

掺钕双包层大模场保偏光子晶体光纤激光器

张 峰, 张海鹏, 陈 涛, 宋 朋, 周 城

济南大学物理科学与技术学院, 山东 济南 250022

摘要 采用掺钕双包层大模场保偏光子晶体光纤(PCF)作为增益介质,实现了 1.06 μm 连续激光运转。实验采用线型谐振腔,光纤一端研磨成 0° 角作为自由耦合输出端,并提供 4%的反馈光用于维持谐振腔内的激光振荡。激光器阈值为 2.4 W,斜效率为 18.8%。当抽运功率达到 30 W 时,最大输出功率为 4.94 W,光束质量因子为 1.30,偏振串音为 -7.9 dB,输出激光的中心波长为 1062.7 nm。实验结果表明,掺钕双包层大模场 PCF 具有良好的单模传输特性和保偏性能,有利于激光器实现高功率高光束质量的激光输出。

关键词 激光器; 光子晶体光纤; Nd^{3+} ; 连续激光; 自由耦合输出; 光束质量因子

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0201020

Nd-Doped Double-Clad Large-Mode-Area Polarization-Maintaining Photonic Crystal Fiber Laser

Zhang Feng, Zhang Haikun, Chen Tao, Song Peng, Zhou Cheng

School of Physics and Technology, University of Jinan, Jinan, Shandong 250022, China

Abstract A continuous wave laser based on Nd-doped double-clad large-mode-area polarization-maintaining photonic crystal fiber (PCF) is realized at 1.06 μm . A linear-cavity is employed, and one end face of the fiber is polished to 0° providing 4% feedback serve as a cavity mirror and a free output coupler. The slope efficiency obtained is 18.8% with a threshold pump power of 2.4 W. The maximum output power is 4.94 W and the beam quality factor is 1.30, when the pump power is 30 W. The measured central wavelength is 1062.7 nm and the polarized crosstalk factor is -7.9 dB. Experimental results show that the Nd-doped double-clad large-mode-area PCF has well single mode propagation and polarization-maintaining characteristics, and is beneficial to achieve high power laser output with high beam quality.

Key words lasers; photonic crystal fiber; Nd^{3+} ; continuous wave laser; free output coupler; beam quality factor

OCIS codes 140.3510; 060.5295; 140.3530; 140.3295

1 引 言

光子晶体光纤(PCF)具有结构设计灵活、无截止单模等特性,在光纤激光器、光纤传感、光纤通信、非线性光学等方面具有重要的应用前景^[1-3]。其中,双包层大模场光子晶体光纤(LMA PCF)具有极大的模场面积和较高的抽运效率,在高功率高光束质量激光器中具有独特优势^[4-6]。目前,已经报道的增益型光子晶体光纤主要有铟、镱、铥等稀土离子掺杂光纤以及钕、铽等金属离子掺杂光纤。铽离子(Yb^{3+})能级结构简单,可实现高浓度掺杂,并且掺 Yb^{3+} 光子晶体光纤在满足超快激光条件上具有优势,是报道最为广泛的一种微结构光纤^[7-9]。相比而言,钕离子(Nd^{3+})能级结构丰富,可以实现 1.06 μm 和 1.3 μm 激光输出,在激光打标、近红外荧光成像等领域有重要应用, Nd^{3+} 三能级运转还可以输出 900 nm 波段的激光,是倍频获取蓝光

收稿日期: 2016-09-10; 收到修改稿日期: 2016-10-22

基金项目: 国家自然科学基金(61308057)、山东省科技计划项目(2010G0020423)

作者简介: 张 峰(1989—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: zhangfeng36411@163.com

导师简介: 张海鹏(1978—),男,副教授,硕士生导师,主要从事激光技术与器件方面的研究。

E-mail: haikun_zhang@163.com(通信联系人)

