

百瓦级全光纤双包层光子晶体光纤放大器

刘君, 谷炎然, 陈子伦, 王泽锋

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073

摘要 利用双包层掺镱光子晶体光纤(DC-PCF)作为增益光纤,设计制作了全光纤双包层光子晶体光纤放大器。实验制作了匹配DC-PCF的 $(6+1)\times 1$ 端面抽运耦合器,6根抽运光纤采用包层直径、纤芯直径分别为 $105\ \mu\text{m}$ 和 $125\ \mu\text{m}$ (数值孔径为0.22)的多模光纤,信号光纤采用普通单模光纤。利用套管法制作端面抽运耦合器,并将制作完成的耦合器与DC-PCF直接熔接,再对光子晶体光纤进行锥棒熔接,锥棒输出端面镀 $1000\sim 1100\ \text{nm}$ 的增透膜,以防止激光反馈对整个放大系统产生影响。对全光纤双包层光子晶体光纤放大器进行测试,使用 $976\ \text{nm}$ 的抽运源提供能量,信号光使用波长为 $1064\ \text{nm}$ 、功率为 $2\ \text{W}$ 的连续光。当抽运功率达到最大值 $151.83\ \text{W}$ 时,最大输出功率为 $108.1\ \text{W}$,斜率效率为 72.7% 。输出光斑为很好的基模光斑,体现了光子晶体光纤在具有大模场面积的同时仍能保持基模传输的优良特性。

关键词 光纤光学; 光纤放大器; 端面抽运耦合器; 双包层光子晶体光纤; 全光纤

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1106007

Hundred-Watt-Level All-Fiber Double-Cladding Photonic Crystal Fiber Amplifier

Liu Jun, Gu Yanran, Chen Zilun, Wang Zefeng

College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract An all-fiber double-cladding photonic crystal fiber amplifier is designed and built, and the Yb-doped double-cladding photonic crystal fiber (DC-PCF) is used as the gain fiber. In the experiment, a $(6+1)\times 1$ end-pump coupler is fabricated to match the DC-PCF with six multi-mode fibers as pump fibers and ordinary single-mode fiber SMF-28 as the signal fiber. The cladding diameter and the core diameter is $105\ \mu\text{m}$ and $125\ \mu\text{m}$ respectively, and the numerical aperture is 0.22. An end-pump coupler is fabricated by the capillary tube method and directly spliced with DC-PCF. At last, the DC-PCF is spliced with a tapered end-cap. The end-cap is plated with $1000\sim 1100\ \text{nm}$ anti-reflective coating film to prevent the entire amplification system from the effect of laser feedback. The designed amplifier is tested with pump light at the wavelength of $976\ \text{nm}$ and continuous signal of $2\ \text{W}$ at $1064\ \text{nm}$. When the pump power reaches the maximum of $151.83\ \text{W}$, the maximum output power is $108.1\ \text{W}$ and the slope efficiency is 72.7% . The output spot is a good fundamental mode spot. It indicates the excellent characteristics of the photonic crystal fiber, which can simultaneously maintain the large mode field and the fundamental mode transmission.

Key words fiber optics; fiber amplifier; end-pump coupler; double-cladding photonic crystal fiber; all fiber

OCIS codes 060.2320; 140.3510; 140.3615; 140.3280

1 引言

光纤激光器以其光束质量好、结构紧凑、体积小、易散热、工作稳定等诸多优点,受到人们的广泛关注^[1]。近年来,随着抽运技术和光纤制造工艺的不断成熟,单根单模双包层光纤激光器的输出功率迅速提高。随着

收稿日期: 2017-06-05; **收到修改稿日期:** 2017-07-16

基金项目: 国家自然科学基金(61370045)

作者简介: 刘君(1992—),女,硕士研究生,主要从事光纤器件方面的研究。E-mail: 1506347288@qq.com

导师简介: 陈子伦(1978—),男,博士,副研究员,主要从事光纤器件方面的研究。

E-mail: zilun2003@163.com(通信联系人)

输出功率的不断提高,光纤非线性效应带来的限制越来越大。光纤的非线性效应与光纤的模场面积成反比,可以通过增大纤芯直径来抑制非线性效应^[2],但随着纤芯直径的不断增加,激光光束质量不断下降。双包层光子晶体光纤(PCF)具有独特的光学特性,可以实现在增大光纤模场直径的同时保持激光的单模传输^[3],从而解决了普通双包层光纤放大器所遇到的难题。

