

光子晶体光纤在光纤激光器中的应用

牛静霞,周桂耀,侯蓝田,宋昭远,靳涛涛,董世蕊,夏长明
(燕山大学 红外光纤与传感研究所,河北 秦皇岛 066004)

摘要:光子晶体光纤研究的日趋成熟不仅拓宽了光纤激光器的研究领域,同时也推动了激光技术的发展。文章针对大模面积双包层光子晶体光纤的特点,探讨了其在光纤激光器中的应用,重点阐述了光子晶体光纤在光纤激光器应用领域的最新进展,并介绍了燕山大学在制备稀土掺杂光子晶体光纤上所取得的最新成果。

关键词:光子晶体光纤;光纤激光器;大模面积;掺 Yb^{3+} 双包层

中图分类号:TN253 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2009)01-0044-04

Applications of photonic crystal fiber in fiber laser

NIU Jing-xia, ZHOU Gui-yao, HOU Lan-tian,
SONG Zhao-yuan, JIN Tao-tao, DONG Shi-rui, XIA Chang-ming
(Institute of Infrared Fiber and Sensors,
Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China)

Abstract: The advancement of photonic crystal fiber not only expanded the field of fiber laser research, but also promoted the development of laser technology. For the fiber laser application, the characteristics of large mode double-clad area PCF were described in this article. It was introduced that the latest progress the PCF used in the optical fiber laser and the achievement of the YanShan University about the manufacture of doped PCF.

Key words: photonic crystal fiber, fiber laser, large mode area, Yb^{3+} -doped double-clad

0 引言

光纤激光器作为激光领域的新兴技术,近年来成为科学研究领域的热点问题。光纤激光器采用光纤作为增益介质,泵浦光在纤芯内形成高功率密度,当加入正反馈回路时,便产生激光输出^[1]。对于采用常规光纤的光纤激光器,要求注入到纤芯的泵浦光为单模,这就限制了泵浦光的入纤效率。且当激光器高功率运转时,由于纤芯的非线性效应,也将限制输出功率的极限值。光子晶体光纤由于其灵活的光学可控性和特殊结构,可具有大模面积且保持无限单模的特性,有效地克服了常规光纤的设计缺陷^[2,3]。以这种具有新颖波导结构和特性的光纤作为有源掺杂的载体,并把双包层概念引入到光子晶体光纤中,将使光纤激光器的各种性能

有了显著提高^[4]。因此,基于光子晶体光纤的光纤激光器以其高输出功率、低阈值、高效率、窄线宽和可调谐等优点,其发展和应用得到了社会各方面的广泛关注。本文将主要结合大模面积双包层光子晶体光纤的结构特点,系统分析光子晶体光纤在高功率光纤激光器领域的最新进展和应用前景,并介绍我们课题组最新制备的各种结构新颖的稀土掺杂光子晶体光纤。

1 大模面积双包层光子晶体光纤

大模面积光子晶体光纤是通过设计光子晶体光纤的微结构来获得大模场单模面积的一种新型特种光纤,其纤芯密度大为降低,有效地抑制了久难解决的热光问题。

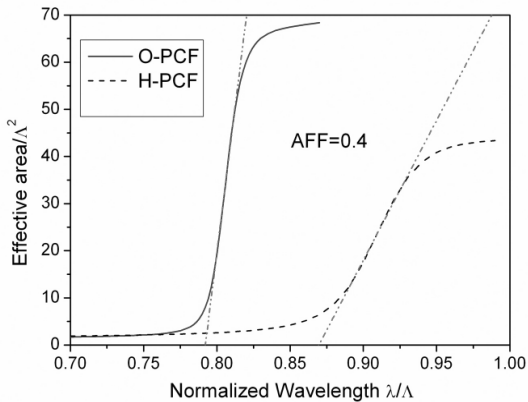
我们设计了八角排列光子晶体光纤(O-PCF)并采用有效面积法研究其模式截止特性。图1(a)和(b)分别为二阶模有效面积和基模有效面积随波长的变化关系。通过计算不同结构O-PCF和六角排列光子晶体光