的重要途径。

在光子晶体光纤问世以前,单模掺 Nd^{3+} 光纤激光器的输出功率在毫瓦量级^[10],而采用包层抽运技术的双包层掺 Nd^{3+} 光纤激光器可以实现最大功率 30 W 连续激光输出^[11]。但通常情况下,普通光纤激光器的高功率输出是以多模运转为代价,这种缺陷可以在光子晶体光纤中通过合理的结构设计予以消除,同时发挥大模场面积、无截止单模两方面的优势。2002 年,德国 Max-Born 研究所第一次实现了掺 Nd^{3+} 光子晶体光纤激光器激光运转,所用光纤芯径仅有 $8.5 \mu\text{m}$,长度为 34 cm,最终获得 10 mW 的 $1 \mu\text{m}$ 连续激光输出^[12]。2005 年,该所又采用模场面积 $200 \mu\text{m}^2$ 的掺 Nd^{3+} 光子晶体光纤,将输出激光的功率提高到了 280 mW^[13]。2006 年,英国 Bath 大学采用长为 10 cm 的光子带隙型掺 Nd^{3+} 光子晶体光纤,实现了 Nd^{3+} 三能级运转,获得了约 230 mW 的 907 nm 连续激光输出^[14]。国内,中国科学院上海光学精密机械研究所陈丹平课题组围绕非石英玻璃掺 Nd^{3+} 光子晶体光纤开展了系列研究,提出了稀土离子掺杂的软玻璃全固态光纤概念^[15-22]。由于 Nd^{3+} 的发射截面远小于 Yb^{3+} 的发射截面,同时受掺杂浓度、模场面积等因素的影响,目前基于掺 Nd^{3+} 光子晶体光纤的激光器输出功率还比较低。文献[17]和[22]虽然报道了输出功率超过 10 W 的掺 Nd^{3+} 光子晶体光纤激光器,但是所用光纤为多芯结构,输出激光的光束质量较差。

本文报道了一种基于空气孔微结构的掺 Nd^{3+} 大模场保偏光子晶体光纤激光器。掺 Nd^{3+} 光子晶体光纤为双包层单芯结构,模场面积约为 $755 \mu\text{m}^2$,保偏结构可以有效减少环境等因素的影响,拓展激光器的适应范围。激光器采用简化的线性谐振腔,将光纤一端研磨成 0° 角作为一个腔镜兼输出镜,实现了光束质量良好的高功率连续激光运转。当抽运功率为 30 W 时,获得了 4.94 W 的 1062.7 nm 连续激光输出,光束质量因子 $M^2=1.30$,斜效率为 18.8%。

2 实验装置

实验采用的掺 Nd^{3+} 大模场保偏光子晶体光纤(NKT Photonics 公司,丹麦)为折射率引导型石英玻璃光纤,长度为 7 m,光纤端面的扫描电镜图如图 1(a)所示。光纤纤芯直径为 $40 \mu\text{m}$,模场面积约为 $755 \mu\text{m}^2$,数值孔径为 0.03。内包层直径为 $200 \mu\text{m}$,具有 6 层六角形周期性排布的空气孔,数值孔径为 0.55,内包层之外环绕一层空气包层,在内包层 x 轴方向上引入两个对称的应力元,利用应力致双折射使光纤具有保偏特性。为了避免激光器高功率运转时造成光子晶体光纤端面破坏,先用熔接机进行大电流放电,使光纤端面附近的空气孔塌陷为实心结构,并在 DZ3-IR 光学显微镜(Union 公司,日本)下观察,如图 1(b)所示。

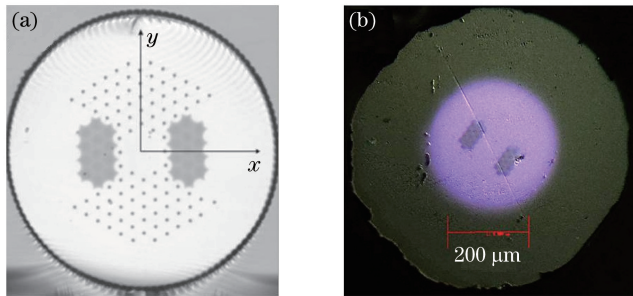


图 1 掺 Nd^{3+} 光子晶体光纤端面。(a)空气微孔结构;(b)塌陷研磨后的实心结构

Fig. 1 Fiber end face of the Nd-doped PCF. (a) Micro air-hole structure; (b) solid core structure after collapsing and polishing

