

文章编号 1004-924X(2014)04-0844-06

全光纤激光器光束质量的优化

董繁龙*, 赵方舟, 葛廷武, 王智勇

(北京工业大学 激光工程研究院 国家产学研激光技术中心, 北京 100124)

摘要: 基于激光器的结构, 实验研究了影响光束质量的因素。搭建了百瓦级全光纤激光器, 在最大泵浦功率为 436 W 的条件下, 在 1 080 nm 处获得的激光输出为 300 W, 光-光转换效率为 69%, 光束质量 M^2 为 1.13。实验研究了谐振腔出射的激光光束在传能光纤中传输时径向功率分布的变化, 结果显示: 随着光束在光纤中传输距离的增加, 光纤中的包层光功率呈现出先增加后保持不变的趋势, 因而在传输距离上选择不同的长度对包层光进行剥离, 可以获得不同的光束质量。实验还显示, 在相同的泵浦条件下, 与包层光剥离器设置在腔外相比, 其设置在谐振腔内可获得更高的激光输出功率, 但是光束质量较差。最后, 采用在腔内腔外各加一个包层光剥离器的方法获得了更好的光束质量, 此时 M^2 为 1.07。

关键词: 光纤激光器; 全光纤结构; 光束质量; 包层光剥离; 加热扩芯光纤

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142204.0844

Optimization of beam quality for all-fiber lasers

DONG Fan-long*, ZHAO Fang-zhou, GE Ting-wu, WANG Zhi-yong

(National Center of Laser Technology, Institute of Laser Engineering,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

* Corresponding author, E-mail: fanlongd@emails.bjut.edu.cn

Abstract: On the basis of laser structures, factors affecting on the beam quality were experimentally explored to improve the beam quality of fiber lasers. A hundred-watts class all-fiber laser with an output power of 300 W at 1 080 nm was built when the maximum pump power was 436 W. The beam quality (M^2) was tested, and experiments show that the M^2 is 1.13 and optical-optical conversion efficiency is 69%. Then, the change of the radial power distribution of the laser beam that transported in a fiber was experimentally analyzed. The result shows that the cladding light power increases initially and remains constant afterwards as the transmission distance of laser beam increases in the fiber. Therefore, different beam qualities can be obtained after stripping the cladding light at any selected transmission distance. In addition, the higher laser output power can be obtained when the cladding light stripper is set inside instead of outside of the cavity under the same pumping conditions. However, a worse beam quality is left in this case. Finally, a better beam quality M^2 at 1.07 is obtained by setting two cladding light strippers outside and insider the cavity, respectively.

Key words: fiber laser; all-fiber structure; beam quality; cladding light stripper; thermally expanded core fiber

收稿日期: 2013-06-26; 修订日期: 2013-08-25.

基金项目: 国家科技重大专项资助项目 (No. 2010ZX04013-052); 科研基地-科技创新平台-光纤激光器研究平台资助项目 (No. PXM2011_014204_09_000060)

1 引言

随着大模场面积双包层掺杂光纤、高亮度激光二极管泵浦技术^[1]、泵浦合束器、光纤光栅等关键技术与器件的研究工作取得突破性进展,高功率全光纤化的光纤激光器的输出功率不断提高^[2-6]。2005年,IPG公司采用一级振荡、两级放大的方式,率先实现了1.96 kW的单模单纤激光输出,光束质量 $M^2=1.2$ ^[7]。2009年,该公司又采用多级放大的方式实现了10 kW的单模单纤激光输出,光束质量 $M^2<1.3$ ^[8]。在国内高功率光纤激光器的研究起步相对较晚,但近年来也取得了突破性进展,多家单位已经成功实现了千瓦级以上的输出。2009年,中科院西安光机所采用一级振荡、两级放大的方式实现了单纤1 kW的激光输出,其光-光转换效率为62%^[9]。2011年,国防科技大学光电学院采用单谐振腔方式实现1 kW的激光输出,其光-光转化效率为68%^[10],但光束质量均未见报道。2012年,中电集团11所采用双端泵浦单谐振腔的方法,获得了1 kW的激光输出,光束质量 $M^2\approx 1.4$ ^[11]。