光子晶体光纤具有无截止单模、大数值孔径(NA)、机械和热稳定好等特点^[4],但其特殊的空气孔结构增大了研究人员对相关光纤器件研究的难度,因此大部分双包层光子晶体光纤在应用中都采用空间结构。2009年,王建明等^[5]利用包层直径为 $400\ \mu\text{m}$ 、纤芯直径为 $20\ \mu\text{m}$ 的掺镱(Yb^{3+})双包层光子晶体光纤作为增益光纤,搭建空间结构激光器,实现了 $428.5\ \text{W}$ 的高功率单模激光输出。同年,李剑峰等^[6]利用空间结构,并使用不同结构参数(包层直径为 $170\ \mu\text{m}$ 、纤芯直径为 $40\ \mu\text{m}$)的掺 Yb^{3+} 大模场光子晶体光纤实现了 $210\ \text{W}$ 的激光输出。2014年,赵楠等^[7]设计并制备了双包层大模场保偏掺 Yb^{3+} 光纤,并利用该光纤实现了空间结构的飞秒脉冲放大和全光纤结构的连续激光放大,为我国自主研制光纤激光打下基础。2016年,冯素雅等^[8]利用自制的芯径为 $110\ \mu\text{m}$ 的掺 Yb^{3+} 光子晶体光纤实现了平均功率为 $309\ \text{W}$ 的皮秒级脉冲能量输出。由于空间结构的稳定性较差,因此基于光子晶体光纤的全光纤结构也逐渐出现并发展起来。2009年,Noordegraaf等^[9]利用一种 $(6+1)\times 1$ 保偏光子晶体光纤耦合器与光子晶体光纤熔接,实现了全光纤化的放大器结构,并实现了平均功率为 $5.5\ \text{W}$ 、峰值功率为 $4.5\ \text{kW}$ 的脉冲激光输出。2014年,Sipes等^[10]使用一种特制的增益光子晶体光纤实现了全光纤放大器结构。当输入抽运功率达到 $500\ \text{W}$ 时,输出端可得到超过 $400\ \text{W}$ 的能量输出。2016年,Boulet等^[11]报道了一个 $(6+1)\times 1$ 一体化光子晶体光纤放大器产品,抽运输入总能量为 $300\ \text{W}$,在 $1064\ \text{nm}$ 处得到了超过 $210\ \text{W}$ 的功率输出,且光束质量因子 $M^2 < 1.2$,光-光转化效率超过 70% 。国内关于光子晶体光纤的全光纤化系统的研究较少。2014年,黄志华等^[12]实现了基于主振荡多级放大结构的光子晶体光纤全光纤脉冲放大器,获得近毫焦耳级、单横模的脉冲能量输出。

本文报道了一种全光纤化双包层光子晶体光纤放大器。增益光纤采用NKT Photonics公司的外包层直径、内包层直径、纤芯直径分别为 $440, 200, 40\ \mu\text{m}$ (NA 为 $0.06/0.46$)的双包层掺 Yb^{3+} 保偏光子晶体光纤,自主设计并制作了匹配的组束光纤熔锥束,并通过不断优化切割和熔接参数,实现了光子晶体光纤的切割、熔接以及光子晶体光纤放大器的全光纤化。对波长为 $1064\ \text{nm}$ 的 $2\ \text{W}$ 连续光进行放大,抽运能量为 $150\ \text{W}$ 时,得到输出能量为 $108.1\ \text{W}$,斜率效率为 72.7% 。

2 全光纤双包层光子晶体光纤放大器的制作

实验中使用外包层直径、内包层直径、纤芯直径分别为 $440, 200, 40\ \mu\text{m}$ (NA 为 $0.06/0.46$)的双包层掺 Yb^{3+} 保偏光子晶体光纤,光纤长度约为 $3.3\ \text{m}$,光子晶体光纤的横截面图如图1所示。光子晶体光纤中的空气孔直径约为 $2.5\ \mu\text{m}$,孔间距约为 $10.8\ \mu\text{m}$,空气孔直径为 $5.2\ \mu\text{m}$,在 $1064\ \text{nm}$ 处的模场直径约为 $33\ \mu\text{m}$ 。该光子晶体光纤空气孔的设计可以保证纤芯内的传输模式仅为基模,而其他高阶模式不满足传输条件。光子晶体光纤对波长为 $976\ \text{nm}$ 光的吸收系数为 $10\ \text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

实验中自主设计并制作匹配PCF的 $(6+1)\times 1$ 端面抽运耦合器,其中6根抽运光纤均采用包层直径、纤芯直径分别为 $105\ \mu\text{m}$ 和 $125\ \mu\text{m}$ (NA 为 0.22)的多模光纤,信号光纤则采用普通单模光纤SMF-28。应