激光器采用 808 nm 光纤耦合半导体激光器(LD)作为抽运源,光纤直径 $200 \mu\text{m}$,数值孔径 0.22,经过 L_1 、 L_2 两个非球面镜透过 M_1 镜耦合到增益光纤中,实验装置如图 2 所示。 L_1 和 L_2 的数值孔径分别为 0.25 和 0.50,焦距分别为 11 mm 和 8 mm,考虑光子晶体光纤端面未镀膜引起的菲涅耳反射损耗,耦合效率约为 74%。增益光纤在 808 nm 处的吸收系数为 2.7 dB/m。平面镜 M_1 和 M_2 分别是 45° 和 0° 双色镜,均镀有 800~900 nm 的减反膜(透射率约为 98.9%)和 1000~1100 nm 的高反膜(反射率约为 99.8%)。由于掺 Nd^{3+} 光纤在 900 nm 附近有一定的发射带^[14],光路通过 M_1 和 M_2 镜折叠,可以进一步增大其损耗,避免三能级激光运转。为了防止自激振荡,输入耦合端的光纤端面研磨成 8° 角。光纤另一端研磨成 0° 角,利用 4%

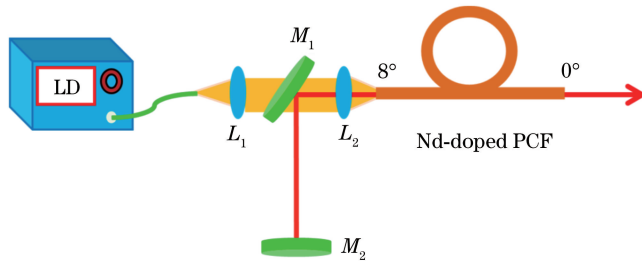


图 2 掺 Nd³⁺ 光子晶体光纤激光器实验装置

Fig. 2 Experimental setup of Nd-doped PCF laser

的非涅耳反馈与 M_2 形成激光谐振腔。光纤 0°角端兼作输出镜,减少了腔内的分离器件。

3 实验结果及分析

激光器的阈值为 2.4 W,随着抽运功率的逐渐增加,输出功率线性增加,如图 3 所示。当抽运功率达到 LD 的最高功率 30 W 时,最大输出功率为 4.94 W,斜效率为 18.8%。没有发现激光器功率饱和的迹象,如果更换更高功率的抽运源,相信可以进一步提升输出功率。

采用 Ocean Optics 公司的 HR4000CG-UV-NIR 型光谱仪探测输出激光的光谱特性,如图 4 所示,随着抽运功率从 9 W 增加到 30 W,输出激光的中心波长从 1059.5 nm 移动到 1062.7 nm,产生了明显的红移。这是因为随着抽运功率的增加,光纤纤芯的温度升高会影响激光发射中不同波长间的模式竞争,并且短波长的激光更容易被重吸收,所以输出激光的波长向长波长方向漂移。此外,光子晶体光纤包层的有效折射率与波长有关,短波长对应的包层有效折射率较大,即与纤芯折射率的差值较小,全内反射时产生的损耗相对较大,这可能也是光谱红移的影响因素之一。从图 4 还可以看出,激光光谱具有多峰现象,这主要是由于掺 Nd³⁺ 玻璃光纤结构具有短程有序、长程无序的特点^[23-24]。由于对称性低,不同 Nd³⁺ 离子的斯塔克能级分裂不同,导致光纤光谱非均匀展宽。