众所周知,评价激光器性能的参数不只是输出功率的大小,功率分布(光束质量)也很重要。激光器的输出功率和光束质量共同决定了它的性能和用途。因此,激光器的光束质量研究具有重

要意义。光纤激光器的光束质量主要由光纤的波导结构决定,即光纤允许的导波模式决定光束质量。而光纤对各导波模式的响应程度是可控的,通过实验手段可以改变激光器的结构,从而达到改变光纤的波导结构和控制导波模式响应程度的目的。

本文搭建了全光纤结构激光器。该激光器采用谐振输出的方式,纤芯为20 μm 的双包层光纤,输出功率为300 W。为了获得更好的光束质量,对激光光束在光纤中传输时径向功率分布的变化进行了实验研究,探究了包层光功率的大小对输出光束质量的影响。

2 全光纤激光器结构和输出特性

全光纤连续激光器的结构如图1所示。泵浦源为18个功率为25 W、波长为975 nm的带尾纤输出的半导体激光器,经19 \times 1泵浦合束器合束后,对20 m长的Nufern纤芯/包层为20/400大模场面积双包层掺镱光纤进行泵浦,该增益光纤的泵浦吸收系数为1.26 dB/m。采用一对光纤光栅作为谐振腔反射镜,其中全反光栅对1 080 nm波长激光的反射率为99%,透射光栅的反射率为10%。在输出端帽前采用ITF公司的包层功率剥离器(Cladding Power Stripper, CPS)对包层光进行了剥除。

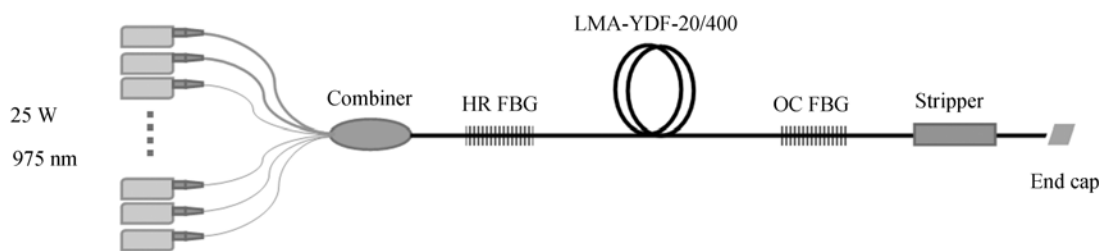


图1 全光纤激光器原理图

Fig. 1 Schematic illustration of all-fiber laser

为保证光纤激光器能实现高功率输出,在系统的组建过程中,除做好光纤的切割和熔接等技术工作外,还要对增益光纤和CPS等器件进行冷却。本文采用主动冷却的办法,以使各个光纤器件在高功率状态下正常运转。实验中,激光器输出功率随泵浦功率的变化曲线如图2所示。激

光器的斜效率为72.1%,在最大泵浦功率为436 W的条件下,激光输出为300 W,光-光转换效率为68.6%。另外,利用PRIMES光束诊断仪测量了激光功率为300 W时的光束质量,结果如图2所示,光束质量 $M^2=1.13$ 。

