

## 基于波长锁定泵浦单振荡级千瓦光纤激光器

马建立,姜诗琦,于 淼,刘海娜,王军龙,王学锋

(北京航天控制仪器研究所,北京 100094)

**摘要:**采用 976 nm 锁波长激光二极管(LD)双向泵浦掺 Yb 全光纤激光器,单谐振腔输出 1.2 kW 近单模激光,总光光转换效率为 70.8%,光束质量  $M_x^2 \approx 1.03$ ,  $M_y^2 \approx 1.55$ ,实验验证在千瓦功率量级内,正、反泵浦相互影响不明显。光纤激光器从阈值电流到最大电流范围内,输出功率随泵浦功率曲线基本线性,在 1 kW 功率下做 8 小时稳定性测试,稳定度在 2% 以下。激光器可在宽温度范围内工作,温度循环试验表明,输出功率随温度变化具有较好的一致性。

**关键词:**高功率光纤激光器; 双向泵浦; 近单模激光; 宽电流/温度范围

**中图分类号:** TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1105002

## KW fiber laser oscillator based on wavelength locking

Ma Jianli, Jiang Shiqi, Yu Miao, Liu Haina, Wang Junlong, Wang Xuefeng

(Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100094, China)

**Abstract:** A near single-mode 1.2 kW all-fiber laser oscillator with optical-optical efficiency of 70.8% and beam quality of  $M_x^2 \approx 1.03$ ,  $M_y^2 \approx 1.55$  was reported. The laser is bidirectional pumped by laser diodes with locked wavelength of 976 nm. Therefore, the fiber laser takes on nearly linear output power versus pump power from threshold current to full current, and the instability capacity of output power is less than 2% during 8 h operation. The laser can be operated within wide temperature scope, the excellent temperature uniformity is shown on temperature cycle test.

**Key words:** high power fiber laser; bidirectional pumped; near single-mode laser; wide current/temperature scope

收稿日期:2016-03-05; 修订日期:2016-04-03

基金项目:航天电子技术研究院创新基金

作者简介:马建立(1980-),男,高级工程师,博士,主要从事激光器及激光应用技术方面的研究。Email:custmj1@163.com

## 0 引言

光纤激光器具有转换效率高、光束质量好、寿命长、易于散热、免维护等诸多优点<sup>[1-7]</sup>,在工业加工、医疗、科研、军事等领域的应用日益广泛。近年来,随着光纤器件性能的提升和光纤处理工艺的进步,在高功率光纤激光器研究和工程化方面有了较大进步。

2009 年,中国科学院西安光学精密机械研究所采用主振激光器加两级放大方案,实现了 1 kW 输出,是国内较早的千瓦全光纤激光器报导<sup>[8]</sup>;2011 年,清华大学采用主振激光器加两级放大方案,实现了 1.1 kW 激光输出,光光转换效率 66.5%<sup>[9]</sup>,该研究组于 2012 年采用主振激光器加两级放大方案,实现了 1.6 kW 全光纤激光输出,转换效率 65%<sup>[10]</sup>;2013 年,中国科学院上海光学精密机械研究所采用主振激光器加一级放大方案,实现了 1.5 kW 全光纤激光输出,光光转换效率 70.2%<sup>[11]</sup>;同年,华北光电技术研究所研制了主振放大的 1.05 kW 光纤激光器,光光效率高达 77%<sup>[12]</sup>;2014 年,国防科技大学采用主振激光器加一级放大方案,实现了 2 kW 全光纤激光输出<sup>[13]</sup>。而目前 IPG Photonics 公司、SPI 公司等国外先进光纤激光器生产单位对华可销售单主振激光器 1 kW 光纤激光器,OFS 公司可生产 1.1 kW 单主振光纤激光器谐振腔模块。

单主振级千瓦光纤激光器结构更加紧凑,只需对一根有源光纤做散热处理,散热结构更加简单,并且单主振级可通过监测高反光栅的漏光实现监视激光器运转状态,在工程应用中具有实际意义。

文中采用单谐振腔双向泵浦的结构,实现了 1.2 kW 高功率激光输出,光路中所有光纤为传导式冷却,功率稳定性测试 8 h,不稳定性在 2% 以下,为千瓦以上高功率光纤激光器的工业应用和航天应用提供技术基础。