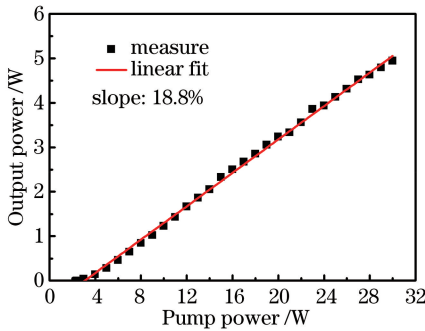


图 3 输出功率与抽运功率的变化关系

Fig. 3 Output power versus pump power

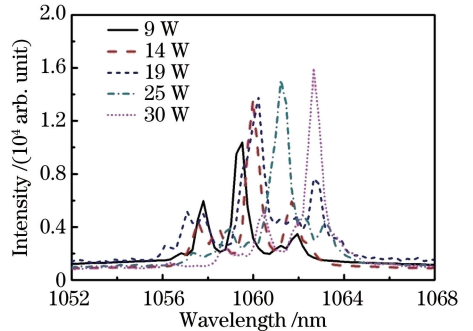


图 4 不同抽运功率下的输出激光光谱

Fig. 4 Output laser spectrum under various pump powers

采用 Thorlabs 公司 M2MS-BP209IR 型光束质量分析仪对不同抽运功率下输出激光的 M^2 因子进行测量,结果如图 5 所示。当抽运功率为 30 W,输出激光为 4.94 W 时, M^2 因子为 1.30,依然保持了良好的光束质量,这主要得益于光子晶体光纤的无截止单模特性。在传统阶跃型光纤中,模式数目由归一化频率 V 参数决定^[25]:

$$V = (2\pi\rho/\lambda) (n_{co}^2 - n_{cl}^2)^{1/2}, \quad (1)$$

式中 ρ 为纤芯直径, n_{co} 和 n_{cl} 分别为纤芯和包层的折射率。光纤实现单模传输的条件是 $V < 2.405$ 。在光子晶体光纤中, V 参数同样可以判断光纤中的模式,但包层的有效折射率 n_{cl} 不再是常数,而是由光纤中的光场分布决定,这时可以采用空气孔直径 d 与相邻空气孔间距 Λ 的比值衡量光纤的单模传输特性。当 $d/\Lambda < 0.15$ 时,光子晶体光纤对于任何波长的光都是单模传输的^[5]。实验采用的光子晶体光纤, d 约为 $3 \mu\text{m}$, Λ 约为 $20 \mu\text{m}$,则 $d/\Lambda = 0.15$,这表明掺 Nd³⁺ 光子晶体光纤具有良好的单模传输特性。