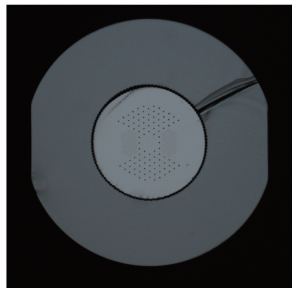


图1 光子晶体光纤横截面图

Fig. 1 Cross-section of photonic crystal fiber

用套管法制作熔融光纤拉锥束,具体操作流程主要分为玻璃管拉锥、穿入光纤束和对穿入光纤的玻璃管进行二次拉锥 3 个步骤。需要注意的是,在操作过程中要确保信号光纤在中心位置,由此来保证后续的熔接操作可以实现中心对准,熔融光纤拉锥束的横截面图如图 2 所示,中心光纤为信号光纤,周围的 6 根光纤为抽运光纤。对光纤拉锥束中的信号光纤透过率进行测试,得到其透过率为 98%。随后使用 CO₂ 熔接机(LZM-100,藤仓,日本)对光纤熔融拉锥束与增益光子晶体光纤进行熔接,通过调整熔接参数,可保证光子晶体光纤的空气孔在熔接过程中不出现大范围塌缩,且该熔接过程对光子晶体光纤的光学性能无影响,从而实现光纤熔融拉锥束与增益光子晶体光纤的高强度熔接,由此完成端面抽运耦合器的制作。最后设计匹配增益光子晶体光纤的锥棒结构,并完成光子晶体光纤的锥棒熔接。在光纤锥棒的输出端面镀一层对波长范围为 1000~1100 nm 的激光高透射的增透膜,实验中采用的信号光波长为 1064 nm,波长在锥棒的增透区间内,可以防止激光反馈,从而可保护整个放大系统。光纤锥棒的熔接结果如图 3(a)所示,采用氢氧焰加热玻璃锥棒可保证锥棒和光子晶体光纤的中心对准,当锥棒加热到一定的熔融状态时,快速推进光子晶体光纤并结束电极放电,利用锥棒余热实现锥棒与光子晶体光纤的熔接。实验中采用的锥棒结构的输出端面直径为 8.2 mm,长度为 8 mm,光子晶体光纤与锥棒的熔点图和实物图如图 3 所示。

在完成了端面抽运耦合器的制作、光纤锥棒的制作和光子晶体光纤的切割、熔接后,即实现了全光纤光子晶体光纤放大器的制作。

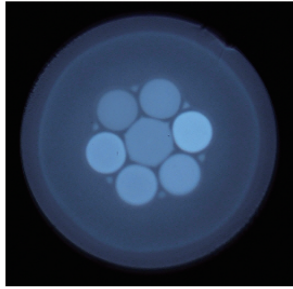


图 2 熔融光纤拉锥束横截面图

Fig. 2 Cross-section of taper beams of melt fiber

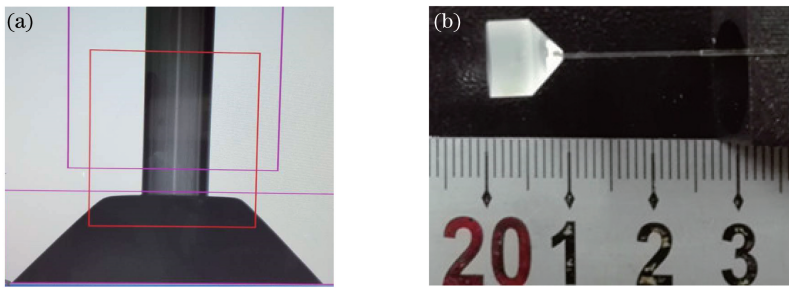


图 3 (a)光子晶体光纤与锥棒熔点图;(b)实物图

Fig. 3 (a) Spliced point of photonic crystal fiber and taper rod; (b) physical map

3 测试及分析

对全光纤化双包层光子晶体光纤放大器进行测试,使用波长为 976 nm 的稳波长抽运源提供能量,信号光为波长为 1064 nm、功率为 2 W 的连续光。在光子晶体光纤的输出端搭设准直镜和二色镜,一体化双包层光子晶体光纤放大器的实验装置如图 4 所示。二色镜与入射光的夹角为 22.5°时,可以实现对波长为 1064 nm 的光高透射、对波长为 976 nm 的光高反射的效果。