## 1 实验装置

全光纤激光器光路结构如图 1 所示,激光器采用双向泵浦方式,正向泵浦选用 6 支光纤耦合输出 VBG 锁波长激光二极管模块 (LD),尾纤为 200/220  $\mu\text{m}$ ,  $NA=0.22$ ,最大输出功率为 180 W,VBG 将 LD 波长锁定在 976 nm 附近,输出泵浦光光谱如图 2 所示,

中心波长 976.3 nm,10 dB 谱宽为 0.82 nm。反向泵浦采用 6 支 VBG 锁波长 100 W 光纤耦合输出 LD,光纤参数与正向泵浦 LD 相同。增益光纤采用 20/400  $\mu\text{m}$  掺 Yb 双包层光纤,数值孔径  $NA=0.06/0.46$ ,掺 Yb 光纤的吸收/发射谱如图 3 所示,对包层耦合的 976 nm 波长光的吸收损耗约为 1.28 dB/m,实验中采用 18.6 m 增益光纤。

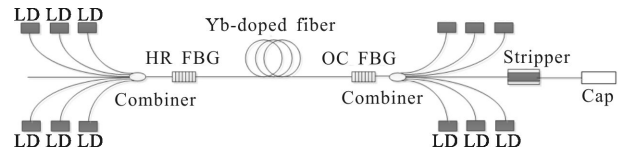


图 1 全光纤激光器光路示意图

Fig.1 Schematic of the all fiber laser light path

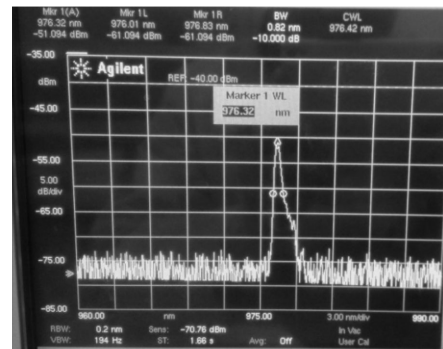


图 2 泵浦光源光谱图

Fig.2 Spectrum of pump light source

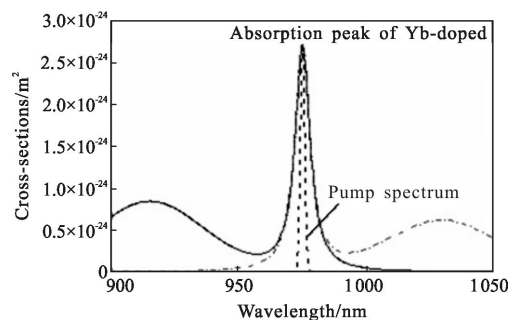


图 3 泵浦光谱与掺 Yb 光纤的吸收光谱的对应关系

Fig.3 Relationship between pump spectrum and Yb-doped fiber absorption spectrum

正向合束器选用(6+1) $\times$ 1 合束器,泵浦臂光纤为 200/220  $\mu\text{m}$ ,  $NA=0.22$ ,输出光纤为 20/400  $\mu\text{m}$  双包层光纤,泵浦臂损耗小于 0.3 dB,正向泵浦光通过正向泵浦合束器耦合进双包层光纤,正向泵浦功率为 1 080 W;反向泵浦合束器泵浦光纤为 200/220  $\mu\text{m}$ ,

NA=0.22, 输出光纤与信号光纤均为 20/400  $\mu\text{m}$  双包层光纤, 泵浦臂损耗不大于 0.5 dB, 信号光插入损耗 0.1 dB, 反向泵浦光从反向泵浦合束器耦合至双包层光纤, 反向泵浦功率为 600 W, 激光器总泵浦功率为 1 680 W。

光纤光栅工作中心波长为 1 080 nm, 高反射率 (HR) 光纤光栅反射率大于 99%, 输出 (OC) 光纤光栅反射率约为 10% $\pm$ 2%。激光从 OC 光纤光栅输出后, 用包层光剥离器去掉包层中剩余泵浦光和从纤芯中泄露出来的激光, 纤芯内的激光经传能光纤传输到光纤输出端帽, 由输出端帽输出。

激光驱动电源采用 4 台 Delta 公司生产的 SM120-13 电源, 电源的电流分辨率为 0.01 A。功率测量采用 Laserpoint 公司生产的 3 kW 功率计, 在千瓦量程档时功率分辨率为 5 W。光束质量测量通过两片 3 $^\circ$ 角分光镜分光, 采用  $f=300\text{ mm}$  聚焦透镜聚焦激光束, 用衰减片加 CCD 测量激光光斑, 通过对 CCD 探测图像做处理, 测量激光光斑直径。沿激光传输方向多点测量, 计算光束质量因子。

