

文章编号: 0258-7025(2005)01-0005-04

双端抽运的 30 W 光纤激光器实验研究

韦文楼^{1,2}, 欧攀¹, 闫平¹, 巩马理¹, 肖力敏¹

(¹ 清华大学精密仪器系, 北京 100084; ² 广西大学物理系, 广西南宁 530004)

摘要 报道了双端抽运连续输出的掺 Yb³⁺ 双包层高功率光纤激光器。实验采用了中心波长在 975 nm 附近的两种输出形式的半导体激光器(LD)作为抽运源, 测量了不同抽运条件下的输出功率特性和光谱特性。在仅尾纤输出的半导体激光器抽运下获得了斜率效率为 42%, 峰值波长为 1103.8 nm 的 9.2 W 激光输出; 在仅准直输出的半导体激光器抽运下获得了斜率效率为 57%, 峰值波长为 1104.4 nm 的 20.0 W 激光输出; 当两个半导体激光器在双端同时抽运时, 获得光纤激光最大输出功率为 30.6 W, 输出峰值波长为 1108.4 nm, 以及 49% 的总体光-光转换效率。

关键词 激光技术; 光纤激光器; 双端抽运; 双包层光纤; D 形光纤; Yb³⁺ 掺杂

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Experimental Study of 30 W CW Fiber Laser by Two-End Pumping

WEI Wen-lou^{1,2}, OU Pan¹, YAN Pin¹, GONG Ma-li¹, XIAO Li-min¹

(¹ Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)
(² Department of Physics, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract A two-end pumping high power continuous-wave (CW) Yb³⁺-doped double-clad fiber laser was reported. In experiments, two types of laser diodes with center wavelength around 975 nm were adopted as pumping sources, and the characteristics of output power and laser spectrum were measured under different pumping conditions. Under the pumping of the pigtailed laser diode, output power was 9.2 W, slope efficiency was 42% and laser peak spectrum was 1103.8 nm. Under the pumping of the collimated laser diode, output power was 20.0 W, slope efficiency was 57% and laser peak spectrum was 1104.4 nm. When both laser diodes were used to pump the fiber laser together, the maximum output power of 30.6 W, laser peak spectrum of 1108.4 nm and total optical-to-optical efficiency of 49% were achieved.

Key words laser technique; fiber laser; two-end pumping; double-clad fiber; D-shaped fiber; Yb³⁺-doped

1 引 言

采用包层抽运技术的双包层光纤激光器能够在内包层中注入高的抽运功率, 从而可以获得高功率的激光输出。与现有的其他激光器相比, 高功率光纤激光器以其独特的高亮度(IPG Photonics 公司生产的 135 W 激光器连续输出光束参数约为 1.4 mm · mrad)^[1] 和高效率(高功率输出情况下斜率效率高达 50% 以上)等性能在高精度激光加工、激光医学、激光雷达技术和空间技术等领域中逐渐成为主导力量, 将在激光器家族中占据重要的地位。

高功率双包层光纤激光器 1999 年已突破百瓦发展到 110 W 连续激光输出^[2]。目前, 10~20 W 输出的光纤激光器已经商品化。近来, 美国 IPG Photonics 公司和德国 Jena 大学的应用物理所分别报道了单根双包层光纤连续输出功率高达 135 W^[1] 和 150 W^[3] 的光纤激光器。目前, 各种新技术使得光纤激光器的输出功率还在不断增加^[4], 英国南安普敦的光电子研究中心(ORC)已经研制出单根最大输出功率高达 1000 W 的光纤激光器。国内很多科研单位也投入了这种新型激光器的研究^[5~9]。本文通过双端抽运具有 D 形内包层的掺 Yb³⁺ 双包层

收稿日期: 2003-09-15; 收到修改稿日期: 2003-12-16

作者简介: 韦文楼(1962—), 男, 壮族, 广西罗城人, 广西大学副教授, 硕士, 在清华大学作为访问学者期间从事光纤激光器的研究工作。E-mail: wlwei@sina.com