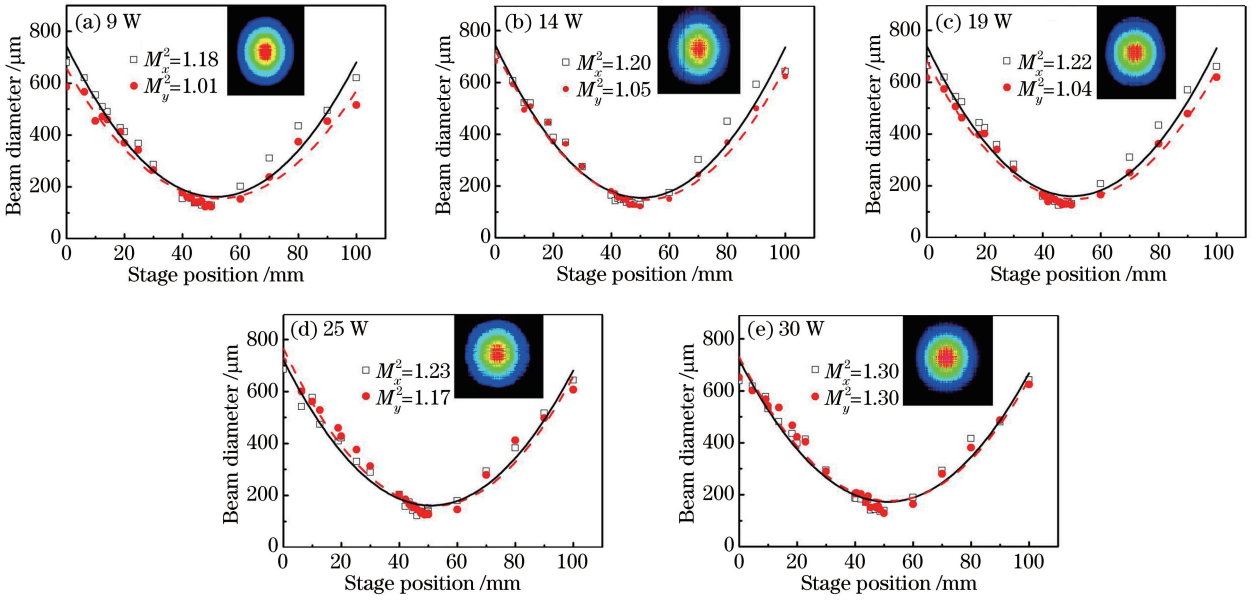


图 5 不同抽运功率下的光束质量。(a)9 W;(b)14 W;(c)19 W;(d)25 W;(e)30 W

Fig. 5 Beam quality under various pump powers. (a) 9 W; (b) 14 W; (c) 19 W; (d) 25 W; (e) 30 W

为了表征掺 Nd^{3+} 大模场保偏光子晶体光纤的保偏性能,利用消光比大于 2000:1 的偏振分光棱镜进行检偏,测出 p 偏振光的功率 P_x 和 s 偏振光的功率 P_y ,则光纤的偏振串音(CT)可表示为^[26]

$$X_{\text{CT}} = 10 \lg \left(\frac{P_y}{P_y + P_x} \right), \quad (2)$$

实验测得,最大输出功率为 4.94 W 时, P_x 和 P_y 分别为 4.14 W 和 0.80 W,对应的偏振串音为 -7.9 dB,这表明掺 Nd^{3+} 光子晶体光纤在 1 μm 波段具有良好的保偏性能。

4 结 论

采用掺 Nd^{3+} 双包层大模场保偏光子晶体光纤作为激光增益介质,在 1 μm 波段实现了高功率、高光束质量连续激光运转。将研磨 0°角的光纤端面直接作为激光器的输出端,实现了腔型结构的简化,并可以根据需要灵活改变激光输出方向。当抽运功率为 30 W 时,最大输出功率为 4.94 W,光束质量因子为 1.30,偏振串音为 -7.9 dB,这表明掺 Nd^{3+} 双包层大模场保偏光子晶体光纤具有良好的单模传输特性和保偏性能。后续通过合理设计激光器谐振腔参数,优化光纤长度,有望实现更加高效的连续和脉冲激光输出,相关的工作正在进行。

5 致 谢

感谢天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室柴路教授对论文的帮助。

参 考 文 献

- [1] Knight J C. Photonic crystal fibres[J]. Nature, 2003, 424(6950): 847-851.
- [2] Russell P. Photonic crystal fibers[J]. Science, 2003, 299(5605): 358-362.
- [3] Wang Qingyue, Hu Minglie, Chai Lu. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(1): 57-66.
王清月, 胡明列, 柴 路. 光子晶体光纤非线性光学研究新进展[J]. 中国激光, 2006, 33(1): 57-66.
- [4] Knight J C, Birks T A, Russell P St J, et al. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. Optics Letters, 1996, 21(19): 1547-1549.
- [5] Birks T A, Knight J C, Russell P S J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. Optics Letters, 1997, 22(13): 961-963.

