

## 光纤弯曲对掺镱光纤激光器光束质量的影响

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:** 通过改变 F-P 腔全光纤激光器中的光纤盘绕半径, 对输出激光光束质量进行了研究。搭建了百瓦级全光纤激光器。最大泵浦功率为 436 W 的条件下, 获得了 300 W 波长 1 080 nm 的激光输出。光束质量  $M^2=1.13$ 。光-光转换效率为 69%。理论分析并计算了 20/400  $\mu\text{m}$  大模场面积双包层光纤中的两种导波模式  $LP_{01}$  模和  $LP_{11}$  模沿光纤径向的功率分布和弯曲损耗; 利用光纤弯曲选模方法, 实验上探究了光纤弯曲半径对输出激光模式及光束质量的影响。实验发现, 通过光纤弯曲方式可以有效地消除高阶模式, 再经过包层光剥除可以获得更好的光束质量  $M^2=1.06$ 。

**关键词:** 光纤激光器; 全光纤结构; 光束质量; 弯曲损耗; 包层光剥除

**中图分类号:** O436; TN252   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2014)11-3565-05

## Fiber bending impacts on beam quality of Yb-doped fiber laser

Dong Fanlong, Zhao Fangzhou, Ge Tingwu, Wang Zhiyong

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

**Abstract:** By changing the fiber coil radius of F-P cavity all-fiber laser, the output power of the laser in the cladding and the beam quality were studied. A hundreds-watts class all-fiber laser with the output power of 300 W and wavelength of 1 080 nm was build when the maximum pump power was 436 W. The beam quality was tested of  $M^2=1.13$  and optical-optical conversion efficiency was 69%. The radial power distribution of the fiber guided wave modes in 20/400  $\mu\text{m}$  large mode area double-clad fiber was analyzed. Also the fiber bend loss of two guided wave modes  $LP_{01}$  and  $LP_{11}$  was calculated. By fiber bending mode selection method, the fiber bending impact on the beam quality was theoretically and experimentally studied. It is found that, fiber bending mode can effectively eliminate high-order guided wave mode  $LP_{11}$  and a better beam quality factor  $M^2=1.06$  is obtained through stripping the light in fiber clad after fiber bending.

**Key words:** fiber laser; all-fiber structure; beam quality; bending loss; cladding light stripper

收稿日期: 2014-03-14; 修订日期: 2014-04-19

基金项目: 国家科技重大专项(2010ZX04013-052); 科研基地-科技创新平台-光纤激光器研究平台(PXM2011\_014204\_09\_000060)

作者简介: 董繁龙(1984-), 男, 博士生, 主要从事高功率光纤激光器方面的研究。Email: fanlongd@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 王智勇(1970-), 男, 博士生导师, 主要从事大功率半导体激光器、大功率半导体激光关键器件制备与集成、大功率光纤激光器方面的研究。Email: zywang@bjut.edu.cn

## 0 引言

由于高功率双包层光纤激光器具有输出功率高、光束质量好、冷却要求低、转换效率高以及运转寿命长等优点,目前在工业及军事领域已被广泛应用。近年来,随着泵浦耦合技术、光纤光栅等光纤器件与技术的发展<sup>[1]</sup>,高功率全光纤激光器的输出功率也在不断提高<sup>[2-5]</sup>。国外,2006年,美国 IPG 光子公司报道了单模连续激光 3 kW 的掺镱全光纤激光器<sup>[6]</sup>;2009年6月,又宣布实现输出功率达 10 kW 的连续单模光纤激光器<sup>[7]</sup>。国内,上海光学精密机械与物理研究所、国防科学技术大学、中国电子科技集团第十一研究所等单位以及武汉锐科、武汉梅曼等激光器厂商都在高功率光纤激光器的研究领域取得了突破性进展,多家单位已经成功实现千瓦级以上的输出<sup>[8-12]</sup>。

描述激光器输出特性的参数,除了输出功率的大小之外,输出光束的功率的分布(光束质量)也很重要。输出功率和光束质量共同决定了激光器的性能和用途。具有较好光束质量的单模输出光纤激光器已成为当前研究的热点。因此,对激光器的光束质量的研究十分必要。

众所周知,光纤的波导结构在一定程度上决定了输出激光的光束质量的好坏。比如,可以采用小芯径的单模光纤来实现基模的输出。但是,另一方面小芯径的单模光纤又限制了输出功率的提升。因此,高功率光纤激光器大多采用允许几个低阶模式传输的大模场面积双包层光纤作为增益和传输介质。当然,由此带来的高阶模的产生,以及光束质量的变差是不可避免的。实际上,人们往往通过各种方法将高阶模式消除,以实现较好的光束质量的输出。