光纤,获得了连续 30.6 W 准直输出的光纤激光器。

2 实验装置

掺 Yb^{3+} 双包层光纤是目前高功率光纤激光器的研究热点。因为纤芯内 Yb^{3+} 的吸收和发射谱带均很宽,能够有效地吸收 915 nm 以及 975 nm 为中心的两个半导体激光器(LD)发出的抽运光,并且具有潜在的从 975~1200 nm 的宽发射谱段,可以在此波长范围内得到可调谐光纤激光器输出。由于 Yb^{3+} 的吸收谱和发射谱间隔小,量子转换效率高,因此容易获得高的抽运光转换效率。我们采用内包层为 D 形的掺 Yb^{3+} 双包层石英光纤作为激光增益介质,其内包层为 350/400 μm 的 D 形结构,数值孔径 0.37,掺 Yb^{3+} 离子的纤芯直径约 12 μm ,掺杂浓度为 6500×10^{-6} 。双包层光纤的长度选取为 38 m。

双端抽运准直输出光纤激光器是在原 10 W 级单端抽运光纤激光器的基础上进行了改进。实验上仍采用基本的法布里-珀罗(Fabry-Perot)腔型(图 1),两个半导体激光器 LD1 和 LD2 分别在两端进行抽运。抽运源 LD1 为中心波长 975 nm 的 25 W 尾纤输出半导体激光器模块,输出端共有 19 根尾纤集聚成束形成一个外包络直径 1100 μm 的圆斑,通过特殊设计的光学耦合透镜系统 OCS1 将 19 根尾纤出射的抽运光经过双色片 DM1 注入双包层光纤的 D 型内包层,双色片 DM1 紧贴光纤端面,作为前腔镜它对 975 nm 附近的抽运光高透 ($T > 90\%$);对 1050~1150 nm 高反 ($R > 99.5\%$)。抽运源 LD2 是一个具有准直输出功率 35 W 的大功率半导体激光器模块,其输出为矩形光斑,中心波长约为 976 nm,通过特殊设计的光学耦合透镜系统 OCS2

聚焦后注入双包层光纤激光输出端内包层。在抽运源 LD2 和聚焦耦合透镜系统 OCS2 之间有一片与光路成一定倾角的双色片 DM2 用来将经过 OCS2 后准直好的光纤激光输出光束与抽运源的准直光束分开。为了保证半导体激光器抽运源的温度不致于过高而引起其中心波长漂移,采用了温控系统将其温度控制在 15 $^{\circ}\text{C}$ 以下。

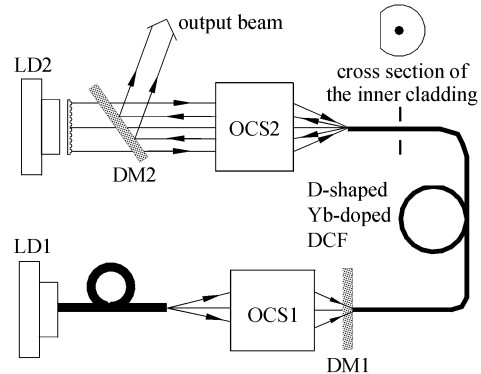


图 1 高功率双包层光纤激光器实验原理图

Fig. 1 Experimental setup of high-power double-cladding fiber laser

3 输出特性

3.1 实验结果

采用双端抽运光纤激光器实验装置,分别测量了只有一个抽运源工作时的输出功率特性曲线,以及两个抽运源同时工作时的输出功率特性曲线。

在仅有抽运源 LD1 工作时,驱动电流达到 10 A 观察到光纤激光器有激光输出,阈值抽运功率为 1.4 W,当其最大驱动电流达到 50 A 时,得到 9.2 W 的光纤激光输出;在仅有准直抽运源 LD2 工作时,驱动电流达到 7.5 A 观察到有光纤激光输出,阈