- [6] Knight J C, Broeng J, Birks T A, *et al.* Photonic band gap guidance in optical fibers[J]. *Science*, 1998, 282(5393): 1476-1478.
- [7] Shi Junkai, Chai Lu, Zhao Xiaowei, *et al.* Amplifier similariton oscillator using 10 m photonic crystal fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(18): 184210.
石俊凯, 柴路, 赵晓薇, 等. 基于 10 m 光子晶体光纤的放大自相似锁模振荡器研究[J]. *物理学报*, 2015, 64(18): 184210.
- [8] Yang Zhen, Chai Lu, Hu Minglie, *et al.* All-normal-dispersion self-similar mode-locked laser based on large mode area photonic crystal fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(3): 0302005.
杨珍, 柴路, 胡明列, 等. 大模场面积光子晶体光纤全正色散自相似锁模激光器[J]. *中国激光*, 2016, 43(3): 0302005.
- [9] Li P, Liang B, Zhang M, *et al.* 978 nm 1.24 ps ultra-short pulsed large mode area photonic crystal fiber laser[J]. *Optics Communications*, 2015, 352: 19-24.
- [10] Snitzer E, Po H, Hakimi F, *et al.* Double clad, offset core Nd fiber laser[C]. *Optical Fiber Sensors*. Optical Society of America, 1988: PD5.
- [11] Zellmer H, Tünnermann A, Welling H, *et al.* Double-clad fiber laser with 30 W output power[J]. *Osa Tops*, 1997, 16: 137-140.
- [12] Glas P, Fisher D. Cladding pumped large-mode-area Nd-doped holey fiber laser[J]. *Optics Express*, 2002, 10(6): 286-290.
- [13] Glas P, Fischer D, Moenster M, *et al.* Large-mode-area Nd-doped single-transversemode dual-wavelength microstructure fiber laser[J]. *Optics Express*, 2005, 13(20): 7884-7892.
- [14] Wang A, George A K, Knight J C. Three-level neodymium fiber laser incorporating photonic bandgap fiber[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(10): 1388-1390.
- [15] Zhang G, Zhang Q, Shen Y L, *et al.* Phase locking of a compact Nd-doped phosphate multicore fiber laser[J]. *Laser Physics*, 2011, 21(2): 410-413.
- [16] Zhang G, Zhou Q, Yu C, *et al.* Neodymium-doped phosphate fiber lasers with an all-solid microstructured inner cladding[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(12): 2259-2261.
- [17] Wang L, Li W, Sheng Q, *et al.* All-solid silicate photonic crystal fiber laser with 13.1 W output power and 64.5% slope efficiency[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(6): 1116-1119.
- [18] Wang L, Liu H, He D, *et al.* Phosphate single mode large mode area all-solid photonic crystal fiber with multi-watt output power[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(13): 131111.
- [19] Li W, Chen D, Qinling Z, *et al.* Large-mode-area single-mode-output Neodymium-doped silicate glass all-solid photonic crystal fiber[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5.
- [20] Li W, Wang L, Liu X, *et al.* Silicate glass all-solid photonic bandgap crystal fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(2): 189-192.
- [21] Li W T, Chen D P, Zhou Q L, *et al.* Watt-level output rectangular-core neodymium-doped silicate glass fiber laser[J]. *Chin Opt Lett*, 2016, 14(1): 011402.
- [22] Wang L, He D, Feng S, *et al.* Seven-core neodymium-doped phosphate all-solid photonic crystal fibers[J]. *Laser Physics*, 2015, 26(1): 015104.
- [23] Jacobs R, Weber M. Dependence of the ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ induced-emission cross section for Nd^{3+} on glass composition[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1976, 12(2): 102-111.
- [24] Chen Shuchun, Qi Changhong, Dai Fengmei. Spectral properties of Nd^{3+} in glass[J]. *Acta Physica Sinica*, 1980, 29(1): 54-63.
陈述春, 祁长鸿, 戴凤妹. 钕玻璃的光谱性质[J]. *物理学报*, 1980, 29(1): 54-63.
- [25] Snyder A W, Love J D. *Optical waveguide theory*[M]. New York: Springer Press, 1983: 7-36.
- [26] Zheng Fengzhen. Analytical theory and method study of mechanical strength of panda polarization model optical fiber[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009: 35.
郑风振. 熊猫型保偏光纤机械强度分析的理论和方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2009: 35.