

文章编号: 1001-3806(2014)01-0105-04

掺镱光子晶体光纤激光器谐振腔的实验研究

刘宗华, 郑义*

(北京交通大学理学院, 北京 100044)

摘要: 为了对光纤激光器的谐振腔进行优化, 研究了 976nm 半导体激光器后向抽运掺 Yb^{3+} 双包层光子晶体光纤在不同腔结构下的输出特性。在实验中分别采用平面镜和平凹镜作为后腔镜对谐振腔进行了研究, 利用平面镜做后腔镜时, 存在模式竞争现象, 激光输出线宽约 10nm, 激光输出斜率效率为 9%; 而利用平凹镜做后腔镜时, 模式稳定, 激光输出线宽约 5nm, 激光输出斜率效率为 11%。结果表明, 利用平凹镜做后腔镜时, 激光器的模式更稳定、线宽更窄, 并且效率更高。

关键词: 激光技术; 光纤激光器; 掺镱光子晶体光纤; 后向抽运; 波导谐振腔

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.01.023

Experimental study about the cavity of Yb^{3+} -doped photonic crystal fiber laser

LIU Zonghua, ZHENG Yi

(School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To optimize the fiber laser cavity, an Yb^{3+} -doped double-cladding photonic crystal fiber (PCF) was pumped with a 110W multimode LD at central wavelength of 976nm, and the PCF laser characteristics were examined. A dichroic flat mirror and a dichroic flat-concave mirror were used as the back cavity-mirror respectively. There happened the model competition phenomenon in the first laser. And the line width of the PCF laser with a flat-concave mirror as the back cavity-mirror was about 5nm, while another one was above 10nm. Besides, slope efficiency of the former was 11%, and the latter's was just 9%. It has stable model, narrower emission line width and higher slope efficiency in the PCF-laser with a flat-concave mirror as the back cavity-mirror.

Key words: laser technique; fiber laser; Yb^{3+} -doped photonic crystal fiber; backward pumping; waveguide cavity

引言

近年来,随着光纤制作工艺的提高,稀土掺杂光纤激光器已经成为激光器的热门研究领域之一,并在环境监测、工业加工、医疗和国防等领域有着广泛的应用^[1]。

光子晶体光纤(photonic crystal fiber, PCF)具有大模场面积^[2]、大内包层数值孔径、宽带单模传输^[3-4]等优点,因此,采用在芯层内掺杂 Yb^{3+} 的光子晶体光纤^[5]做增益介质制成的光子晶体光纤激光器能获得比普通光纤激光器更大的单横模面积,很好地解决了大功率运转条件下的非线性效应^[6-7]

及热损伤问题,为高光束质量、高功率光纤激光器^[8-10]的进一步发展提供了条件。

但是,受限于光子晶体光纤的研制技术,目前国内大功率光子晶体光纤激光器的研究起步较晚,主要还是中低功率的光子晶体光纤激光器^[11-12]的研究,并且大多采用进口的光子晶体光纤。光纤激光器的谐振腔是波导谐振腔,与开放式谐振腔不同,因此,以电磁场在自由空间的传播规律为基础而建立的开放式光学谐振腔理论不适应于光纤激光器谐振腔的理论。本文中用大功率 976nm 半导体激光器后向抽运 3m 长掺 Yb^{3+} 双包层光子晶体光纤,设计了一种热损伤阈值大的腔结构;实验中,作者研究了光子晶体光纤在入纤功率 6W 时的输出荧光谱线;然后分别采用平面镜和平凹镜作为后腔镜,通过对比两种腔结构的激光输出特性来分析这两种腔镜的优劣。

作者简介:刘宗华(1988-),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail:bjtu_laser@163.com

收稿日期:2013-03-15;收到修改稿日期:2013-05-27

1 实验装置

实验装置如图 1 所示,实验中采用掺 Yb^{3+} 双层光子晶体光纤作为增益介质,光纤的横截面结构如图 2a 所示。这种光纤纤芯的直径为 $37\mu\text{m}$,内包层的直径为 $128\mu\text{m}$,外包层直径为 $231\mu\text{m}$,空气孔呈六角排列;图 2b 是光纤的模场分布图 (COMOSL 软件仿真),该光纤是大模场单模光纤;掺杂稀土元素 Yb^{3+} 对 976nm 抽运光的吸收系数是 7.63dB/m ,光纤的长度约为 3m ;其前端面垂直切割,尾端面 3° 斜角切割。

