

掺 Yb^{3+} 增益导引-折射率反导引光纤的制备及模式特性研究

李玮楠 陆 敏 彭 波

(中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119)

摘要 研制了 Yb^{3+} 掺杂增益导引-折射率反导引(Yb^{3+} GGIAG)光纤的纤芯和包层玻璃材料,采用套管法拉制了 Yb^{3+} GGIAG 光纤,纤芯直径为 $120\ \mu\text{m}$,内包层直径为 $220\ \mu\text{m}$,外包层直径为 $260\ \mu\text{m}$,纤芯与包层折射率差 $\Delta n = -0.00094$ 。测试不同长度的 Yb^{3+} GGIAG 光纤,发现当单模信号光通过 Yb^{3+} GGIAG 光纤时,光束质量因子 $M_x^2 \approx 2.724$; $M_y^2 \approx 2.642$,结果表明该光纤具有近似单模的特性,经计算光纤模场直径大于 $150\ \mu\text{m}$ 。

关键词 光纤光学;掺 Yb^{3+} 增益导引-折射率反导引光纤;光束质量因子;模场直径;单模

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100109

Study on Characteristic of Yb^{3+} -Gain Guided Index-Antiguide Fiber

Li Weinan Lu Min Peng Bo

(State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

Abstract The core glass and cladding glass of gain guided index-antiguide (GGIAG) fiber doped with Yb^{3+} are prepared and Yb^{3+} GGIAG fiber with core diameter of $120\ \mu\text{m}$, inner cladding diameter $220\ \mu\text{m}$ and outer cladding diameter $260\ \mu\text{m}$ is drawn by the rod-in tube technique. Yb^{3+} GGIAG fiber has a lower core refractive index than the surrounding cladding's, $\Delta n = -0.00094$. The beam quality factors in both horizontal and vertical directions are observed, $M_x^2 \approx 2.724$ and $M_y^2 \approx 2.642$ when signal light (at $1040\ \text{nm}$) with single mode is propagating in Yb^{3+} GGIAG fiber with different length, which indicates single mode approximation behavior of Yb^{3+} GGIAG fiber. The mode field diameter of Yb^{3+} GGIAG is calculated to be more than $150\ \mu\text{m}$.

Key words fiber optic; Yb^{3+} doped-gain guided index-antiguide fiber; beam quality factors; mode field diameter; single mode

OCIS codes 160.5690; 060.2270; 060.2310

1 引 言

高功率光纤放大器和激光器在国防、激光加工等领域具有十分广泛的应用。在高功率的抽运下,当芯径较小时,纤芯和光纤端面容易产生灾难性光学损伤;而当芯径较大时,光纤将会产生因受激拉曼散射和受激布里渊散射引起的非常严重的非线性效应,从而影响激光输出的光束质量。增大光纤纤芯直径可以克服上述问题。增大纤芯直径一方面可提高激光损伤阈值,降低非线性效应,增加光纤储能,提高脉冲能量;另一方面可大大增加纤芯和内包层

横截面积之比,提高了光纤对抽运光的吸收效率,实现较短光纤的高功率激光输出。但目前已实现单模激光输出的阶跃型大模场光纤的芯径最大为 $40\ \mu\text{m}$,而光子晶体光纤最大芯径为 $100\ \mu\text{m}$,当纤芯直径大于 $100\ \mu\text{m}$ 时,近场衍射会严重影响激光器的光束质量^[1,2]。激光组束是目前国际上激光技术领域的研究热点,其目的是将多束激光组合成一束输出,是大幅提升激光输出功率和亮度的有效手段^[3~5]。但激光相关组束要求所有阵元输出光束的波长和偏振方向一致,并且要求对每路光束的相位

收稿日期: 2010-06-22; 收到修改稿日期: 2010-10-14

基金项目: 国家自然科学基金(51002181,60808023)资助课题。

作者简介: 李玮楠(1976—),女,博士,副研究员,主要从事稀土掺杂光功能材料及器件等方面的研究。

E-mail: liweinan@opt.ac.cn

进行严格的检测和控制,实现起来较为困难;尽管已实现了千瓦级功率输出,但要输出更高功率仍有几个关键问题亟待解决,如尽量提高单根光纤激光器的输出功率、解决组束元件在高功率下的形变问题、设计新型阵元高效组束方案等。因此,研制一种具有超大模场面积单模光纤显得尤为重要。