文中采用谐振输出的方式搭建了全光纤结构激光器,利用纤芯/包层直径为 20/400  $\mu\text{m}$  的双包层光纤实现了 300 W 的激光输出,光-光转换效率为 69%。理论分析并计算了光纤导模沿光纤径向的功率分布和光纤的弯曲损耗,实验上采用光纤弯曲选模的方法,对光纤弯曲前后激光光束质量的改变进行了研究。

## 1 激光器结构及结果

300 W 全光纤连续激光器的结构如图 1 所示。采用 18 个最大输出功率为 25 W、中心波长为 975 nm 带尾纤输出半导体激光器作为泵浦源,并通过 19 $\times$ 1 泵浦合束器进行合束,采用一段 20 m 长的 Nufern 公

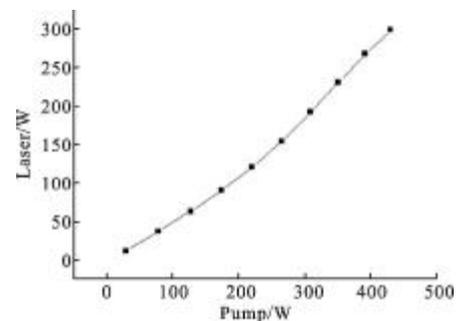
司生产的纤芯/包层直径为 20/400  $\mu\text{m}$  大模场面积双包层掺镱光纤作为增益介质,该增益光纤对波长 975 nm 泵浦光的泵浦吸收系数为 1.26 dB/m。采用一对光纤光栅作为谐振腔反射镜,其中高反射率光栅对 1080 nm 波长的激光的反射率为 99%,透射光栅的反射率为 10%。采用自行研制的光纤端帽作为输出端,并在输出端前通过包层功率剥离器(Cladding Power Stripper, CPS)对光纤包层中的残余泵浦光进行了剥除。



图 1 光纤激光器原理图

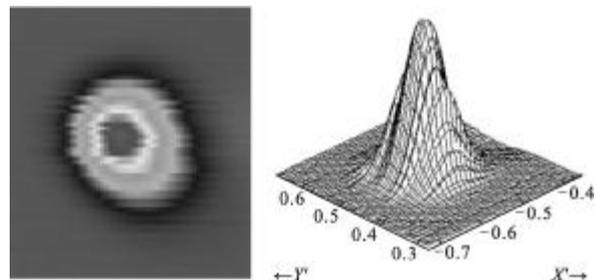
Fig.1 Schematic illustration of all-fiber laser

另外,笔者对激光器的关键器件,如增益光纤、包层功率剥离器、光纤熔接点等进行了冷却处理,最终获得了稳定的激光输出。激光器输出功率随泵浦功率的变化曲线如图 2(a)所示。激光器的斜效率为 72%。最大泵浦功率为 436 W 时,获得了 300 W 的激光输出,光-光转换效率为 69%。利用光束质量分析仪测得输出光斑如图 2(b)所示,并测得光束质量  $M^2=1.13$ 。



(a) 激光器输出功率

(a) Power of output laser



(b) 输出光斑光束质量

(b) Laser beam quality

图 2 激光器输出特性

Fig.2 Output of fiber laser

为了获得更好的光束质量, 下面将对激光器的输出特性进行理论分析, 并通过改变激光器增益光纤和传输光纤的弯曲半径来实现模式选择, 从而获得更好的光束质量。

## 2 理论分析与数值计算

对阶跃型折射率光纤中的一个导模来说, 其场量在纤芯中呈振荡分布, 在包层中呈指数衰减分布, 因此导波模式所携带的电磁能量一部分在纤芯中传输, 一部分在包层中传输。而光纤的弯曲会使更多的光进入包层。下面将对 Nufern 公司生产的商用纤芯/包层 20/400 μm 大模场面积光纤沿径向的模式功率分布以及弯曲损耗进行理论分析和数值计算。

### 2.1 光纤导波模式的功率分布

D.Gloge 采用弱波导方法对光纤中某个特定的导波模式的分析得到, 光纤纤芯的光功率填充因子  $\Gamma$  的计算公式为<sup>[13]</sup>:

$$\Gamma = \frac{P_{\text{core}}}{P_{\text{total}}} = b \left[ 1 - \frac{J_1(V\sqrt{1-b})}{J_{l+1}(V\sqrt{1-b})J_{l-1}(V\sqrt{1-b})} \right] \quad (1)$$