对放大器进行测试,先输入信号光,信号光的透过率在 92% 以上。然后输入抽运光,实验中将三路抽运光同时注入,每路功率约为 50 W。将整个放大器置于水冷板上,采用水冷降温有利于整体光纤的散热。系统工作时,温度维持在室温左右。随着抽运功率的提高,信号光的输出功率也不断提高。输出功率与抽运功

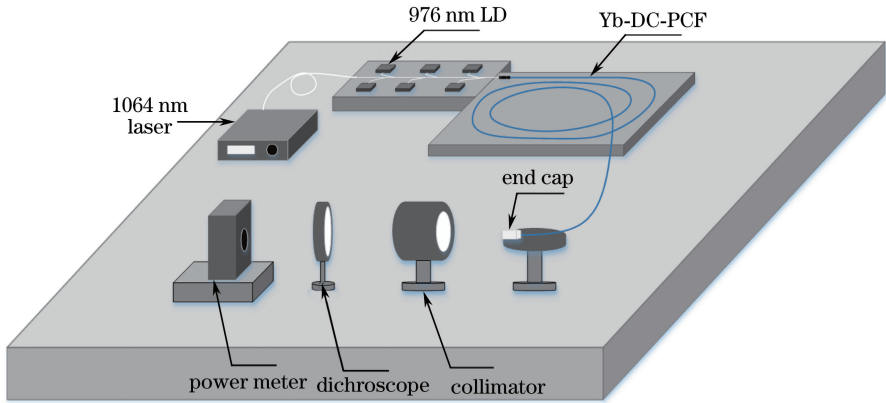


图 4 一体化双包层光子晶体光纤放大器实验装置

Fig. 4 Experimental setup of integrated double-cladding photonic crystal fiber amplifier

率的变化关系如图 5 所示,由图可见,当抽运功率达到最大 151.83 W 时,最大输出功率为 108.1 W,斜率效率为 72.7%。

将光谱仪放置在功率计上,利用光谱仪分析经二色镜滤光之后的光谱成分,得到经过二色镜后的光谱如图 6 所示,由图中可以明显看到,进入功率计的光为纯净的信号光,波长为 1064.21 nm,无抽运光掺入。测量经二色镜反射的激光,可以发现激光中除含有残留抽运光之外,还含有一定量的信号光,随着抽运功率的增加,二色镜反射激光的能量随之增加,其中信号光的能量不断变大,这可能是造成图 5 中输出功率曲线在 100 W 左右稍有下降的原因。

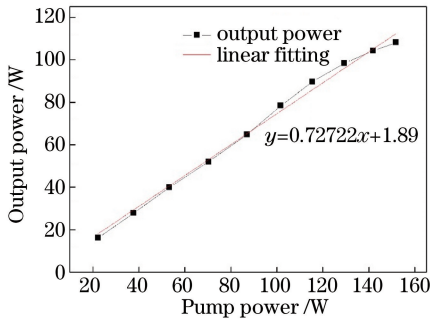


图 5 输出功率与抽运功率的变化关系

Fig. 5 Relationship between output power and pump power

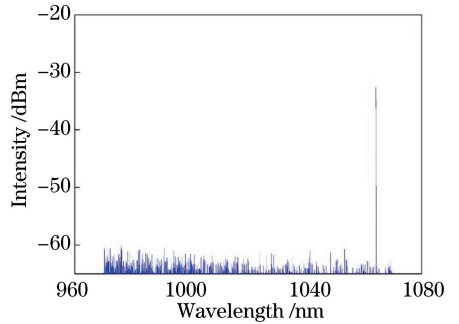


图 6 经二色镜后的光谱

Fig. 6 Spectrum after dichroscope

实验中采用光斑分析仪(型号 L11059, Spiricon 公司, 美国)对输出端面的光斑进行分析,光斑分析仪得到的光斑图如图 7 所示。由图可见,光子晶体光纤的输出近场为标准的基模光斑,光强按高斯分布。输出光斑两侧存在较小亮斑的原因主要是少量包层光的泄漏,包层光的出现是由于光纤锥棒熔接时,熔接效果并非

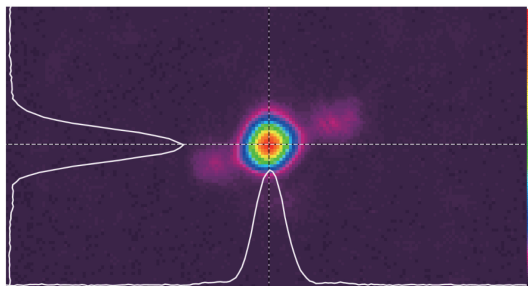


图 7 光斑分析仪得到的光斑图

Fig. 7 Spot pattern obtained by spot analyzer

最优,造成部分信号光从纤芯泄漏,并对后面光斑测量产生影响,后续实验中将会不断优化熔接效果,以减少包层光泄露。所使用的光子晶体光纤纤芯满足无截止单模传输条件,在模场面积增大的情况下仍只允许单模传输,因此近场光斑为基模光斑,并实现了高光束质量的激光输出。