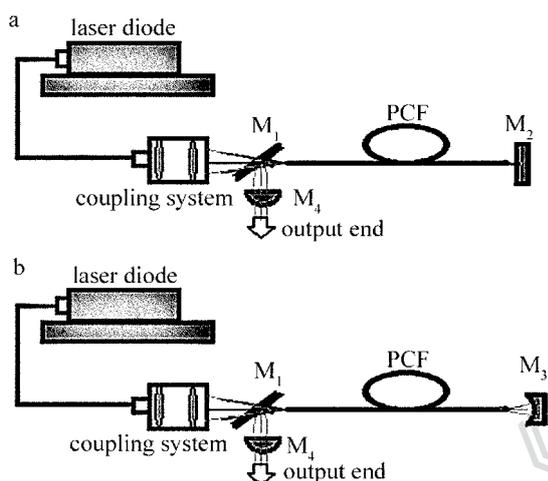


Fig. 1 Experimental setup

a—with a flat mirror as the back cavity mirror b—with a flat-concave mirror as the back cavity mirror

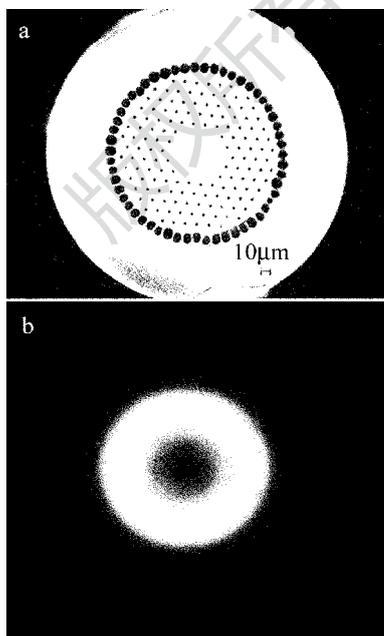


Fig. 2 Cross section of the photonic crystal fiber and mode field distribution

抽运源为德国 DILAS 生产的光纤耦合输出的大功率半导体激光器,输出中心波长为 976nm ,最大输出功率为 110W ,输出尾纤半径为 $100\mu\text{m}$,数值孔径为 0.22 。抽运光经透镜耦合系统和 45° 二色平面镜 M_1 入射到 PCF 端面上, M_1 对 976nm 抽运光高透,对 $1030\text{nm} \sim 1100\text{nm}$ 波段的信号光高反;谐振腔分别采用对 $1030\text{nm} \sim 1100\text{nm}$ 波段的信号光高反的平面镜 M_2 (见图 1a) 和平凹镜 M_3 (见图 1b) 两种结构作为后腔镜和 M_3 在 1031nm 处保证反射率 $R > 99\%$, M_2 的直径为 25mm , M_3 的直径为 25mm ,曲率半径为 30mm ;以反射率 4% 的光纤前端面作为输出镜;用小曲率半径的平凸镜 M_4 对输出激光准直。光谱仪是海洋光电生产的 HR2000 + 光谱仪,检测范围是 $200\text{nm} \sim 1100\text{nm}$,光学分辨率为 0.035nm ;输出功率由以色列 OPHIR 公司生产的功率计测得,最大测量值为 300W 。

2 实验结果和分析

在入纤功率约 6W 时测得实验用光子晶体光纤的输出荧光谱线如图 3a 所示,图 3b 是国外 NKT 产石英基光子晶体光纤中 Yb^{3+} 的荧光谱线。对比两图可得出,实验用掺镜光子晶体光纤的荧光谱线与 NKT 产掺镜光子晶体光纤的荧光谱线相吻合。实验用掺镜光子晶体光纤 1000nm 后的发射峰值在 1044nm 附近,稍偏离 NKT 掺镜光子晶体光纤的