式中: 第一类 Bessel 函数中的参数  $b = \frac{n_{\text{eff}}^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2}$  为归一化相位常数。显然, 光纤包层中的光功率所占比例为  $1 - \Gamma$ 。

利用公式(1), 计算出在不同的归一化频率  $V$  值下, 光纤中 LP<sub>01</sub> 模和 LP<sub>11</sub> 模的光功率填充因子  $\Gamma$  的值, 并绘制功率分布曲线如图 3 所示。图中给出了不同的  $V$  值下, 光纤包层中 LP<sub>01</sub> 模和 LP<sub>11</sub> 模的光功率所占各自总功率的比重。

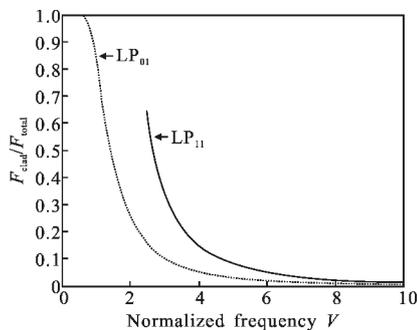


图 3 不同的  $V$  值下, LP<sub>01</sub> 模和 LP<sub>11</sub> 模的径向光功率分布

Fig.3 Radial power distribution of LP<sub>01</sub> and LP<sub>11</sub> mode for different  $V$

实验中所用 Nufern 公司生产的 20/400 μm 大模场面积光纤纤芯的归一化频率  $V=3.49$  (对波长  $\lambda=$

1.08 μm)。通过模式分析, 该光纤只允许 LP<sub>01</sub> 模和 LP<sub>11</sub> 模两个导波模式的传输。数值计算表明, 当  $V=3.49$  时, LP<sub>01</sub> 模和 LP<sub>11</sub> 模在光纤包层中的光功率占各自总功率的比重分别为 7%和 22%。模式的阶数越高, 该模式在包层中传输的功率也越多。为了获得较好地光束质量必须剥除纤芯中的高阶模式, 最常用的选模方法是光纤弯曲选模法。

### 2.2 光纤的弯曲损耗

光纤发生弯曲时, 当不能满足光线在芯内的全反射条件后, 将会有更多的光线进入包层中, 形成消逝波。光纤的导光性能下降, 导致光能量衰减。

多模光纤弯曲损耗的计算公式为<sup>[14]</sup>:

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{\pi\gamma R}} \frac{\alpha\kappa^2}{V^2} \exp \left[ 2\gamma a - \frac{2\gamma^3}{3\beta^2} R \right]$$

$$\kappa = \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta^2}, \quad \gamma = \sqrt{\beta^2 - n_2^2 k_0^2}$$

$$V = a \sqrt{n_1^2 k_0^2 - n_2^2 k_0^2} \quad (2)$$

式中:  $a$  为纤芯半径;  $R$  为光纤弯曲的曲率半径。

光纤弯曲时, 曲率半径在一个临界值以前 ( $R > R_c$ ), 因弯曲而引起的损耗很小, 以至于可以忽略; 在临界值以后 ( $R < R_c$ ), 损耗按指数规律迅速增加。因此, 确定光纤的临界曲率半径, 对于光纤的设计和应用具有重要意义。对多模光纤, 其临界曲率半径可近似为:

$$R_c = \frac{3\beta^2}{2\gamma^3} (0.347 + 2\gamma\alpha) \quad (3)$$

引入横向归一化相位常数  $U = a \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta^2}$  和横向归一化衰减常数  $W = a \sqrt{\beta^2 - n_2^2 k_0^2}$ , 上式可写为:

$$R_c = \frac{3a(a^2 n_1^2 k_0^2 - U^2)}{2W^3} (0.347 + 2W) \quad (4)$$

所用光纤的纤芯、包层折射率分别为  $n_1=1.4521$ ,  $n_2=1.4508$ 。通过解 LP 模式的特征方程可得到纤芯内两个导模的  $U$ 、 $W$  的值, 如表 1 所示。