收稿日期:2008-09-23。

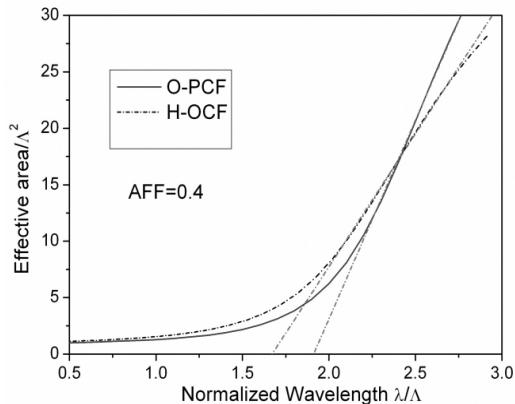
基金项目:国家自然科学基金重点项目(60637010)资助。

作者简介:牛静霞(1982-),女,硕士研究生,主要研究方向为光子晶体光纤的制备和检测。

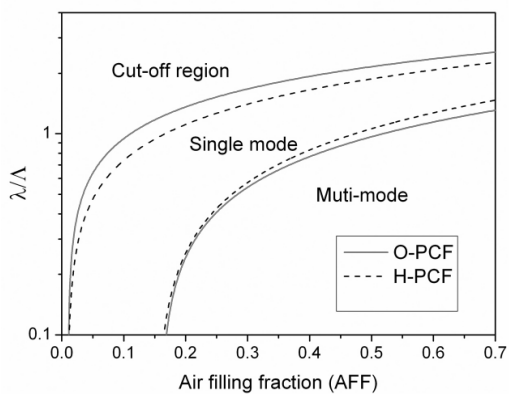
纤(H-PCF)二阶模和基模的截止波长,得到了两种光纤非限制模,基模和二阶模的相位图,如图1(c)。其中介于非限制模和二阶模两条相位线之间的区域为单模传输范围,并且可以很容易看出在相同填充率时O-PCF的单模运转区域要比H-PCF的宽。所以通过设计灵活设计包层结构,可以很好地实现大模场面积,并且保持单模运转的光子晶体光纤。



(a) O-PCF 与 H-PCF 二阶模有效面积随波长的变化关系



(b) O-PCF 与 H-PCF 基模有效面积随波长的变化关系



(c) O-PCF 和 H-PCF 非限制模,基模和二阶模相位图

图1 O-PCF 与 H-PCF 二阶模和基模有效面积随波长的变化关系及相位图

大模面积光子晶体光纤可以承受和传输更高的激光功率,并且具有高转换效率、高亮度和高光束质量等优点;同时,利用光子晶体光纤的微结构可设计特性、可将大模面积光子晶体光纤的包层设计成高数值孔径的双包层结构。双包层结构的大模面积光子晶体光纤具有大模场面积,能够极大地降低非线性效应,而增大的数值孔径结构又能够极大地提高抽运耦合效率。掺杂稀土的双包层光子晶体光纤是由掺杂的纤芯和具有光子晶体结构的包层组成。光纤的内包层区域内含有许多规则排列的、沿轴向延伸的微小空气孔;内外包层由紧密排列的大空气孔相隔。这种光纤也很容易实现大模面积和大数值孔径内包层的设计。大的芯径尺寸增强了对泵浦光的吸收,高数值孔径内包层提高了泵浦光的耦合效率,减少了光纤的长度,从而减小了纤芯中的非线性效应。

1998年, Knight 等首次拉制出了大模面积光子晶体光纤^[5]。目前光子晶体光纤的模场面积可以做 $1500\mu\text{m}^2$ 以上,比传统单模光纤的模场面积大一个数量级。2006年3月,德国 Jena 研究报导了一种新型的 LMA 棒状 PCF, 通过缺失光纤中心的 19 个空气孔形成 LMA, 掺杂纤芯直径高达 $60\mu\text{m}^2$, 模场面积高达 $2000\mu\text{m}^2$; 实验中仅利用 0.58m 这种光纤, 在 425W 泵浦功率下, 获得 320W 连续单模激光输出, 斜率效率高达 78%, 相当于 1m 产出激光 550W。2007年, Yukihiko Tsuchida 等^[7]设计了在 1.064mm 处, 模场面积达 1400mm^2 , 高阶模损耗大于 1dB/m, 弯曲半径可达 5cm, 光束质量因子 $M^2=1.15$ 的大模面积光子晶体光纤。

2 光子晶体光纤在激光器中的应用

光纤激光器由于具有结构紧凑、效率高及光束质量好等优点, 成为固体激光器发展的热点。而基于光子晶体光纤的光纤激光器因其具有超大的模面积、宽带单模传输、大幅度可调的色散特性等优点, 也有着更为广阔的应用前景。从 2000 年首台光子晶体光纤激光器问世到现在的短短几年间, 各种类型的光子晶体光纤激光器纷纷涌现。其中, 由于掺杂稀土元素大模面积 PCF 激光器解决了普通光纤激光器在激光器高功率运转时会由于纤芯能量过于密集而出现一些非线性效应并会导致光纤的损坏的问题而成为研究的重要方向。