## 2 实验结果

实验中, 对正向泵浦下的激光输出、反向泵浦下的激光输出和双向泵浦的激光输出功率做了对比。如图 4 为单独开启正向泵浦和单独开启反向泵浦, 激光输出功率随泵浦功率的变化曲线, 正向泵浦和反向泵浦从阈值到最大输出功率都保持良好的线性, 当正向达到最大泵浦功率 1 080 W 时, 最大输出功率 785 W, 光光转换效率为 72.6%。反向达最大泵浦功率 600 W 时, 输出 405 W 激光, 光光转换效率为 67.5%。

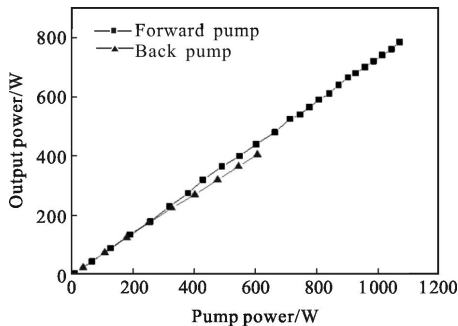


图 4 输出激光功率随正向/反向泵浦功率的变化曲线图  
Fig.4 Laser output power vs forward pump power and back pump power

可见, 反向泵浦的光光转换效率略低于正向泵浦, 这是由于反向泵浦合束器泵浦臂损耗较大, 在反向泵浦合束器上消耗掉部分泵浦功率, 因此, 反向泵浦的光光转换效率比正向泵浦少约 5.1%。

对激光器做双向泵浦测试, 先加满正向泵浦功率, 再加满反向泵浦功率, 激光器输出功率随泵浦功率变化曲线如图 5 所示, 总泵浦功率达最大泵浦功率 1 680 W 时, 输出最高激光功率 1 190 W, 总光光转换效率为 70.8%。激光器泵浦功率超过 1 000 W 时, 激光器的斜率效率略有下降, 是因后续的泵浦功率增加是由反向加入所致。对比图 4 中的实验数据可见, 正反向泵浦几乎没有引起相互影响, 并且激光器输出仍保持良好的线性曲线, 没有出现功率饱和现象, 若提升泵浦功率, 可进一步提升激光器功率。在 1.2 kW 功率下, 激光光谱如图 6 所示, 谱线为 1 080 nm, 且未产生较强的受激拉曼散射。