表 1  $V=3.49$  时, 两导模  $U$ 、 $W$  的值

Tab.1 When  $V=3.49$ , values of  $U$  and  $W$  for two guide-modes

Mode	$U$	$W$
LP <sub>01</sub>	1.847	2.973
LP <sub>11</sub>	2.875	1.979

根据公式(2)通过数值计算求得,光纤中 LP<sub>01</sub> 模和 LP<sub>11</sub> 模的弯曲损耗如图 4 所示。

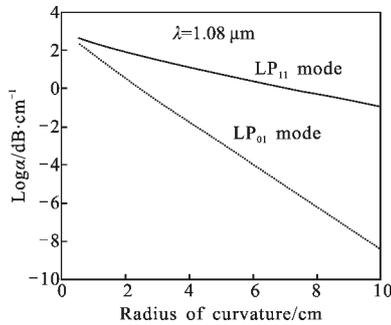


图 4 LP<sub>01</sub> 模和 LP<sub>11</sub> 模的弯曲损耗  
Fig.4 Bend loss of LP<sub>01</sub> and LP<sub>11</sub> mode

同样的,可以计算出光纤中 LP<sub>01</sub> 模和 LP<sub>11</sub> 模的临界曲率半径分别为 2.5 cm 和 6 cm。理论分析表明<sup>[15-17]</sup>,模式阶数越高,对弯曲越敏感。

### 3 实验结果及讨论

分别对激光器中增益光纤及传输光纤进行了弯曲盘绕实验。实验中,光纤将被盘绕成不同半径的圆周。而在光纤的输出端笔者加上一个包层光剥离器,该剥离器的最小包层光衰减>15 dB,能够完全剥除在光纤包层中传输的光功率。

首先对腔内的掺增益光纤弯曲损耗进行了实验验证。在不弯曲光纤(实际上 R>20 cm,此时光纤的弯曲损耗可以忽略)的情况下,测量输出端的光功率。然后,将光纤的一小段盘绕成半径分别为 8 cm、6 cm、4 cm、2.5 cm 的圆周。在同样的注入光功率下,分别测量了输出端的光功率。只将光纤盘绕一圈(如图 5 所示),所以单位长度上的弯曲损耗为:

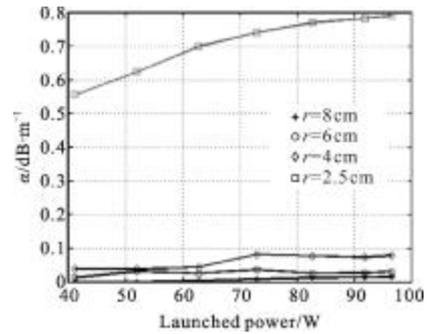
$$\alpha = \frac{P_{cl}}{2\pi R P_0} \quad (5)$$



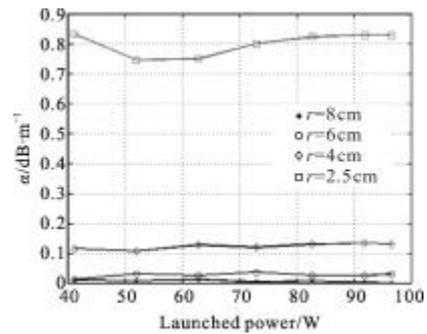
图 5 光纤盘绕实物图  
Fig.5 Picture of coiled fiber

公式: P<sub>cl</sub> 为由光纤弯曲而泄露到包层的光功率; P<sub>0</sub> 为光纤未弯曲时的功率。采用同样的方法,可以对腔外的传输光纤做相同的处理。

在不同的泵浦功率下,当盘绕半径分别为 8 cm、6 cm、4 cm 和 2.5 cm 时,测得的弯曲损耗的结果如图 6 所示。



(a) 增益光纤弯曲损耗  
(a) Bend loss of gain fiber



(b) 传输光纤弯曲损耗  
(b) Bend loss of delivery fiber

图 6 弯曲损耗

Fig.6 Fiber bend loss

从图 6 中可以看出,不管是对增益光纤(腔内)还是传输光纤(腔外),在光纤盘绕半径大于 8 cm 的情况下,弯曲损耗很小,可以忽略不计;当光纤盘绕半径小于 4 cm 时,光纤的弯曲损耗明显,达到 0.8 dB。因此,该光纤的临界弯曲半径约为 4~5 cm,这与理论分析结果相符。

由前面的分析,当光纤弯曲半径在 4~5 cm 变化时,光纤的弯曲损耗主要来自 LP<sub>11</sub> 模,而 LP<sub>01</sub> 模的弯曲损耗很小。事实上,利用 PRIMES 光束质量诊断仪对光纤弯曲后出射光的光束质量进行了测量,发现弯曲后的光束质量更好,光束质量 M<sup>2</sup>=1.06。图 7 给出了光纤弯曲后输出光束质量。