本文对激光束沿光纤径向的功率分布特性进

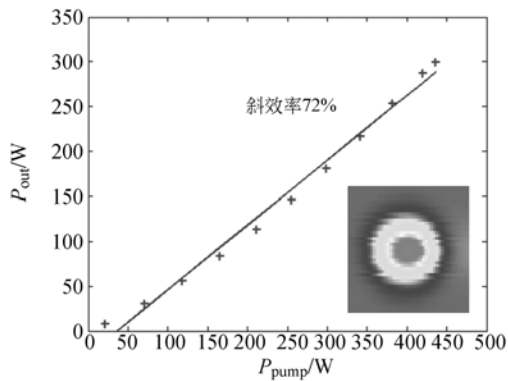


图 2 激光器的输出特性

Fig. 2 Output characteristics of all-fiber laser

行了理论分析,并通过改变激光器的结构,从实验上找出了影响激光器光束质量的因素。

3 光纤导波模式的径向功率分布

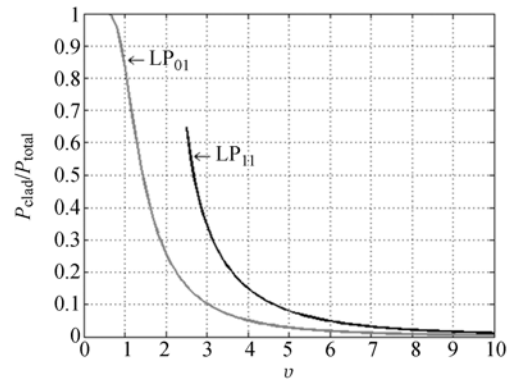
通常情况下,该项研究关注的是纤芯中的光功率在总功率中所占的比重,即光纤纤芯的光功率填充因子 Γ 。基于弱导波模的方法, Gloge^[12] 的研究已经得到了精确度在纤芯-包层折射率差量级内的结果。对于一个特定的导波模式,其光纤纤芯的光功率填充因子 Γ 的计算公式为:

$$\Gamma = \frac{P_{\text{core}}}{P_{\text{total}}} = b \left[1 - \frac{J_l(\nu\sqrt{1-b})}{J_{l+1}(\nu\sqrt{1-b}) J_{l-1}(\nu\sqrt{1-b})} \right], \quad (1)$$

其中: $b = \frac{n_{\text{eff}}^2 - 2n_2^2}{n_1^2 - n_2^2}$ 为归一化的相位常数。因此,光纤包层中的光功率所占比例为 $1 - \Gamma$ 。

实验中 Nufern LMA-20/400 大模场面积光纤的归一化频率 $\nu = 3.49$ (波长 $\lambda = 1.08 \mu\text{m}$)。由光纤的模式理论分析可知,该光纤只能容纳 LP_{01} 模和 LP_{11} 模两个导模的传输。利用式(1)计算出在不同的归一化频率 ν 值下,光纤中 LP_{01} 模和 LP_{11} 模的光功率填充因子 Γ , 并绘制功率分布曲线如图 3 所示。图中给出了不同的 ν 值下,光纤包层中 LP_{01} 模和 LP_{11} 模的光功率所占各自总功率的比重。

数值计算表明,当 $\nu = 3.49$ 时, LP_{01} 模和 LP_{11} 模在包层中的光功率占各自总功率的比重分别为 7% 和 22%。事实上,模式的阶数越高,该模式在包层中传输的功率越多。

图 3 不同的 ν 值下,光纤中 LP_{01} 模和 LP_{11} 模的包层功率比Fig. 3 Cladding power ratio in LP_{01} and LP_{11} mode with different ν

4 传输距离对径向光功率分布的影响

实验研究了在传输过程中激光的功率分布沿光纤径向的变化。首先,在激光器的输出端熔接上一段传输光纤(纤芯/包层直径为 20/400,数值孔径为 0.06/0.46)。然后,在光纤的末端剥除一段 8 cm 长的光纤涂覆层,并重新涂上高折射率胶 ($n_g = 1.55$),从而形成一个剥离器,用来剥除包层中的光功率。实验原理如图 4 所示。

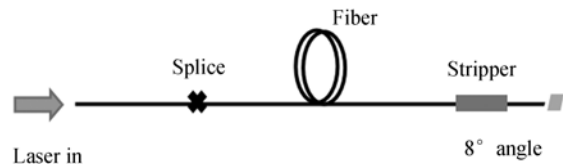


图 4 传输距离对光束质量的影响实验

Fig. 4 Experiment for transmission distance impact on beam quality

在传输光纤长度为 0.5~6 m,注入光功率不同的条件下,测量了剥离器剥除的光功率,结果如图 5 所示。

图 5 中,横坐标为 0 处对应的光纤熔接点。从图 5 中可以看出,在传输过程中随着传输距离的变化,激光的功率分布也发生改变。在靠近光纤熔接点处包层的光功率较高,但随着传输距离的增加剥离的包层光功率迅速减小;在传输距离为 3 m 左右时,剥除的包层光功率最小;随着传输距离的继续增加,包层的光功率又迅速增加到一定值,之后变化很小。