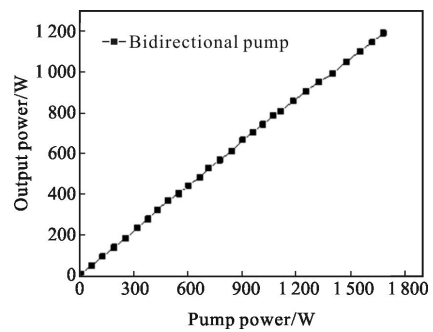


图 5 输出激光功率随泵浦功率的变化曲线图  
Fig.5 Laser output power vs pump power

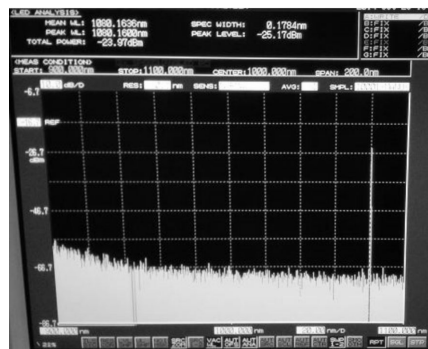


图 6 1.2 kW 激光光谱  
Fig.6 Laser spectrum at 1.2 kW

实验对输出最高功率下做光束质量测量, 光束经过楔形镜分光和透镜聚焦, 焦点附近光束横向能量分布如图 7 所示, 图 7(a)为 CCD 测得的激光光斑,

图 7(b)为拟合的高斯曲线,横向分布与高斯曲线非常吻合,光斑外侧受杂散光影响,有一定本底干扰噪声。

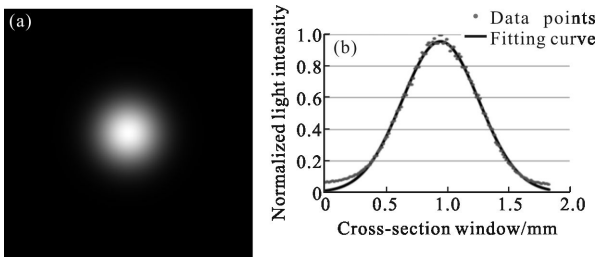


图 7 激光光束横向能量分布  
Fig.7 Energy distribution of laser beam in transverse filed

激光光束的纵向分布如图 8 所示,图 8(a)为  $x$  方向,图 8(b)为  $y$  方向,分别计算得出  $M^2_x \cong 1.03, M^2_y \cong 1.55$ 。

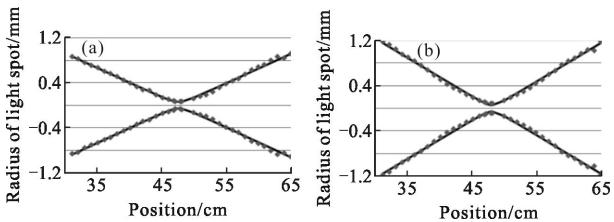


图 8 激光光束的纵向能量分布测试曲线  
Fig.8 Energy distribution of laser beam in longitudinal direction

对激光器预热 5 min 后,调至输出功率 1 kW 时做稳定性测试,保持激光器驱动电流不变,冷却水温设置 20 °C,测试激光器输出功率随时间变化,测试结果如图 9 所示,激光器功率随时间无明显变化。激

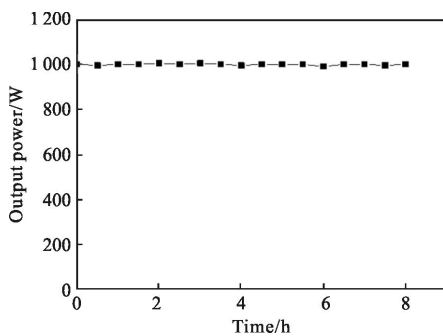


图 9 激光输出功率随时间变化  
Fig.9 Laser output power vs time

激光器功率不稳定性按公式(1)计算:

$$\delta = \frac{(P_{\max} - P_{\min})}{\bar{P}} \quad (1)$$

式中:  $P_{\max}$ 、 $P_{\min}$  分别为输出功率最大、最小值,  $\bar{P}$  为输

出功率平均值。计算得激光器输出功率不稳定性为 1.5%,较为稳定的激光器在工业应用中可得到较为稳定的加工效果。

对激光器做了水温变化测试,激光器在满泵浦电流下工作时,分别从 15 °C 升高至 25 °C,再从 25 °C 降至 15 °C,测试激光器在不同温度下的输出功率,如图 10 所示,在 15 °C 冷却温度时,输出功率为 1200 W,达到 25 °C 冷却温度时,输出功率为 1185 W,功率变化率为 1.3%;当从 25 °C 冷却温度降回到 15 °C 时,其冷却温度对应的输出功率相同,表明激光器输出功率随温度的对应关系稳定。激光器在温度升高时功率略有降低,是由 LD 在升温过程中输出功率降低所致,而 LD 由 VBG 锁波长,在温度发生变化时泵浦光波长基本保持稳定,不会发生泵浦光波长偏离增益光纤吸收峰,避免造成反向 LD 损坏和包层功率剥离器烧毁,因此实现了激光器在宽温度范围内正常运转。

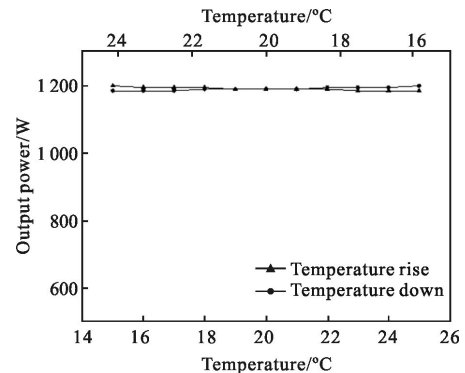


图 10 激光输出功率随泵浦源温度变化  
Fig.10 Laser output power vs temperature of LD

### 3 结论

文中讨论了双向泵浦单谐振腔 1190 W 连续波全光纤激光器的技术途径,对激光器做了较为全面的性能测试。光路采用 VBG 锁波长泵浦源,实现宽电流范围、宽温度范围的激光运转。在 1 kW 输出功率下测试 8 h 不稳定性在 1.5% 以下,1.2 kW 输出功率下 10 °C 温度引起的功率变化率为 1.3%,光束质量因子  $M^2_x \cong 1.03, M^2_y \cong 1.55$ ,并验证了在千瓦量级内,正反泵浦之间没有明显的相互影响,可以认为输出功率是简单叠加。激光器光光转换效率为 70.8%,其输出功率与泵浦功率具有较好的线性关系,进一步