目前报导的掺杂大模面积 PCF 激光器主要有掺 Yb^{3+} 、掺 Nd^{3+} 和掺 Er^{3+} 三种 PCF 激光器。报导最多的是掺 Yb^{3+} PCF 激光器。

2.1 传统掺 Yb³⁺PCF 激光器

2000年,英国巴斯大学演示了一种掺 Yb³⁺的 PCFL,在 730nm 波长以上具有 GVD 的 PCF 中首次获得激光作用^[6]。该激光器具有大空气孔和小芯径的 PCF,固体纤芯直径为 1.6 μm ,掺杂区直径为 0.9 μm ;其激光阈值小于 10mW,输入功率 330mW 时,获得 14mW 的输出功率。

2001年 Wadsworth 等人报导了第一台大模面积掺 Yb³⁺PCF 激光器^[7]。采用的泵浦光源为波长 915nm 的钛宝石激光器,当泵浦光为 1.03W 时得到了波长 1040nm 处 315mW 的单模激光输出。同年, Furusawa 等人用波长 966nm 的半导体激光器泵浦一段长度约为 1m 的掺 Yb³⁺PCF,得到平均输出功率为 17mW,脉宽约 15ps,斜率效率约 75%,波长调谐范围从 1030~1050nm,谱宽为 0.1nm,实现了第一台掺 Yb³⁺锁模 PCF 激光器^[12]。

2.2 掺 Yb³⁺双包层 PCF 激光器

将光子晶体光纤设计成双包层结构,可提高其对泵浦光的吸收。用厚度小于传输波长的硅条在其内包层周围悬置硅网构成空气包层,可以大大提高内包层的数值孔径。大数值孔径内包层的 PCF 可以较大地缩小内包层直径而维持对泵浦光的吸收不变。同时,通过提高纤芯与内包层的面积比可以提高纤芯对泵浦光的吸收,并使 PCF 的工作长度缩短。大模面积的设计和有效缩短吸收长度可以大大减小光纤中的非线性效应,有利于制作高功率 PCF 激光器。

2003年1月, Wadsworth 等人报导了利用大模面积空气包层 PCF 研制的高功率 PCF 激光器,其结构为双程后向线性腔结构,最大输出功率 3.9W,斜率效率 30%,实现单横模运转。所采用的 PCF 纤芯直径为 15 μm ,内包层数值孔径大于 0.8^[8]。德国耶拿的 Friedrich Schiller 大学和丹麦的 Crystal Fiber 公司根据双包层和大模场面积设计制作出大功率掺 Yb³⁺ PCFL。2.3m 长的空气包层 PCFL 实现了 80W 输出功率,斜效率为 78%^[9]。该双包层由一个具有六角形晶格的空气孔内泵浦芯包层和一个 390nm 厚、约 50 μm 长的 SiO₂ 桥形外包层薄板构成。为了获得三角形的 28 μm 大模场面积纤芯,在拉制光纤前插入了三根掺 Yb³⁺ 的光纤棒。纤芯掺杂 Al³⁺ 以增加 Yb³⁺ 的溶解性,而且掺进了氟用来补偿掺杂 Yb³⁺ 和 Al³⁺ 后纤芯折射率的增加,使掺杂后纤芯折射率接近纯硅。此外,具有类似结构的 4m 长 PCFL 的输出功率增长到 260W,并有千瓦级的输出潜力。

2004年,英国 SPI 制备双端泵浦 12m 长的双包层光纤(内 NA 低于 0.05,芯径 40 μm),输出功率 1.36kW,输出激光波长在 1.1 μm ,光束质量因子 $M^2=1.4$,光束质量接近衍射极限,斜率为 83%^[10];丹麦 Crystal Fibre 公司制备出基于形状双折射原理研制的掺 Yb³⁺ 双包层偏振 PCF,得到了 2.9W 的偏振激光输出。其纤芯大小为 3 \times 7 μm^2 ,双折射系数为 1.4 \times 10⁻⁴。同年,英国 Strathclyde 大学与丹麦 Crystal Fibre A/S 公司合作,首次研制出具有高偏振输出的 PCFL。由于采用了不对称半导体结构,使该激光具有 200:1 以上的线性偏振,并获得 3.7W 的输出功率。