经分析,光纤熔接点附近包层的光功率较大,

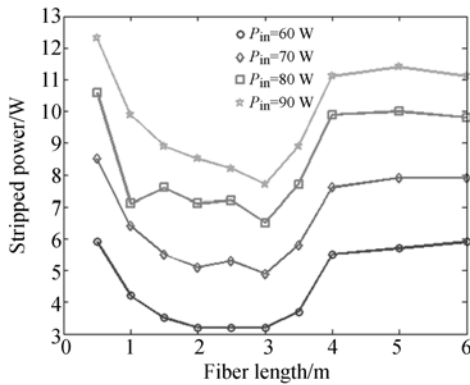


图 5 传输距离与包层光功率的关系

Fig. 5 Transmission distance versus power in fiber cladding

一方面是由于熔接时光纤纤芯没有完全对准, 而造成纤芯光的“泄露”; 另一方面, 熔接点处由于加热扩芯效应^[13-14], 使得该处光纤纤芯的折射率分布发生改变, 从而使得模场半径增大, 在熔接点处形成一个锥形区, 如图 6 所示。

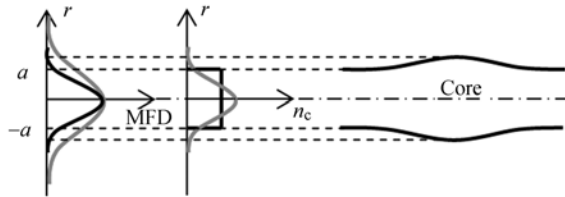


图 6 光纤熔接点处纤芯折射率与归一化模场变化示意图
Fig. 6 Schematic illustration of core index and normalization mode field near splice point

加热扩芯改变了纤芯的折射率分布, 增大了模场面积, 但会降低光纤波导的模场约束能力。文献[15]分析了大模场面积光纤的模场特性, 并指出模式之间的等效折射率差越小, 模式之间耦合的可能性越大。实验所用光纤在加热扩芯后, 不均匀的折射率分布引起的折射率差高于其等效折射率差(约为 4×10^{-4})。因此, 容易发生 LP₀₁ 模和 LP₁₁ 模之间的模式耦合, 使得更多的光进入包层。

另外, 扩芯后的光纤具有一定的聚焦特性, 可以等效为自聚焦透镜。当然, 熔接点的聚焦效应不是很明显, 表现为焦距很长。实验中, 在 3 m 处剥离的包层光最少, 说明光束能量更集中于纤芯, 此处应是光束的聚焦点。

为了排除光纤熔接点的影响, 在熔接点处涂上一段 10 cm 长的高折射率胶, 用来剥除由熔点处纤芯未精确对准带来的纤芯光“泄露”。实验发

现, 此时包层光功率随传输距离的变化趋势与图 5 中曲线后半段相同, 从而验证了前面分析的合理性。

实验结果表明, 光束的径向模场功率分布随传输距离的变化而变化。因此, 在不同的传输距离进行包层光剥离可以获得不同的输出光束质量。事实上, 工业应用中光纤激光器的传能光纤的长度一般来说要大于 5 m, 可以最大限度地剥除包层光功率而获得较好的光束质量。

5 剥离器在谐振腔内对光束质量的影响

实验中将 CPS 放在激光器的谐振腔内并测量了输出, 与剥离器放腔外时相比较, 结果如图 7 所示。剥离器在腔内和腔外时, 激光器的斜效率分别为 76.6% 和 72.1%; 最大泵浦功率为 436 W

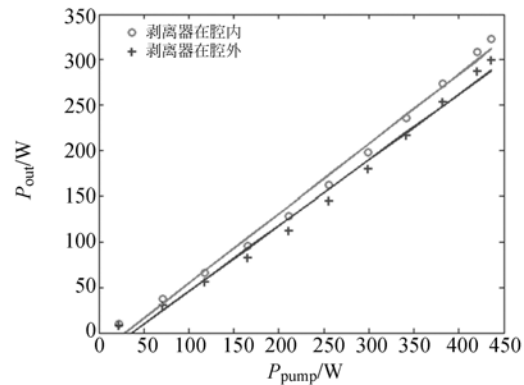


图 7 剥离器在腔内和腔外时激光器效率

Fig. 7 Slope efficiencies of fiber laser with CPS inside and outside cavity respectively