增加泵浦功率可能实现更高功率的激光输出。激光器全光路在传导式冷却方式下, 可为工程应用提供良好的技术基础。

### 参考文献:

- [1] Xiao Y, Brunet F, Kanskar M, et al. 1-kilowatt CW all-fiber laser oscillator pumped with wavelength-beam-combined diode stacks [J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 3296-3301.
- [2] Yang Zuoyun, Wang Dayong, Wang Yunxin, et al. Measurement method for the half-wave voltage of phase modulator based on the principal of laser phased array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 906-910. (in Chinese)  
杨作运, 王大勇, 王云新, 等. 基于激光相控阵原理的相位调制器半波电压测量方法 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 906-910.
- [3] Wang Lixin, Cai Jun, Jiang Peipei, et al. All fiberized high power linear polarized pulsed ytterbium-doped fiber laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 350-354. (in Chinese)  
王立新, 蔡军, 姜培培, 等. 全光纤化高功率线偏振掺镱脉冲光纤激光器 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 350-354.
- [4] Dong Fanlong, Zhao Fangzhou, Ge Tingwu, et al. Optimization of beam quality for all-fiber lasers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(4): 844-849. (in Chinese)  
董繁龙, 赵方舟, 葛廷武, 等. 全光纤激光器光束质量的优化 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(4): 844-849.
- [5] Gao Jing, Yu Feng, Kuang Hongshen, et al. Generation of supercontinuum spectra from acousto-optic Q-switched nanosecond fiber lasers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(5): 1138-1142. (in Chinese)  
高静, 于峰, 匡鸿深, 等. 纳秒声光调 Q 光纤激光器产生超连续谱 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(5): 1138-1142.
- [6] Zhao Jianchuan, Guo Ruhai, Sun Tao. Development history and trend analysis of shipborne laser weapons [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 151-155.
- [7] Lv Xinwei, Wu Junyong, Sun Liyan. Thermal stress birefringence simulation of single mode optic fiber loop [J]. *Navigation and Control*, 2015, 14(3): 94-97. (in Chinese)  
律新伟, 武俊勇, 孙丽艳. 单模光纤环热应力双折射仿真分析 [J]. 导航与控制, 2015, 14(3): 94-97.
- [8] Duan Kailiang, Zhao Baoyin, Zhao Wei, et al. 1 000 W all-fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(12): 3219. (in Chinese)  
段开棕, 赵保银, 赵卫, 等. 1 000 W 全光纤激光器 [J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3219.
- [9] Yan Ping, Yin Shupeng, He Jianwei, et al. 1.1-kW Ytterbium monolithic fiber laser with assembled end-pump scheme to couple high brightness single emitters [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(11): 697-699.
- [10] Yan Ping, Xiao Qirong, Fu Chen, et al. A 1.6 kW all-fiber Yb-doped fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(4): 0416001. (in Chinese)  
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.
- [11] Dai Shoujun, He Bing, Zhou Jun, et al. 1.5 kW nearly single transverse mode all-fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(7): 0702001. (in Chinese)  
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.
- [12] Zhang Mingli, Zhou Shouhuan, Zhao Hong, et al. Output characteristics of kW master-oscillator power amplifier fiber laser [J]. *High Power Laser and Particle Beam*, 2013, 25(8): 1893-1896. (in Chinese)  
张利明, 周寿桓, 赵鸿, 等. kW 级主振荡功率放大光纤激光器输出特性 [J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(8): 1893-1896.
- [13] Liu Zejin, Leng Jinyong, Guo Shaofeng, et al. A 2 kW all-fiber quasi-single mode fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 40(9): 183. (in Chinese)  
刘泽金, 冷进勇, 郭少峰, 等. 全光纤结构 2 kW 准单模光纤激光器 [J]. 中国激光, 2014, 40(9): 183.