制作完成的全光纤光子晶体光纤放大器获得了很高的转换效率和输出功率,降低了空间结构的透镜组耦合程度,提高了系统的稳定性,减少了抽运光的浪费。利用全光纤光子晶体光纤放大器实现了连续激光的放大,对于脉冲激光放大还未进行深入研究。光子晶体光纤相对于脉冲激光放大的优势很大,可以在进行功率放大的同时减小非线性作用对脉冲宽度的影响。目前,关于光子晶体光纤全光纤器件方面的研究尚未成熟,还有很大的完善空间,随着光子晶体光纤器件的逐步完善,光子晶体光纤的应用将更加广泛。

4 结 论

采用掺 Yb^{3+} 双包层光子晶体光纤作为激光增益介质,完成了相匹配的信号抽运耦合器的制作,通过优化熔接参数可以实现高强度低损耗熔接,并在掺 Yb^{3+} 双包层光子晶体光纤输出端完成光纤锥棒熔接,实现了全光纤光子晶体光纤放大器的制作。对放大器采用水冷方式降温,在抽运功率为 150 W 时可以实现 108.1 W 的功率输出,斜率效率可达 72.7%。实验中实现了光子晶体光纤放大器的全光纤化结构,提高了系统的稳定性,降低了光子晶体光纤的使用门槛,促进光子晶体光纤应用的快速发展。后续实验中将继续优化光纤长度、熔接参数等参数,以实现更加高效的连续和脉冲激光输出。

参 考 文 献

- [1] Galvanauskas A. High power fiber lasers[J]. Optics & Photonics News, 2004, 15(7): 42-47.
- [2] Mortensen N A. Effective area of photonic crystal fibers[J]. Optics Express, 2002, 10(7): 341-348.
- [3] Birks T A, Knight J C, Russell P S J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. Optics Letters, 1997, 22(13): 961-963.
- [4] Hansen K P, Olausson C B, Broeng J, *et al.* Airclad fiber laser technology[J]. Optical Engineering, 2011, 50(11): 111609.
- [5] Wang Jianming, Duan Kailiang, Zhao Zhenyu, *et al.* Experimental study of high power photonic crystal fiber laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(1): 11-14.
王建明, 段开棕, 赵振宇, 等. 高功率光子晶体光纤激光器实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(1): 11-14.
- [6] 李剑峰, 段开棕, 刘永智, 等. 掺 Yb^{3+} 大模场光子晶体光纤激光器获 210 W 输出[J]. 科学通报, 2009, 54(20): 3021-3023.
- [7] Zhao Nan, Chen Gei, Wang Yibo, *et al.* Double-clad large-mode-area polarization-maintaining ytterbium doped photonic crystal fiber[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(2): 168-173.
赵楠, 陈瑰, 王一礴, 等. 双包层大模场面积保偏掺镱光子晶体光纤研究[J]. 物理学报, 2014, 63(2): 168-173.
- [8] 冯素雅, 王孟, 王世凯, 等. 百微米芯径掺镱光子晶体光纤实现皮秒级脉冲放大输出[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1115001.
- [9] Noordegraaf D, Nielsen M D, Skovgaard P M W, *et al.* Pump combiner for air-clad fiber with PM single-mode signal feed-through[C]. IEEE Conference on Lasers and Electro-Optics, 2009 and 2009 Conference on Quantum electronics and Laser Science, 2009: 10842605.
- [10] Sipes Jr D L, Tafoyaa J D, Schulza D S, *et al.* High-power monolithic fiber amplifiers based on advanced photonic crystal fiber designs[C]. SPIE, 2014, 8961: 896114.
- [11] Boulet J, Guiraud G, Santarelli G, *et al.* Multi-100 W class, fully integrated, monolithic ytterbium-doped photonic-crystal fiber amplifier module[C]. SPIE, 2016, 9730: 97300Q.
- [12] Huang Zhihua, Lin Honghuan, Wang Jianjun, *et al.* All-fiber pulsed amplifier based on photonic crystal fiber[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(2): 021001.
黄志华, 林宏奂, 王建军, 等. 基于光子晶体光纤的全光纤脉冲放大器[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(2): 021001.