 所示。可以看出,在相同总吸收的条件

下,30/900 有源光纤需要更高的掺杂浓度。假定 2 种光纤具有相同的包层材料(石英)导热率、涂覆层厚度(如 100 μm)、相同的冷却换热系数和工作环境温度(300 K)以及端面 10.4 kW 泵浦激光注入。计算 2 种有源光纤端面泵浦注入点的温度随光纤长度的变化如图 3 所示。可以看出在相同主放光纤长度下,900 μm 包层的有源光纤的泵浦注入区温度低于 400 μm 包层的有源光纤,并且系统所用主放有源光纤越短(相应掺杂浓度越高),该温度差异越明显。由于光纤系统芯区和涂覆层温度越高,越容易造成光纤的熔融毁伤,并且由于采用短的光纤更有利于抑制大功率光纤系统的非线性效应,因此 900 μm 包层的有源光纤在热管理可靠性和非线性抑制较常规 400 μm 包层的有源光纤更具优势。

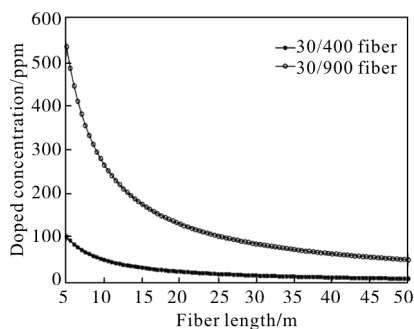


图 2 2 种有源光纤在不同掺杂浓度下所需的长度

Fig.2 Doping concentration vs length needed of two active fibers

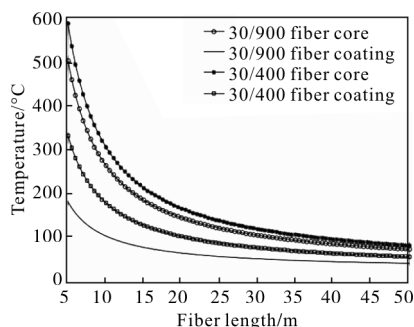


图 3 2 种有源光纤泵浦注入区的温度随长度的变化

Fig.3 Temperature of pump injection area vs length of two active fibers

2 实验结果

实验装置如图 4 所示,振荡级采用一对光纤布拉格光栅 FBG 和掺镱光纤构成谐振腔结构,在 6 只总共 300 W 输出的 976 nm 激光二极管 LD 泵浦下产生 200 W 的 1 080 nm 种子激光。振荡级输出的信号

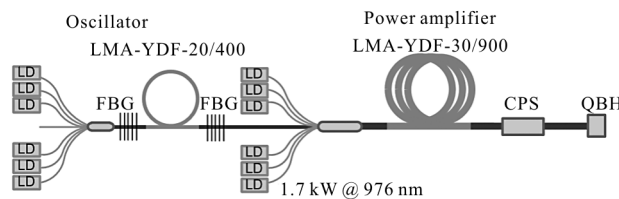


图 4 实验装置示意图

Fig.4 Schematic of experimental setup

激光通过图 1 所示的泵浦耦合器输入主放级。主放级由自制 30/900 μm 大模场掺镱光纤 LMA-YDF(纤芯 $NA=0.06$ 、包层 $NA=0.46$,吸收系数 $0.8 \text{ dB/m}@976 \text{ nm}$)、自制 30/900 泵浦耦合器、包层功率剥离器(CPS)和输出石英端帽(QBH)组成。CPS 用于剥离系统包层内残余激光,具备 1.5 kW 包层激光剥离能力。QBH 用于对输出激光的扩束,降低端面的返回激光,避免系统的烧毁。自制 30/900 泵浦耦合器 6 根泵浦臂分别与 6 只输出 1 600~1 800 W 的 976 nm 激光二极管输出尾纤连接,其输出 30/900 μm 信号光纤与 30/900 μm 掺镱光纤熔接,泵浦耦合器在有源主放光纤端面注入泵浦激光的同时将振荡级的信号输入主放有源光纤。实验系统的所有光纤和器件安装在一块水冷板上,通过冷却水进行传导散热。