2007年,丹麦的 Crystal fibre A/S 公司制备出双包层偏振保持 Yb³⁺ 掺杂 PCF (DC-200/70-PM-Yb-ROD)。这种光纤能够做到偏振保持特性,并且其有效面积高达 2000 μm^2 ,大的有效面积保证光纤比较大的脉冲吸收,吸收系数为 30dB/m,其外径高达 1.7mm,大的外径保证了光纤有一个比较大的芯,也就不再受弯曲损耗的限制^[11]。

2008年3月,德国 Jena 研究所与丹麦 Crystal Fibre A/S 公司合作报道了一种 Yb³⁺ 掺杂单横模棒状 PCF,这种光纤具有低非线性和内在偏振稳定的优势。基模模场面积高达 2300 μm^2 ,输出功率高达 163W,在谐振腔没有任何附加偏振元件的条件下偏振度大于 85%,输出光束的质量 $M^2=1.2$,单横模窗口的范围是 1030~1080nm,与掺 Yb³⁺ 硅光纤的增益轮廓能够很好的重叠,这种用于偏振或偏振保持的稀土掺杂双包层光纤具有迄今最大的模场面积。

近几年,国外的大模面积双包层掺 Yb³⁺PCFL 发展迅速,而国内 PCF 激光器的研究刚刚起步,由于 PCF 研制技术等方面的限制,目前国内只限于中低功率的 PCF 激光器的研究。

2007年,西安光机所和四川大学使用两根单模掺 Yb³⁺ 光子晶体光纤 PCF1 和 PCF2 (纤芯直径为 40 μm ,模场面积为 1000 μm^2) 作为增益,利用自成像谐振腔技术,获得了最大相干输出功率为 95.8W,耦合效率为 90.2%。

2008年,河北大学和南开大学利用纤芯直径 23 μm 、内包层直径 420 μm 的掺 Yb³⁺ 双包层 PCF,基于利特罗装置中的闪耀光栅,实现了波长范围为 1035.425~1111.770nm 的可调谐输出。在不同的波长下,激光输出功率的平坦度为 0.8dB。在 12.11W 的最大泵浦功率下,可以得到输出功率为 3.45W 的最大输出。