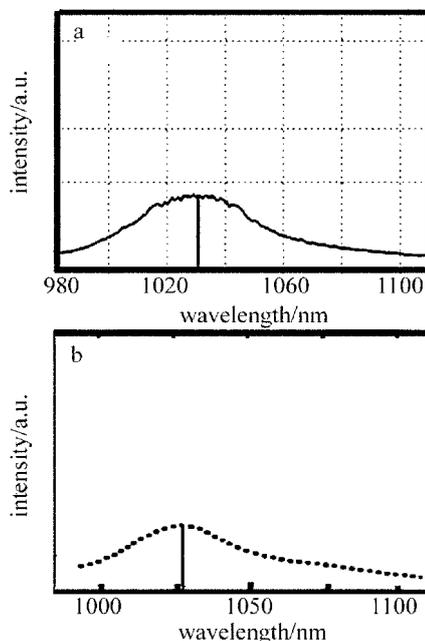


Fig. 3 a—fluorescence spectra of experimental PCF at 6W incident power b—fluorescence spectra of Yb^{3+} in silica PCF made by NKT

1031nm,这是因为光纤的结构和 Yb^{3+} 的掺杂浓度会对发射截面谱线产生影响。

图 4 是不同腔结构的光子晶体光纤激光器的输出光谱图。图 4a 和图 4b 是以平面镜作为后腔镜的腔结构分别在抽运功率 30W 和 35W 时的输出光谱;图 4c 和图 4d 是以平凹镜作为后腔镜的腔结构分别在抽运功率 30W 和 35W 时的输出光谱。从光谱图上可以看出,以平面镜作为后腔镜的腔结构的输出激光线宽约 10nm,大于以平凹镜作为后腔镜的腔结构的输出激光的 5nm;而且,前者的输出激光是双峰激励,模式竞争现象明显。通过分析上述实验现象得出结论:以平凹镜作为后腔镜的腔结构的输出激光波长比以平面镜作为后腔镜的腔结构的输出激光波长更加稳定,模式竞争现象更弱,且线宽更窄。以平面镜作为后腔镜时,后腔镜和光纤前端面间存在 F-P 选频效应,外界环境引起后腔镜的抖动

会引发激励光波长的跳变,引起多模式振荡,各模式间的模式竞争和耦合效应会降低激光器的输出稳定性和激光线宽,而改用平凹镜作为后腔镜的腔结构,避免了腔镜和光纤前端面间的 F-P 选频效应,可以改善上述不利现象。更为重要的是,当反射镜与某一波导腔外模相匹配时,该模式可精准地返回波导口而不引入损耗,但其它模式经过一周所经的相移不同,当它们返回波导口时会引入一定的损耗而被削弱进而湮灭。因此,以平凹镜作为后腔镜的腔结构的输出激光波长更加稳定,模式竞争现象更弱,且线宽更窄。

图 5 是不同腔结构的光子晶体光纤激光器的输出功率特性。由图可知,以平凹镜作为后腔镜的腔结构(p-c cavity)的斜率效率是 11%,大于以平面镜作为后腔镜的腔结构(p-p cavity)的 9%。平凹镜作为后腔镜的腔结构比以平面镜作为后腔镜的腔结构具有更好的模式相匹配,使激光器运行稳定且具有较高的效率,而且,从另一方面理解,凹面镜的聚光作用使更多的激励光反射汇聚进纤芯,提高了腔结构的斜率效率。

