

磷酸盐双芯光纤的制作和白锁相激光输出

张 光^{1,2} 李科峰¹ 胡丽丽¹ 陈丹平¹

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800)
²中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 利用堆积法制作出 Nd 掺杂的磷酸盐玻璃双芯光纤(TCF)。结合管棒法,设计一种能够任意调节芯径与芯间距比例的制备方法。激光实验采用 808 nm 激光二极管(LD)作为抽运源,以长为 6 cm,外径为 620 μm 的 TCF 作为增益介质,宽带高反双色镜和 TCF 另一端的菲涅耳反射形成的 F-P 腔作为激光谐振腔。抽运功率大于阈值时,CCD 观察到清晰的远场干涉条纹,表明得到自锁相激光输出。激光最大输出功率达到 52 mW,对应斜率效率为 27.1%,并研究了不同抽运功率时,TCF 激光的光谱性能。

关键词 激光器;光纤激光;双芯光纤;磷酸盐玻璃;自锁相

中图分类号 TN253;TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0102002

Self-Phase-Locking Action in a Phosphate Twin-Core Fiber and Its Fabrication

Zhang Guang^{1,2} Li Kefeng¹ Hu Lili¹ Chen Danping¹

(¹Key Laboratory of High Power Laser Materials, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Nd-doped phosphate glass twin-core fiber (TCF) is prepared by stack-and-draw method. By combining with rod-in-tube technical, a novel design to produce TCF with a various ratio of core diameter to their separation is obtained. The TCF laser employs an 808 nm laser diode (LD) as pump source, a phosphate TCF with a length of 6 cm and a diameter of 620 μm is gain medium, and a resonant cavity is formed by a broadband high reflector and Fresnel reflection provided by perpendicular cleaved end of the active TCF. Above laser threshold, clear and stable interference strips are observed by CCD in far field, showing that TCF laser operates in self-phase-locking. A maximal output power of 52 mW and a slope efficiency of 27.1% with respect to absorbed pump power are obtained. Characteristics of the TCF laser spectra at different output power are also investigated.

Key words lasers; fiber laser; two-core fiber; phosphate glass; self-phase-locking

OCIS codes 140.3510; 060.4005; 160.2750; 060.2280

1 引 言

双芯光纤(TCF)是微结构光纤的一种,可用于制作紧凑、可靠的光通信器件和光学传感器件,因而受到广泛关注。从结构上看,两芯距离较远时,双芯光纤可以看成两个独立光波导,充当干涉仪的两臂,

是一个天然的光学传感器件^[1,2];当距离较近时,两路波导会通过倏逝波产生互相耦合,可以实现频率选择耦合器^[3~5]和起到非线性光开关的作用^[6~12]。光子晶体结构的 TCF 还可以获得较大的负色散值,起到色散补偿的作用^[13~15]。另外,通过拉锥,双芯

收稿日期: 2011-08-15; 收到修改稿日期: 2011-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(60878043,60707019 和 50911140475)资助课题。

作者简介: 张 光(1984—),男,博士研究生,主要从事特种光纤制作工艺与激光特性等方面的研究。

E-mail: maxzw2008@163.com

导师简介: 陈丹平(1960—),男,研究员,博士生导师,主要从事微结构光纤制备和性能以及活性离子掺杂玻璃与陶瓷光电功能材料等方面的研究。E-mail: d-chen@mail.siom.ac.cn