增益导引—折射率反导引型(GGIAG)光纤是一种新型光纤,它的纤芯折射率小于包层折射率(即 $\Delta n < 0$),因此光在纤芯与包层界面上不能按照全内反射原理进行传输,除存在少量掠射光外,纤芯传输的大部分光会泄漏到包层中^[6]。然而,由于纤芯含有增益介质就可将信号光能量放大。

目前研究人员采用侧面抽运和端面抽运技术已实现了掺 Nd^{3+} GGIAG 磷酸盐玻璃光纤的单模激光输出,其中纤芯直径为 100, 200, 300 和 400 μm ($\Delta n = -0.0045$)^[7~9]。与四能级结构的 Nd^{3+} 相比,两能级结构的 Yb^{3+} 不存在激发态吸收和浓度猝灭,可极大地降低材料的热负荷;能量转换效率高,荧光寿命长,能有效储存能量,所以掺 Yb^{3+} 激光材料被视为发展高功效、高功率激光器的一个主要途径。最新研究表明掺 Yb^{3+} 光纤有望应用于光纤基惯性聚变激光驱动器中^[10]。该激光驱动器共需要 10^7 根纤芯直径为 100 μm 的掺 Yb^{3+} 大模场光纤,若每根光纤实现 10 mJ,那么激光驱动器可实现约 300 kJ 的总能量。

本文采用高温熔制工艺制备了纤芯玻璃材料和包层玻璃材料,采用套管法拉制了掺 Yb^{3+} GGIAG 硅酸盐玻璃光纤。实验测试表明该光纤具有近似单模特性,光纤模场直径大于 150 μm 。

2 材料实验

2.1 光纤预制棒制备

采用高温熔融工艺制备纤芯玻璃材料。组成以摩尔百分比为 $x\text{Al}_2\text{O}_3 : x\text{SiO}_2 : x\text{B}_2\text{O}_3 : x\text{ZnO} : x\text{ZrO}_2 : x\text{Na}_2\text{O} : x\text{TiO}_2 : x\text{Yb}_2\text{O}_3 = 8.6 : 45.8 : 14.5 : 5.5 : 3.5 : 14.5 : 0.5$ 。将混合均匀的原料 950 g 逐次加入由硅碳棒加热的温度为 1340 $^{\circ}\text{C}$ 的 700 mL 铂金锅中,搅拌、澄清、均化玻璃液 3.5 h;待炉温降至 1000 $^{\circ}\text{C}$,将高温均化好的玻璃液浇注在事先预热的铸铁模具上,然后置于 560 $^{\circ}\text{C}$ 退火炉中进行精密退火,最后以 3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 降温至室温。得到的均质玻璃加工成 $\Phi 12 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的圆玻璃棒。

在纤芯玻璃材料配方的基础上,微调玻璃组分(即不含有 Yb_2O_3 ,仅含有 Al_2O_3 , SiO_2 , B_2O_3 , ZnO ,

ZrO_2 , Na_2O 和 TiO_2 7种组份,并微调这7种组份的摩尔百分比),使得包层玻璃材料与纤芯玻璃材料具有相近的玻璃软化温度、转变温度、热膨胀系数以及色散特性等。借鉴纤芯玻璃的制备工艺获得包层玻璃材料,得到的均质玻璃加工成内径为 12 mm、外径为 22 mm、长为 150 mm 的内包层玻璃管以及内径为 22 mm、外径为 26 mm、长为 150 mm 的外包层玻璃管。对玻璃棒和玻璃管的光学加工要求为:面形精度小于等于 $1/8\lambda$,端面与轴线垂直度小于等于 $10'$,面面平行度小于等于 $15''$,双面光洁度为 II 级,内管壁光洁度 III 级。

2.2 Yb^{3+} GGIAG 光纤拉制

采用套管法拉制光纤,拉丝温度为 810 $^{\circ}\text{C}$,进料速度为 1.5 mm/min,拉丝速度为 5 cm/min。在 587.6 nm 波长处,采用 WYV 型 V 棱镜折射仪(上海精密光学仪器厂,测试精度为 $\pm 5 \times 10^{-5}$)测得 Yb^{3+} GGIAG 光纤的折射率,测试波长为 589.3 nm,其中纤芯折射率 $n_1 = 1.57224$,纤芯直径为 120 μm ;内包层折射率 $n_2 = 1.57318$,内包层直径为 220 μm ;外包层折射率 $n_3 = 1.50552$,外包层直径为 260 μm ;纤芯与内包层折射率差为 $\Delta n = -0.00094$ (即 1.57224 与 1.57318 的差值)。