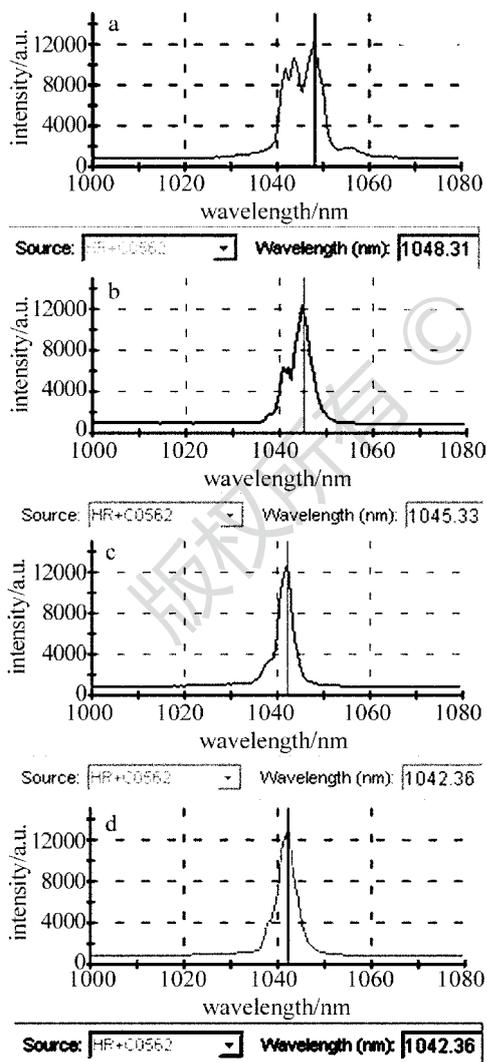


Fig. 4 Output spectra of two different resonant cavities

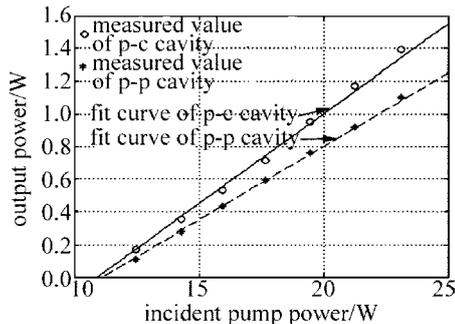


Fig. 5 Output power characteristics of two different resonant cavities

3 结 论

通过对比实验中所用光纤和国外 NKT 的光子晶体光纤的荧光谱线可知,两者的发射荧光谱线相吻合;并通过对比两种不同腔结构的激光输出特性得出结论:以平凹镜作为后腔镜的腔结构的模式更稳定、线宽更窄,并且效率更高。

本实验中的光子晶体光纤激光器的斜率效率较低,分析原因如下:(1)光纤端面没有抛光处理,耦合效率较低;(2)为了提高热损伤阈值而在光路中插入了一个 45° 二色平面镜增加了插入损耗。下一步可以克服以上不足,进一步提高光子晶体光纤激光器的斜率效率。

参 考 文 献

- [1] HOU L, HAN Y. Recent progress and applications of optical fiber lasers [J]. Journal of Yanshan University, 2011, 35(2):95-101 (in Chinese).
- [2] KNIGHT J C, BIRKS T A, CREGAN R F, *et al.* Large mode area photonic crystal fiber [J]. Electronics Letters, 1998, 34(13):1347-1348.
- [3] LAURILA M, ALKESKJOLD T T, LÆGSGAARD J, *et al.* Modal analysis of a large-mode area photonic crystal fiber amplifier using spectral-resolved imaging [J]. Optical Engineering, 2011, 50(11):111604.
- [4] REN G B, WANG Z, LOU S Q, *et al.* Study on mode cutoff in photonic crystal fibers [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(8):1318-1321 (in Chinese).
- [5] PASK H M, CARMAN R J, HANNA D C, *et al.* Ytterbium-doped silica fiber lasers: versatile sources for the 1-1.2 μm region [J]. Quantum Electronics, 1995, 1(1):2-13.
- [6] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics [M]. San Diego, California, USA: Academic Press, 2001:195-211.
- [7] SONG D J, XIE K, XIAO J. Mode field and dispersion analysis of photonic crystal fiber based on finite element method [J]. Laser Technology, 2012, 36(1):111-113 (in Chinese).
- [8] BONATI G, VOELCKEL H, KRAUSE U A, *et al.* 1.53kW from a single Yb-doped photonic crystal fiber laser [R]. San Jose, USA: Photonics West, Late Breaking Developments, 2005:5709-2a.
- [9] LIMPET J, SCHMIDT O, ROTHHARDT J, *et al.* Extended single-mode photonic crystal fiber lasers [J]. Optics Express, 2006, 14(7):2715-2720.
- [10] SCHMIDT O, ROTHHARDT J, EIDAM T, *et al.* Single-polarization ultra-large-mode-area Yb-doped photonic crystal fiber [J]. Optics Express, 2008, 16(6):3918-3923.
- [11] YANG L, DUAN K L, LUO S R, *et al.* Experimental investigation of high power photonic crystal fiber laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(10):1146-1148 (in Chinese).
- [12] DENG Y L, YAO J Q, RUAN Sh C, *et al.* High power photonic crystal fiber laser and key issue [J]. Laser Technology, 2005, 29(6):596-598 (in Chinese).