光纤可以很好地与单模光纤熔接,使之成为较有竞争力的全光纤化的功能器件^[16,17]。

纤芯中掺杂适量稀土离子的 TCF 可以作为激光器^[6~9]和放大器^[18]的增益介质。TCF 放大器具有很好的增益均衡性,可以为多路不同波长、不同输入功率的信号提供不同的增益,从而实现输出功率的功率均衡,适用于多级放大的光频复用系统。TCF 作为非线性元件的工作原理,简单地讲是两个纤芯通过倏逝波可以互相传递能量,若只抽运具有适当反馈的芯 1,由于耦合作用,芯 1 中获得的激光会在半拍长距离内通过倏逝波完全耦合到近邻的芯 2 中,而芯 2 是个开腔,没有反馈。此时,TCF 工作在完全吸收状态。当芯 1 中的激光较强时,折射率会发生微弱变化,芯 1 和芯 2 的耦合条件被破坏,激光保持在芯 1 中,TCF 处于低吸收状态。利用 TCF 两种状态可以实现开关功能,用作被动锁模元件。Y. Oh 等^[7]在实验上用双芯光纤作为非线性元件实现稳定的锁模激光输出。E. Marti-Panameno 等^[8,10]理论分析增益饱和、高阶色散等对 TCF 开关功能的影响,结果表明合理设计 TCF 可以实现自启动被动锁模激光输出。另一方面,Nd 掺杂磷酸盐玻璃是激光核聚变的增益介质,其中心波长为 1053 nm。目前用 Yb 掺杂石英光纤获得 1053 nm 锁模脉冲作为种子源。但 Yb 掺杂石英光纤的增益中心在 1030 nm 附近,在制作 1053 nm 锁模脉冲时,要通过特殊手段来抑制 1030 nm 增益峰。若能用 Nd 掺杂磷酸盐玻璃光纤作为增益介质,结合双芯光纤的类饱和吸收特性产生稳定的中心波长 1053 nm 的锁模脉冲,将会极大优化激光核聚变种子光的性能。

本文用堆积法制作 Nd 掺杂的磷酸盐玻璃 TCF,并用作激光器的增益介质进行激光实验,用 CCD 观察其远场干涉条纹,进而探讨其作为锁模脉冲激光器的增益介质和非线性饱和吸收体的可能性。

2 TCF 制备和激光实验

2.1 堆积法制备 TCF

实验中纤芯玻璃为 N31 钕玻璃,其 Nd 离子浓度为 $3.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 。在传统的堆叠法制备多芯光纤的基础上,用带有包层芯棒来代替原来裸芯棒,调节带包层芯棒中包层和芯棒的比例实现芯径和芯间距的任意可调。另外,芯棒包层的出现会防止预制棒烧结和拉丝过程中芯区的畸变。TCF 的制作包

括 4 个步骤:1)先用内包层玻璃制成外径为 20 mm、孔径为 6 mm 的玻璃管,将直径为 6 mm 的 N31 钕玻璃细棒套入内包层管得到初级预制棒。利用光纤拉丝塔拉制出 0.6 mm 的细棒。2)用外包层玻璃制作外径为 20 mm,长为 150 mm 的玻璃棒,拉丝得到 0.6 mm 的细棒。3)在模具中排列这些细棒,排好后用两根带有 N31 钕玻璃作为芯、内包层玻璃作为包层的芯棒代替模具中心相邻的细棒。高温炉里 450 °C 烧结并退火,得到外径为 16 mm 的 TCF 预制棒。4)利用光纤拉丝塔得到外径 400~650 μm 的 TCF。步骤 1)中内包层与纤芯的比例可调,步骤 3)中的带芯内包层玻璃棒的位置可调,所以芯径和芯间距比例任意可调。

2.2 TCF 激光实验

TCF 激光实验装置如图 1 所示。TCF 的外径为 620 μm ,芯径为 4.3 μm ,芯间距为 14 μm ,长为 6 cm。芯和内包层的数值孔径分别为 0.15 和 0.3,芯在 1.05 μm 附近为单模传输,截断法测得的损耗为 2.1 dB/m。808 nm 抽运光经准直透镜(CL)准直后,用 10 倍物镜(OL)聚焦到 TCF 端面进行抽运。耦合端用 1053 nm 附近高反,808 nm 高透双色镜作为前腔镜,宝石刀垂直切割 TCF 另一端面的菲涅耳反射($T \sim 5\%$)作为输出端腔镜。观察远场图样时,用另外一个 10 倍物镜把端面成像到 5 m 远处,即可认为在物镜后面附近为光斑远场。功率计测量输出端的激光功率,滤波片($T_{808} < 0.02\%$)保证功率计所测基本不包含抽运光。TCF 激光随吸收功率变化如图 2 所示。激光阈值约为 100 mW,最大输出功率为 52 mW,相对吸收功率的斜率为 27.1%。TCF 具有类单包层结构,抽运光耦合到芯区包层的比例约为 9.2%,很大一部分抽运光无法进入芯层,然而会导致较强的热效应,抑制输出功率的进一步提高。