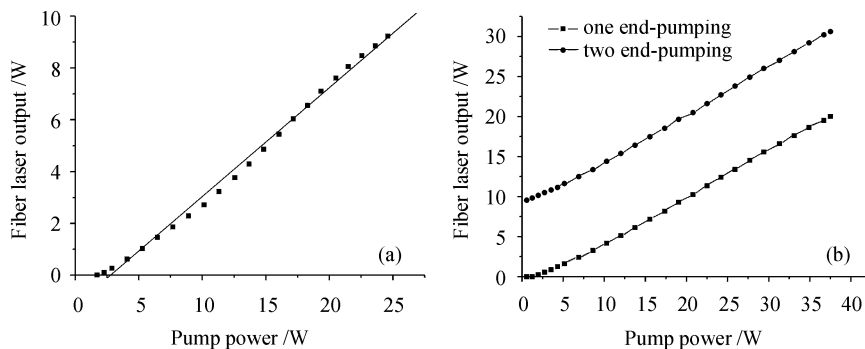


图 2 光纤激光器输出功率特性曲线

(a) LD1 抽运; (b) LD2 抽运和 LD1+LD2 抽运

Fig. 2 Fiber laser output power versus pump power

(a) LD1 pumping; (b) LD2 pumping and LD1+LD2 pumping

值抽运功率仍为 1.4 W, 当其最大驱动电流达到 49 A 时, 得到 20.0 W 的光纤激光输出。两 LD 抽运源均在最大驱动电流下工作时, 得到最大光纤激光输出 30.6 W。图 2 所示为光纤激光器的输出功率和抽运功率的关系曲线。

图 2(a) 为仅有抽运源 LD1 工作时的光纤激光器的输入输出功率曲线, 经过实验数据拟合可以得到其斜率效率为 42%, 最大功率 9.2 W, 输出时的总光-光转换效率为 37%。图 2(b) 中有两条曲线, 其中方点标记的曲线是仅有抽运源 LD2 工作时的

光纤激光器的输入输出功率曲线, 其斜率效率为 57%, 在最大输出 20.0 W 时总光-光效率为 53%; 圆点标记的曲线是保持抽运源 LD1 的工作电流在 50 A 的情况下, 逐渐增加 LD2 的工作电流所得到的光纤激光器的输入输出功率曲线, 其斜率效率为 57%, 最大功率 30.6 W 输出时双端抽运的总体光-光转换效率为 49%。

利用 Agilent86142B 光谱分析仪对掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器的输出光谱特性进行了测量。图 3, 4 是不同情况下所测得的输出光谱特性曲线。

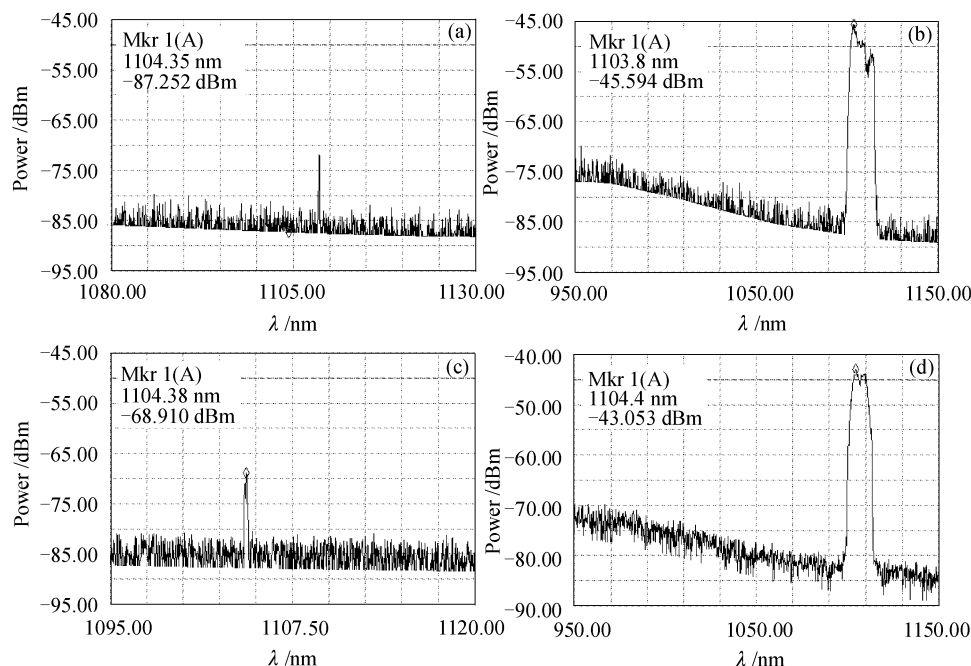


图 3 光纤激光器的输出光谱图

- (a) 在阈值附近(LD1 抽运); (b) 在最大 9.2 W 输出功率下(LD1 抽运);
(c) 在阈值附近(LD2 抽运); (d) 在最大 20.0 W 输出功率下(LD2 抽运)