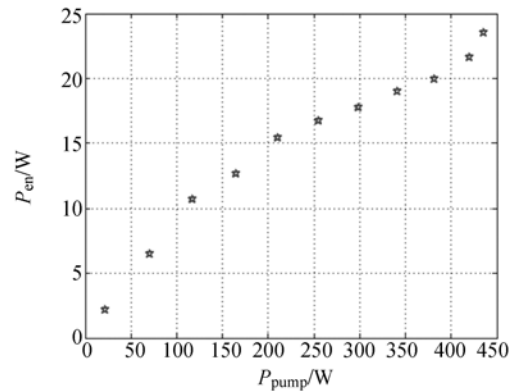
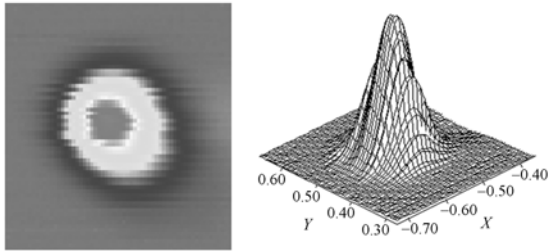


图 8 剥离器在腔内时的功率提升

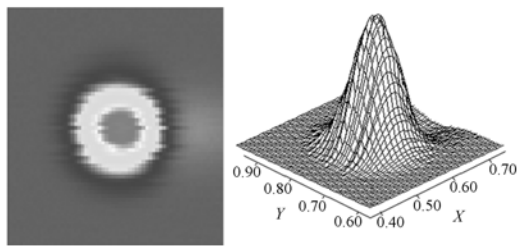
Fig. 8 Power enhancement with CPS inside cavity

时,光-光转换效率分别为 73.8% 和 68.6%。由此可知,剥离器放在腔内时,激光器效率较高。从图 8 可以看出,剥离器在腔内时,输出功率有明显的提升。在最大泵浦功率下,功率提升接近 25 W。

通过理论分析可知,导致这种差异的原因是腔内的剥离器起到了光阑选模的作用,使得光纤中的导模之一—— LP_{11} 模无法起振,从而腔内产生的激光模式只有 LP_{01} 模。而根据前面分析的



(a) 包层光剥离器在腔内
(a) CPS inside cavity



(b) 包层光剥离器在腔内和腔外
(b) Two CPSs inside and outside cavity

图 9 输出光束质量

Fig. 9 Output beam qualities

光纤中导模的径向功率分布结果可知,模式的阶数越低,其功率填充因子越高,即在纤芯中的光功率比例越高。由此可见,将剥离器放在腔内的优点是可以控制激光模式,改变光束的径向功率分布,从而增加输出功率。在这种情况下测量了光束质量,结果如图 9(a)所示。

由图 9(a)可知,剥离器在腔内时的光束质量 $M^2 = 1.24$,比剥离器在腔外时要差。初步分析,这可能与光纤光栅、光纤熔接点及传输长度等对导波模式的影响有关。因此,改变激光器的结构——在腔外又增加一个包层光剥离器,此时的输出激光光束质量如图 9(b)所示,测得的 $M^2 = 1.07$ 。

6 结 论

本文搭建了谐振输出的 300 W 全光纤激光器,其光束质量 $M^2 = 1.13$,光-光转换效率为 69%。理论分析了光纤导模沿光纤径向的功率分布。实验发现,随着光束在光纤中传输距离的增加,光纤中的包层光功率呈现出先减后增,续而保持不变的趋势,因此在传输距离上选择不同的长度剥除包层光,可以获得不同的光束质量。实际应用中,传输光纤(纤芯/包层为 20/400)的长度大于 5 m 时,输出激光的光束质量是最好的。在相同的泵浦条件下,当包层光剥离器在腔内时,相比于其在腔外时的输出功率要高,但是光束质量要差,但可以通过在腔外再加一包层光剥离器的方法来改善光束质量。

参考文献:

- [1] 郝明明,秦莉,朱洪波,等. 基于半导体激光短阵列的 976nm 高功率光纤耦合模块[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 895-903.
HAO M M, QIN L, ZHU H B, *et al.*. High power 976nm fiber coupled module based on diode laser short bars[J]. *Opt. and Precision Eng.*, 2013, 21(4): 895-903. (in Chinese)
- [2] LIMPET J, LIEM A, ZELLMER H, *et al.*. 500 W continuous-wave fiber laser with excellent beam quality[J]. *Electron. Lett.*, 2003, 39(8): 645-647.
- [3] LIU C H, EHLERS B, DOERFEL F, *et al.*. 810 W continuous-wave and single-transverse-mode fibre laser using 20 μm core Yb-doped double-clad fibre [J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(23): 1471-1472.
- [4] JEONG Y, SAHU J K, PAYNE D N, *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power[J]. *Opt. Exp.*, 2004, 12(25): 6088-6092.
- [5] LIMPET J, ROSER F, KLINGEBIEL S, *et al.*. The rising power of fiber lasers and amplifiers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, 13(3): 537-545.
- [6] LI H X, CHYR I, JIN X, *et al.*. >700 W continuous-wave output power from single laser diode bar [J]. *Electronics Letters*, 2007, 43(1): 27-29.
- [7] GAPONTSEV V, GAPONTSEV D, PLATONOV N, *et al.*. 2 kW CW ytterbium fiber laser with record diffraction-limited brightness[C]. *Lasers and*

- Electro-Optics Europe, CLEO/Europe, 2005 Conference on IEEE*, 2005:508.
- [8] IPG Photonics Corporation, IPG Photonics successfully tests world's first 10 kilowatt single-mode production laser[EB/OL]. http://www.ipgbeijing.com/Collateral/Documents/English-US/Summer_Newsletter_IPG_2009.pdf.
- [9] 段开掠,赵保银,赵卫,等. 1000 W 全光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, 36(12):3219.
DUAN K L, ZHAO B Y, ZHAO W, *et al.*. 1000 W all-fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(12):3219. (in Chinese)
- [10] 马阎星,肖虎,周朴,等. 全光纤激光器实现千瓦级功率输出[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(5):1137-1138.
MA Y X, XIAO H, ZHOU P, *et al.*. kW level fiber laser in all fiber format [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(5):1137-1138. (in Chinese)
- [11] 张利明,周寿桓,赵鸿,等. 1 kW 全光纤激光器实验研究[J]. *激光与红外*, 2012, 42(10):1127-1130.
ZHANG L M, ZHOU SH H, ZHAO H, *et al.*. Experiment research of 1 kW all fiber laser[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(10):1127-1130. (in Chinese)
- [12] GLOGE D. Weakly guiding fibers [J]. *Appl. Opt.*, 1971, 10(10):2252-2258.
- [13] MCLANDRICH M N. Core dopant profiles in weakly fused single mode fibers [J]. *Electron. Lett.*, 1988, 24(1): 8-10.
- [14] SHIRAIISHI K, AIZAWA Y, KAWAKAMI S. Beam-expanding fiber using thermal diffusion of the dopant [J]. *Lightwave Technol.*, 1990, 8(8):1151-1161.
- [15] 廖素英. 大模场光纤模场大小提升能力分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(12):120602.
LIAO S Y. Analysis of mode scalability in large mode area fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(12):120602. (in Chinese)

作者简介:



董繁龙(1984—),男,江苏徐州人,博士,2007年于电子科技大学获得学士学位,2010年于北京工业大学获得硕士学位,主要从事大功率光纤激光器方面的研究。E-mail: fanlongd@emails.bjut.edu.cn

导师简介:



王智勇(1970—),男,北京人,研究员,博士生导师,1992年于北京理工大学获得学士学位,1995年、1998年于北京工业大学分别获得硕士、博士学位,现为北京工业大学国家产学研激光技术中心副主任,大功率半导体激光器实验室主任,主要研究方向为大功率高光束质量半导体激光、高亮度半导体泵浦源、大功率光纤激光及其应用、激光非成像光学等技术。E-mail: zywang@bjut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)