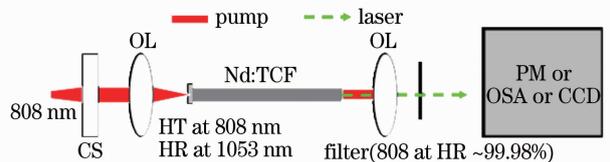


图 1 TCF 激光实验示意图

Fig. 1 Experimental setup of the TCF laser

图 3 为不同功率输出条件下远场条纹的变化曲线。为避免 CCD 受到较强的激光照射,在阈值之上观察 TCF 激光远场时适时加入衰减片。从图 3(b)~(d)可以看出,抽运功率 P 低于阈值 P_{th} 时,远场为长

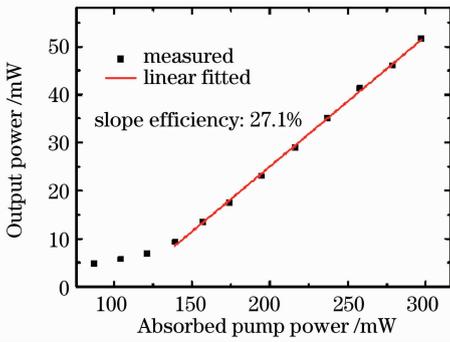
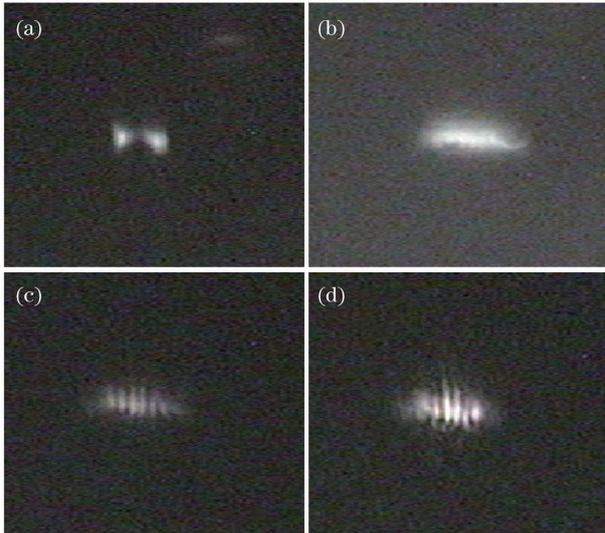


图2 输出功率随吸收功率的变化曲线

Fig. 2 Output power as a function of absorbed pump power

方形模糊光斑,无干涉条纹出现。这是因为荧光的频谱较宽,相干性较差,无法相位锁定。当 $P > P_{th}$ 时,TCF 开始出现激光,谱线变窄,相干性增强。倏逝波的作用,使 TCF 两芯相互作用,相位锁定,出现干涉条纹。随着 P 的增加,干涉条纹增强,并表现出能量向中心集聚。干涉条纹的出现,表明实验中的磷酸盐玻璃 TCF 的芯之间有较强的耦合作用,可以用来实现 TCF 非线性饱和吸收功能。光纤光谱仪观测了不同功率下 TCF 激光的光谱特性,如图 4 所示。随着抽运功率的增大,激光中心波长从 1054.1 nm 红移至 1054.8 nm,这与腔镜的宽带反射有关,可以引入光纤布拉格光栅固定 TCF 激光的中心波长。半峰全宽(FWHM)约为 0.8 nm,这比之前

图3 TCF 的近场和远场图案。 $P < P_{th}$: (a) 近场和 (b) 远场; $P > P_{th}$: 远场 (c) $P_{out} = 15$ mW, (d) $P_{out} = 40$ mWFig. 3 Near-field and far-field pattern of TCF. $P < P_{th}$: (a) Near-field and (b) far-field; $P > P_{th}$: far-field (c) $P_{out} = 15$ mW, (d) $P_{out} = 40$ mW