Fig. 3 Output spectrum of fiber lasers

- (a) just above threshold (LD1 pumping); (b) under maximum output power of 9.2 W (LD1 pumping);
(c) just above threshold (LD2 pumping); (d) under maximum output power of 20.0 W (LD2 pumping)

抽运源 LD1 和 LD2 在相同温度下的中心波长有所差别, 并且在不同抽运源注入的条件下, 双包层光纤激光器输出功率会相应地发生变化, 造成掺 Yb^{3+} 的纤芯内激光功率密度变化, 从而引起 Yb^{3+} 的精细能级结构粒子数分布的变化, 使得双包层光纤激光器输出光谱的峰值及其谱宽发生改变, 对此我们进行了测量。图 3 是仅有抽运源 LD1 或者 LD2 工作时的输出光谱图, 图 3(a) 所示为 LD1 抽运光纤激光器刚过阈值时的激光输出光谱, 可以看到这时的光纤激光输出谱峰值为 1108.2 nm 处的窄线宽光谱, 但是随着 LD1 抽运功率的增加, 光纤

激光输出功率增加, 其输出谱宽也在不断增加, 图 3(b) 所示为在 9.2 W 的最大输出下, 光纤激光输出谱宽展宽至 14 nm, 输出谱线的峰值位于 1103.8 nm, 谱线中心位于 1108 nm 处。图 3(c) 所示为 LD2 抽运光纤激光器刚过阈值时的激光输出光谱, 此时光纤激光输出为 1104 nm 处的窄线宽光谱, 随着 LD2 抽运功率的增加, 光纤激光输出谱宽也不断增加, 图 3(d) 所示为在 20.0 W 的最大输出下的光谱特性曲线, 此时的谱宽约 12 nm, 输出谱线呈双峰结构, 高值点在 1104.4 nm 处。但是在双端抽运的情况下, 光纤激光输出光谱谱宽却较单端抽运的

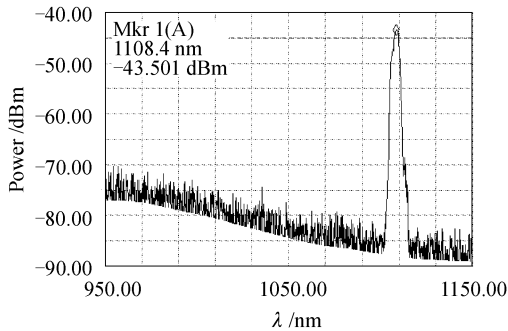


图 4 双端抽运下输出为 30.6 W 时的光谱图

Fig. 4 Output spectrum of 30.6 W under two-end pumping

谱宽有所压缩。图 4 所示为两个抽运源均工作在最大电流下, 光纤激光输出为 30.6 W 时的谱线图, 可以看出这时的谱宽只有 8 nm, 谱线峰值位于 1108.4 nm 处。

在光纤激光输出功率为 30.6 W 时, 采用横模分析仪 Spiricon LBA-500 pc 测得光纤激光输出的发散角为 0.48 mrad, 光束参数为 3.6 mm · mrad。这说明光纤激光输出的准直效果很好, 但是激光输出中除了基模以外还有少量的低阶模。

3.2 分析

实验过程中, 无论是在单端 LD1 或是 LD2 抽运下, 还是在 LD1 和 LD2 同时工作的双端抽运下, 光纤激光输出都能保持很好的线性, 这说明掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器还未达到饱和, 仍能通过增加抽运功率来提高输出功率。同时, 在光纤激光输出的谱线中, 已经看不到 980 nm 附近的抽运源的谱线, 这说明该双包层光纤的 D 形内包层结构以及光纤的选取长度保证了抽运光能够被充分吸收。