实验首先测试了泵浦耦合器的信号插入损耗和泵浦耦合效率。通过测试泵浦耦合器输出光纤输出的振荡器激光信号功率与振荡级单独输出的功率进行比较,可以获得耦合器的信号插入损耗。实际测试得到该耦合器的信号插入损耗为 0.14 dB。为保证测试的准确性,排除包层激光的干扰,在耦合器输出光纤上在线制作一段剥离比达 20 dB 的 CPS,因此该数值真实地反映了耦合器对纤芯中传输信号的损耗。同样,先测试 6 只泵浦二极管激光器的输出功率(测得总共 10.051kW),再测试耦合器输出光纤的泵浦功率(测得 9.95kW)可以获得耦合器的泵浦耦合效率。测得该耦合器的泵浦耦合效率约为 99%。

30/900 μm 有源光纤输出信号斜率如图 5 所示。在注入泵浦激光总功率为 9.95 kW 时,输出信号激光 6.03 kW,拟合曲线效率约为 61.25%。由于自制光纤在制作过程中没有采用除水工艺,造成其本底损耗较大,因此斜率效率偏低。用红外热像仪对泵浦注入点附近涂覆层表面温度进行监测,在激光器系统满功率运行时,温度不超过 27 $^{\circ}\text{C}$,体现了大直径包层

对降低泵浦注入区域温度的优势。同时也在激光系统满功率工作时监测泵浦耦合器的温度，其表面最高温度不超过 30 ℃,其性能保持稳定。

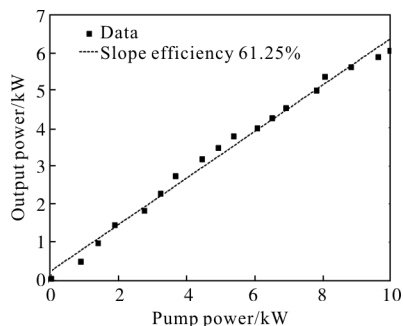


图 5 系统主放级输出功率与注入泵浦功率关系

Fig.5 Main amplifier output power vs injection pump power

3 结论

文中报道一种新型端面泵浦耦合器件，通过采用 30/900 μm 光纤作为输出信号光纤，有效增加了耦合进入双包层光的泵浦功率水平和降低了泵浦注入区域的温度，使直接采用二极管泵浦激光光源泵浦有源光纤实现万瓦级输出成为可能。实验中，采用该器件获得了 9.95 kW 的泵浦激光注入，并在单纤系统中实现了 6 kW 的输出，该器件在工作时性能稳定，具备良好的热管理能力。通过进一步加大注入泵浦功率和信号功率，采用该器件的单纤激光系统有

望实现 10 kW 以上的输出。

参考文献:

- [1] Jeong Y, Sahu J, Payne D, 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 Zhihua, Liang Xiaobao, Li Chengyu, et al. Spectral broadening in high-power Yb-doped fiber lasers employing narrow-linewidth multilongitudinal-mode oscillators [J]. *Appl Opt*, 2016, 55(2): 297-302.
- [3] Yu H, Zhang H, Lv H, et al. 3.15 kW direct diode-pumped near diffraction-limited all-fiber-integrated fiber laser [J]. *Appl Opt*, 2015, 54(14): 4556-4560.
- [4] Khitrov V, Minelly J D, Tumminelli R, et al. 3kW single-mode direct diode-pumped fiber laser [C]//SPIE, 2014, 8961: 89610V.
- [5] Beier F, Hupel C, Nold J, et al. Narrow linewidth, single mode 3 kW average power from a directly diode pumped ytterbium-doped low NA fiber amplifier [J]. *Opt Express*, 2016, 24(6): 6011-6020.
- [6] Xiao Q, Yan P, Li D, et al. Bidirectional pumped high power Raman fiber laser [J]. *Opt Express*, 2016, 24(6): 6758-6768.
- [7] Stiles E. New developments in IPG fiber laser technology [C]//Proceedings of the 5th International Workshop on Fiber Lasers, 2009: 1-2.