2.3 Yb^{3+} GGIAG 模式特性测试

实验中分析了 Yb^{3+} GGIAG 光纤的模式特性,其测试装置如图 1 所示。其中透镜 1,透镜 2 和透镜 3 均为显微物镜,数值孔径 $NA = 0.25$,信号光输出尾纤纤芯直径为 4 μm ,其数值孔径 $NA = 0.1$ 。当测试光路中没有放置 Yb^{3+} GGIAG 光纤时,测试了信号光的模式,然后在光路中依次增加长度为 50, 80, 100 和 120 mm 的 Yb^{3+} GGIAG 光纤,并测试通过信号光后光纤的模式。

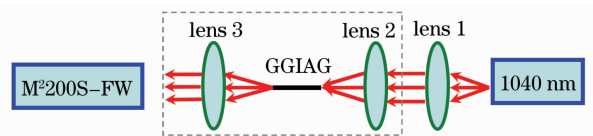


图 1 Yb^{3+} GGIAG 光纤模式测试光路图
Fig. 1 Testing mode device of Yb^{3+} GGIAG

3 结果与讨论

图 2 为 Yb^{3+} GGIAG 光纤端面的扫描电子显微镜(SEM)图(设备型号为 JEOL-6700F, Tokyo, Japan),图中标出了纤芯(Core)、内包层、外包层。由于光纤芯径较大,采用光纤切割刀切割时光纤端面不是很完好,增大了对抽运光的散射。这势必降

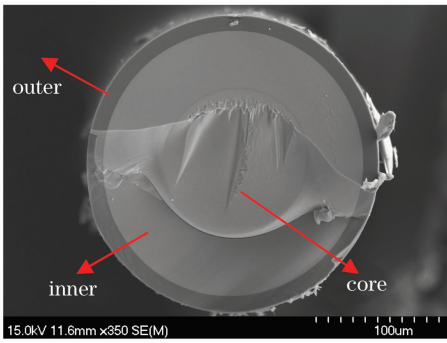


图 2 Yb³⁺ GGIAG 光纤端面的 SEM 图

Fig. 2 SEM of Yb³⁺ GGIAG end face

低 Yb³⁺ GGIAG 光纤对抽运光的耦合效率。

由于光纤端面存有缺陷会降低对抽运光的耦合效率，所以实验中没有对 Yb³⁺ GGIAG 光纤的增益特性进行测试，而是验证了 Yb³⁺ GGIAG 光纤的模式特性。众所周知，光纤的模式只取决于光纤的结构参数，即纤芯直径、包层与纤芯折射率差，而与通过光纤的信号光或抽运光的模式无关。也就是说，如果光纤为单模光纤，那么单模信号光或抽运光通过该光纤时，输出单模光束；多模光源通过该光纤时，输出光束为单模。如果光纤为多模光纤，那么无论是多模光源或单模光源通过该光纤后，输出光束均为多模。

以此为依据，实验中对 Yb³⁺ GGIAG 光纤的模式特性进行验证。当光路中没有 Yb³⁺ GGIAG 光纤时(图 1 中的虚线部分)，信号光经透镜 1 准直后进入 M²200S-FW 光束质量分析仪(美国 Ophir-spicon 公司生产)，测得光束质量因子 M_x²=1.12, M_y²=1.08, 证明信号光为单模，图 3 为其光束模式图。当光路中增加了 Yb³⁺ GGIAG 光纤后，单模信号光经透镜 1、透镜 2 准直耦合进入不同长度的 Yb³⁺ GGIAG 光纤，输出的信号光经透镜 3 准直进

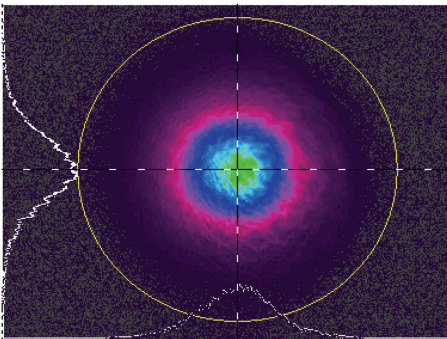


图 3 1040 nm 信号光模式图

Fig. 3 Beam-profile image of the 1040 nm signal light output beam

入光束质量分析仪，获得较好的光束质量因子。图 4 为信号光通过长度为 120 mm 的 Yb³⁺ GGIAG 光纤后的光束模式(图 4 中插图)和光束宽度图。该图描述了 x, y 方向的光束宽度，图的横坐标为 z 轴，即光束宽度在 z 轴的距离，纵坐标为光束宽度。表 1 列出了信号光通过不同长度 Yb³⁺ GGIAG 光纤后的光束质量因子及模场直径。可以看出，单模信号光经不同长度 Yb³⁺ GGIAG 光纤后，光束质量因子 M²<3, 表明该光纤具有近似的单模特性。