报道的 Nd 磷酸盐光纤激光的光谱要窄^[19],分析认为是 TCF 引起的频率锁定所致。

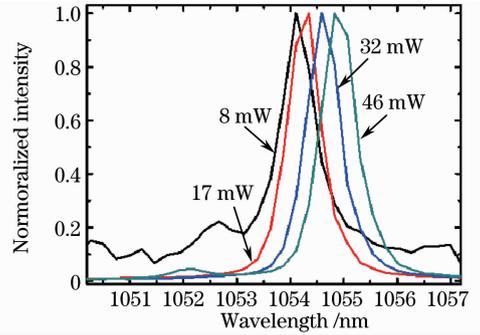


图4 TCF 不同输出功率的光谱

Fig. 4 Spectra of TCF laser at various output powers

3 结 论

堆积法制作磷酸盐玻璃 TCF,报道了磷酸盐 TCF 的激光实验,并获得稳定自锁相激光输出。808 nm 激光二极管为抽运源,宽带双色镜和 TCF 菲涅耳反射组成谐振腔,以 6 cm 长 Nd 磷酸盐玻璃 TCF 为增益介质,获得 52 mW 激光输出,斜率效率达到 27.1%。用 CCD 观察到远场干涉条纹,随着激光功率增加,干涉条纹增强,且能量向中心条纹集聚。自锁相激光输出表明磷酸盐玻璃 TCF 两芯具有较强的耦合作用,能起到非线性饱和吸收的作用,有望应用于稳定的锁模激光器。

参 考 文 献

- O. Frazão, S. F. Silva, J. Viegas *et al.*. A hybrid Fabry-Perot/Michelson interferometer sensor using a dual asymmetric core microstructured fiber[J]. *Measurement Science And Technology*, 2010, **21**(2): 025205
- Fan Linyong, Jiang Weiwei, Zhao Ruifeng *et al.*. Temperature characteristic of in-fiber Mach-Zehnder interferometer using twin-core fiber[J]. *Optics and Precise Engineering*, 2011, **19**(1): 1~9
范林勇, 江微微, 赵瑞峰 等. 双芯光纤马赫-曾德尔干涉仪的温度特性[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(1): 1~9
- Kunimasa Saitoh, Yuichiro Sato, Masanori Koshiba. Coupling characteristics of dual-core photonic crystal fiber couplers[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(24): 3188~3195
- Shuqin Lou, Zunwei Tang, Liwen Wang. Design and optimization of broadband and polarization-insensitive dual-core photonic crystal fiber coupler[J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(14): 2016~2023
- Xiwen Sun. Wavelength-selective coupling of dual-core photonic crystal fiber with a hybrid light-guiding mechanism[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(17): 2484~2486
- H. Winful, D. Walton. Passive mode locking through nonlinear coupling in a dual-core fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(23): 1688~1690
- Y. Oh, S. Doty, J. Haus *et al.*. Robust operation of a dual-core fiber ring laser[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(12): 2502~2507

- 8 E. Marti-Panameno, L. Gomez-Pavon, A. Luis-Ramos *et al.*. Self-mode-locking action in a dual-core ring fiber laser[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **194**(4): 409~414
- 9 O. Graydon, W. Loh, R. Laming *et al.*. Triple-frequency operation of an Er-doped twincore fiber loop laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(1): 63~65
- 10 Joshua Proctor, J. Nathan Kutz. Nonlinear mode-coupling for passive mode-locking: application of waveguide arrays, dual-core fibers, and/or fiber arrays[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(22): 8933~8950
- 11 A. Betlej, S. Suntsov, K. G. Makris *et al.*. All-optical switching and multifrequency generation in a dual-core photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(10): 1480~1482
- 12 S. Friberg, A. Weiner, Y. Silberberg *et al.*. Femtosecond switching in a dual-core-fiber nonlinear coupler[J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(10): 904~906
- 13 J. Maury, J. L. Auguste, S. Février *et al.*. Conception and characterization of a dual-concentric-core erbium-doped dispersion-compensating fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(7): 700~702
- 14 Yi Ni, Lei Zhang, Liang An *et al.*. Dual-core photonic crystal fiber for dispersion compensation[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(6): 1516~1518
- 15 S. Friberg, Y. Silberberg, M. Oliver *et al.*. Ultrafast all-optical switching in a dual-core fiber nonlinear coupler[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**(15): 1135~1137
- 16 Libo Yuan, Zhihai Liu, Jun Yang. Coupling characteristics between single-core fiber and multicore fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(22): 3237~3239
- 17 Xiaoliang Zhu, Libo Yuan, Zhihai Liu *et al.*. Coupling theoretical model between single-core fiber and twin-core fiber[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(23): 5235~5239
- 18 Chen Haijuan, Yang Xianglin. Equalizing characteristics of twin-core fiber amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(2): 216~220
陈海涓, 杨祥林. 双芯光学放大器的研究[J]. *光学学报*, 1999, **19**(2): 216~220
- 19 Guang Zhang, Meng Wang, Chunlei Yu *et al.*. Efficient generation of watt-level output from short-length Nd-doped phosphate fiber lasers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(6): 350~352

栏目编辑:马 沂