转换效率高是掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器的一个显著特点, 在实验中仅用 LD1 进行单端抽运时得到了 42% 的斜率效率以及最大功率 9.2 W 输出时的总光-光转换效率为 37%, 仅用 LD2 抽运时得到了 57% 的斜率效率以及最大输出 20.0 W 时总光-光效率为 53%。两个半导体激光器抽运源造成的差别, 其原因不在于抽运源波长的细微偏差, 而主要在于两端抽运光功率和方向以及耦合系统的差异。利用截断法测量了两端的注入功率, LD1 抽运端通过光学耦合透镜系统 OCS1 和双色镜 DM1 后注入光纤内包层的抽运功率传输效率为 53.5%, LD2 抽运端通过双色镜 DM2 和光学耦合透镜系统 OCS2 后注入光纤内包层的抽运功率传输效率为 71.3%。

考虑到 OCS2 同时作为准直透镜组, 其对于光纤激光输出的透过率为 91%, 因此 LD1 的抽运光入纤后斜率效率为 86.3%, 总体光-光转换效率为 77%, LD2 的抽运光入纤后的斜率效率为 87.8%, 总体光-光转换效率为 82%, 由此可见抽运光的功率以及耦合入纤的方向会影响转换效率, 但是抽运光的耦合入纤效率对于光纤激光器总体效率影响更大。因此, 要进一步提高端面抽运的光纤激光器的总体光-光转换效率, 一方面要提高双色镜的质量, 在保证对于光纤激光的高反射率的同时提高对于抽运光的透过率; 另一方面, 要提高光学耦合透镜系统的成像质量, 同时要对其镀制高质量的增透膜。

4 结 论

选用 D 形内包层掺 Yb³⁺ 双包层光纤, 采用 Fabry-Perot 腔型进行双端抽运, 实现了波长为 1108 nm 附近、功率超过 30 W, 光束参数为 3.6 mm · mrad, 发散角 0.48 mrad 的准直连续激光输出, 总体光-光转换效率约为 49%。

参 考 文 献

- 1 N. S. Platonov, D. V. Gapontsev, V. P. Gapontsev *et al.*. 135 W CW fiber laser with perfect single mode output [C]. CLEO, 2002. CPDC3-1~CPDC3-4
- 2 V. Dominic, S. MacCormack, R. Waarts *et al.*. 110 W fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(14):1158~1160
- 3 J. Limpert, A. Liem, S. Hofer *et al.*. 150 W Nd/Yb codoped fiber laser at 1.1 μm [C]. CLEO, 2002. CThX1, 590~591
- 4 V. Gapontsev, W. Krupke. Fiber lasers grow in power [J]. *Laser Focus World*, 2002, **38**(8):83~87
- 5 Lou Qihong, Zhou Jun, Li Tiejun *et al.*. 4.9 W Yb-doped double-clad fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(4):306
楼祺洪, 周 军, 李铁军 等. 4.9 W 掺镱双包层光纤激光器[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(4):306
- 6 Lü Fuyun, Fan Yaxian, Wang Hongjie *et al.*. High-efficient 6.5 W Yb-doped double-clad fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(10):888
吕福云, 樊亚仙, 王宏杰 等. 高斜率效率 6.5 W 双包层掺 Yb 光纤激光器[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(10):888
- 7 Ping Yan, Mali Gong, Pan Ou *et al.*. 10-W cladding-pumped fiber laser with single transverse mode output [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(6):332~333
- 8 Lou Qihong, Zhou Jun, Zhu Jianqiang *et al.*. 10 W double-cladding fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9):1080~1081
楼祺洪, 周 军, 朱健强 等. 10 W 级双包层光纤激光器[J]. *光学学报*, 2003, **23**(9):1080~1081
- 9 Lou Qihong, Zhou Jun, Zhu Jianqiang *et al.*. Double-clad fiber laser acquired 20 W output [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **A30**(4):328
楼祺洪, 周 军, 朱健强 等. 双包层光纤激光实现 20 W 激光输出[J]. *中国激光*, 2003, **A30**(4):328