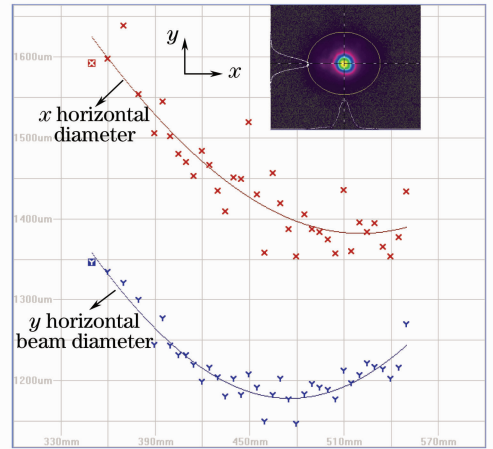


图 4 x/y 轴光束宽度(l=120 mm)

Fig. 4 Measured beam diameter in both horizontal (l=120 mm)

表 1 不同长度 Yb³⁺ GGIAG 光纤的光束质量因子
Table 1 Beam quality factors of Yb³⁺ GGIAG with different lengths

Fiber length /mm	M _x ²	M _y ²	W _x /μm	W _y /μm
50	2.711	2.703	156.158	155.697
80	2.698	2.700	155.409	155.524
100	2.724	2.642	156.914	152.197
120	2.717	2.654	156.504	152.875

已知光纤的光束质量因子 M², 光纤的模场直径可为^[8]。

$$M^2 = \frac{W\theta\pi n}{4\lambda}, \quad (1)$$

式中 λ 为真空中的激光波长; n 为介质折射率(约 1); W 为模场直径; θ 为发散角; M² 为光束质量因子。依据(1)式可计算出不同长度 Yb³⁺ GGIAG 光纤的模场直径。正如表 1 所示，模场直径均大于 150 μm。

4 结 论

通过高温熔制工艺获得纤芯和包层玻璃材料,采用套管法拉制了 Yb^{3+} GGIAG 光纤。测试发现当 1040 nm 单模信号光在长度分别为 50, 80, 100 和 120 mm 的 Yb^{3+} GGIAG 光纤传输时,光束质量因子 $M_x^2 \approx 2.724$; $M_y^2 \approx 2.642$, 表明该光纤具有近似单模特性,经计算光纤模场直径大于 150 μm 。

参 考 文 献

- 1 Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne *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 J. Limpert, O. Schmidt, J. Rothhardt *et al.*. Extended single-mode photonic crystal fiber lasers [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7): 2715~2720
- 3 Liu Zejin, Zhou Pu, Hou Jing *et al.*. Research of coherent beam combining using actively phase-controlling [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 518~523
刘泽金, 周 朴, 侯 静等. 主动相位控制光纤激光相干合成的研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 518~523
- 4 Zhou Pu, Liu Zejin, Xu Xiaojun. Comparative of coherent

- combining and incoherent combining of fiber lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 276~280
- 周 朴, 刘泽金, 许晓军. 光纤激光相干合成与非相干合成的比较[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 276~280
- 5 Fu Yongjun, Mao Xiangqiao, Peng Jian *et al.*. Measurement of pump absorption of rare-earth doped double-clad fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 166~170
傅永军, 毛向桥, 彭 健等. 稀土掺杂双包层光纤的抽运吸收的测试[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 166~170
 - 6 A. E. Siegman. Propagating modes in gain-guided optical fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 2003, **20**(8): 1617~1628
 - 7 A. E. Siegman, Ying Chen, Vikas Sudesh *et al.*. Confined propagation and near single-mode laser oscillation in a gain-guided, index antiguided optical fiber [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(25): 251101
 - 8 Ying Chen, Vikas Sudesh, Timothy McComb. Lasing in a gain-guided index antiguided fiber [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **8**(24): 1683~1688
 - 9 V. Sudesh, T. McComb, Y. Chen *et al.*. Diode-pumped 200 μm diameter core, gain-guided, index-antiguided single mode fiber laser [J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **90**(3-4): 369~372
 - 10 C. Labaune, D. Hulin, A. Galvanauskas *et al.*. On the feasibility of a fiber-based inertial fusion laser driver [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(15-16): 4075~4080