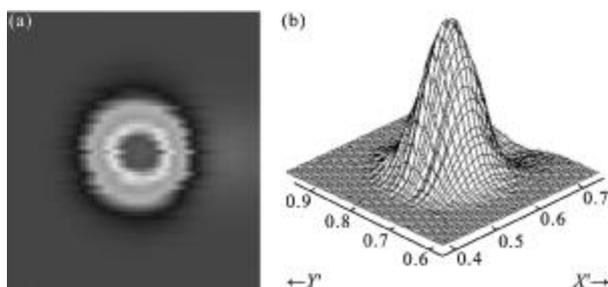


图 7 光纤弯曲后, 输出光束质量

Fig.7 Beam quality after fiber bending

## 4 结 论

搭建了谐振输出的 300 W 全光纤激光器。光-光转换效率为 68.6%。光束质量  $M^2=1.13$ 。理论上分析了光纤导模沿光纤径向的功率分布, 并通过改变光纤的弯曲半径大小发现, 随着弯曲半径的减小, 更多的光功率“泄露”到包层, 传输损耗增大, 但在剥除包层光后, 光束质量会变得更好。

## 参考文献:

- [1] Liu Deming, Yan Changling. Key technologies and applications for high power fibre laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35: 105-109. (in Chinese)  
刘德明, 阎嫦玲. 高功率光纤激光器的关键技术及应用 [J]. *红外与激光工程*, 2006, 35: 105-109.
- [2] Liu C H, Galvanauskas A, Ehlers B, et al. 810-W single transverse mode Yb-doped fiber laser [C]//*Proc Advanced Solid State Photonics*, 2004.
- [3] 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]. *Optics Express*, 2004, 12: 6088-6092.
- [4] Limpert 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.
- [5] Gapontsev D. 6 kW CW single mode ytterbium fiber laser in all-fiber format[C]//*Solid State and Diode Laser Technology Review*, 2008.
- [6] Fomin V, Mashkin A, Abramovet M, et al. 3 kW Yb fibre lasers with a single mode output [C]//*International Symposium on High-Power Fiber Lasers and Their Applications*, 2006.
- [7] 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](http://www.ipgbeijing.com/Collateral/Documents/English-US/Summer_Newsletter_IPG_2009.pdf).
- [8] Zhou Jun, Lou Qihong, Zhu Jianqiang, et al. A continuous-wave 714 W fiber laser with China-made large-mode-area double-clad fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(7): 1119-1120 (in Chinese)  
周军, 楼祺洪, 朱健强, 等. 采用国产大模场面积双包层光纤的 714 W 连续光纤激光器 [J]. *光学学报*, 2006, 26(7): 1119-1120.
- [9] Li Chen, Yan Ping, Chen Gang, et al. A continuous-wave 700W fiber laser with China-made domestic Yb doped double-clad fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers* [J]. *Chin J Lasers*, 2006, 26: 738. (in Chinese)  
李晨, 闫平, 陈刚, 等. 采用国产掺镱双包层光纤的光纤激光器连续输出功率突破 700 W[J]. *中国激光*, 2006, 26: 738.
- [10] Zhao Hong, Zhou Shouhuan, Zhu Chen, et al. High power fiber laser output power exceeding 1.2 kW [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 81.  
赵鸿, 周寿桓, 朱辰, 等. 输出功率超过 1.2 kW 的大功率光纤激光器[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(1): 81.
- [11] Lou Qihong, He Bing, Xue Yuhao. 1.75 kW domestic Yb doped double clad fiber laser [J]. *Chin J Lasers*, 2009, 36(5): 1277. (in Chinese)  
楼祺洪, 何兵, 薛宇豪, 等. 1.75 kW 国产掺 Yb 双包层光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, 36(5): 1277.
- [12] Li Wei, Chen Xi, Wu Zichun, et al. Combining power of high power fiber laser exceeds 3 kW [J]. *High Power Laser and Partical Beams*, 2010, 22(2): 242. (in Chinese)  
李伟, 陈曦, 武子淳, 等. 大功率光纤激光合成功率突破 3 kW[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(2): 242.
- [13] Gloge D. Weakly guiding fibers [J]. *Appl Opt*, 1971, 10: 2252-2258.
- [14] Marcuse D. Curvature loss formula for optical fibers [J]. *Opt Soc Am*, 1976, 66: 216-220.
- [15] Marcuse D. *Theory of Dielectric Optical Waveguides* [M]. New York: Academic, 1974.
- [16] Marcatili E A J. Bends in optical dielectric guides [J]. *Bell Syst Tech*, 1969, 48: 2013-2132.
- [17] Gloge D. Bending loss in multimode fibers with graded and ungraded core index[J]. *Appl Opt*, 1972, 11: 2506-2513.