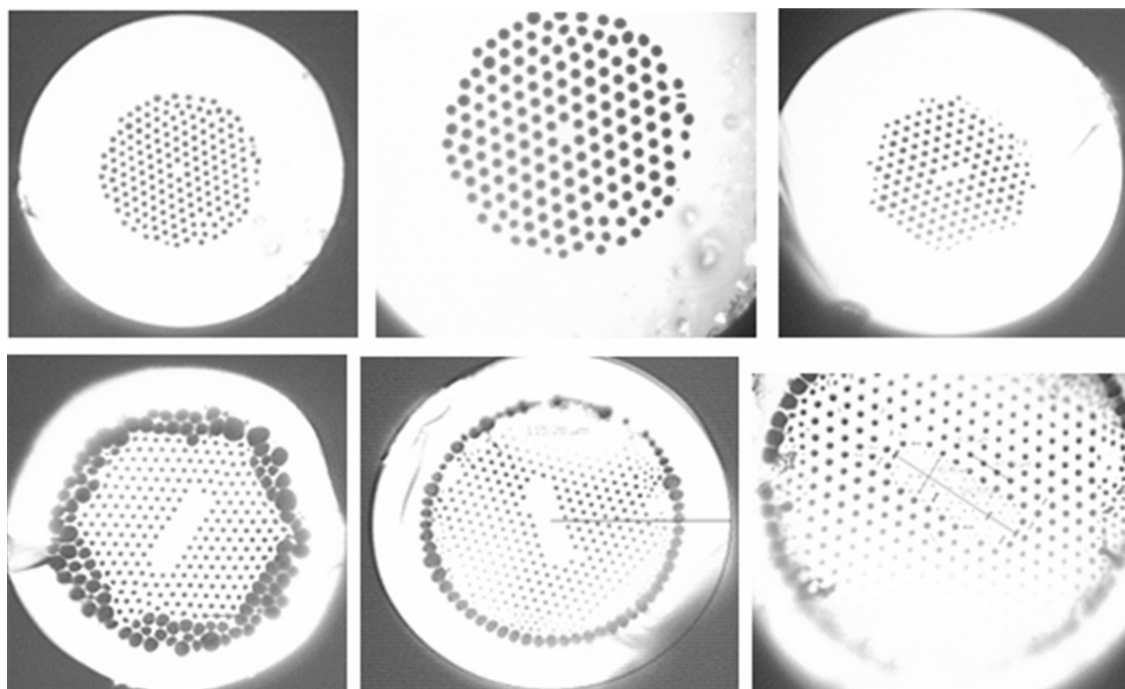


图2 燕山大学制备的几种掺 Yb³⁺光子晶体光纤及纤芯结构图

纤激光器的最新进展,充分证明了其在高功率激光器应用中广阔前景。相信随着新的光纤材料、光纤结构的不断出现和制作工艺的日趋成熟,光子晶体光纤不但将在高功率激光器领域中的应用研究更加深入、广泛,而且也将为科研工作者提供更加广阔的想象与创新的空

燕山大学红外光纤与传感研究所在国内率先进行了光子晶体光纤的研制,已设计和制造过多种特异结构和集成式微结构光纤,见图2。目前,燕山大学与天津大学和郑州大学合作,正在进行“超大功率集成式多芯微结构光纤激光器的研究”,最终目标是完成一个可以输出千瓦级的高功率光纤激光系统。所制备的掺 Yb³⁺双包层大模面积光子晶体光纤的纤芯掺杂 Yb³⁺的浓度为 2000~10000ppm。光纤的内包层分布着 5~8 层空气孔,其直径 $d=2\sim 3\mu\text{m}$,孔间距 $\Lambda=7\sim 13\mu\text{m}$ 之间。尽可能让零色散波长在泵浦波长处,并且要设计包层中的光子带隙也有利于泵浦能量的利用。外包层为大空气孔,空气填充率超过 95%,以增大和内包层的折射率差。最外层仍为玻璃材料,起支撑作用。采用此种双包层 PCF 设计,可以保证多模大功率激光泵浦时能量集中在纤芯。纤芯的输出为高偏振光束,由于光束之间的互耦合作用,使其相位保持相长相干状态,实现多光束相干输出,既具有优良光束质量,又可以很大的提高其输出功率。

3 结束语

光子晶体光纤由于其灵活的 optical 可控性和新颖的结构特性,在实现大数值孔径和大模场面积的同时,保证单横模运转,且耐热性能好,比常规双包层光纤更适用于高功率激光器的研制。国内外高功率光子晶体光

参考文献:

- [1] RUSSELL P. Photonic Crystal Fibers [J]. Science, 2003, 299 (12): 358-362.
- [2] MANGA B J, KNIGHT J C, BIRKS T A, et al. Experimental study of dual-core photonic crystal fiber [J]. Electron. Lett, 2000, 36(16):1358-1359.
- [3] MAFI A, MOLONEY J V. Phase locking in passive multi-core photonic crystal fiber [J]. Opt. Soc. Am. B, 2004, 21 (5): 897-902.
- [4] KNIGHT J C, BIRKS T A, RUSSELL P S J, et al. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. Opt. Lett, 1996, 21(19): 1547-1549.
- [5] MORTENSEN N A, NIELSEN M D, FOLKENBERG J R, et al. Improved large-mode-area endlessly single-mode photonic crystal fibers [J]. Opt. Lett, 2003, 28 (6):393-395.
- [6] TSUCHIDA Y, SAITOH K, KOSHIBA M, et al. Design of single-mode holey fibers with large-mode-area and low bending losses: The significance of the ring-core region [J]. Opt. Exp, 2007, 15 (4):1794-1803.
- [7] WADSWORTH W J, KNIGHT J C, RUSSELL P J, et al. Large mode area photonic crystal fiber laser[J]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2001, 23 (6):319-322.
- [8] FURUSAWA K, MONRO T M, PETROPOULOS P, et al. Mode locked laser based on ytterbium doped holey fibers [J]. Elec. Lett, 2001, 37 (9): 560-561.
- [9] 林浩佳, 阮双琛, 程超, 等. 掺 Yb³⁺双包层大模面积光子晶体光纤激光器的研究[J]. 光子学报, 2004, 7, 33 (7):797-799.
- [10] WADSWORTH W J, RERCIVA R M, BOUWMANS G, et al. High power air-clad photonic crystal fiber laser[J]. Opt. Exp, 2003, 11(1): 48-53.
- [11] LIMPET J, SCHREIBER T, NOLTE S, et al. High-power air-clad large-mode-area photonic crystal fiber laser[J]. Opt. Exp, 2003, 11(7): 818-823.