

## 空气包层大模场面积掺镱光子晶体光纤研究\*

陈瑰 蒋作文 彭景刚 李海清 戴能利 李进延†

(华中科技大学武汉光电国家实验室, 光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

(2011年10月27日收到; 2011年11月26日收到修改稿)

采用改进的化学气相沉积法和气相液相混合掺杂技术制备大芯径掺镱石英光纤预制棒, 以此作为有源纤芯制备了纤芯直径约  $90\ \mu\text{m}$  的掺镱双包层光子晶体光纤, 纤芯组分为镱铝磷共掺. 双包层光子晶体光纤的模场面积约  $1330\ \mu\text{m}^2$ , 纤芯数值孔径 0.065, 包层数值孔径 0.5. 首次实现了国产掺镱光子晶体光纤的高功率高效率激光输出, 1 m 长的光子晶体光纤激光器实现 102 W 激光输出, 斜率效率 76%.

**关键词:** 掺镱双包层, 光子晶体光纤, 模场面积, 光纤激光器

**PACS:** 42.55.Wd, 42.81.Bm

## 1 引言

镱具有能级结构简单、激发态下的荧光寿命长、抽运波长与激光器工作波长间的量子缺陷小等优势, 而石英基质的光纤具有极高的损伤阈值, 所以掺镱石英光纤被广泛用于制备各种高功率的光纤激光器和放大器. 而且, 工作在  $1.0\ \mu\text{m}$  到  $1.1\ \mu\text{m}$  波长范围内的连续和脉冲掺镱光纤激光器和放大器具有极大的实用性和广阔的应用前景, 包括材料加工、激光武器、生物光学和医学等 [1-4]. 随着功率的不断攀升, 由于非线性效应、散热、激光损伤等问题, 传统光纤激光器和放大器功率的进一步提升受到限制. 掺镱光纤与光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 设计相结合能避免这些问题, 可能是进一步提升功率的最有效的途径. PCF 较传统光纤最大的优势在于其结构设计的灵活性, 通过对纤芯周围空气孔尺寸及排列方式的设计, 可实现非线性、色散、双折射等特性的控制 [5-7], 且性能易于集成化.

空气包层大模场面积 PCF 是通过在包层中引入一圈空气孔, 可实现光纤包层数值孔径高于 0.6, 从而突破普通光纤中包层数值孔径最大为 0.46 的

限制, 且采用空气孔作为外包层有利于激光器散热, 避免了低折射率聚合物材料的高温损伤. 通过纤芯周围小空气孔直径、大空气孔间距的设计实现光纤大的模场面积、单模无截止、小弯曲半径的特性. 这种结构的设计极大地增加了光纤的耦合效率, 有效地减小了光纤的弯曲损耗, 降低了光纤中的非线性效应. 空气包层大模场面积 PCF 的设计与掺镱纤芯结合, 极大地提升了掺镱光纤的设计灵活性. 国内也开展了掺镱光子晶体光纤锁模激光器等实验研究 [8], 但其核心材料——掺镱 PCF 依赖于进口光纤, 因此研究的进展和深入受到了较大的制约.

实验设计制备了双包层大模场面积掺镱 PCF. 通过线性谐振腔结构的搭建, 首次实现了国产掺镱 PCF 的高功率、高效率激光输出, 其斜率效率高达 76%. 结合实验结果分析了 PCF 中空气孔缺失对截止波长的影响以及纤芯掺杂比例对基模有效模场面积的影响.

## 2 光子晶体光纤的设计

采用带曲线混合棱边/节点元三角形单元的有限元法结合完美匹配层对 PCF 进行模拟 [9-11]. 光纤的几何结构如图 1 所示: 空气孔直径为  $2\ \mu\text{m}$ , 空

\* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2011AA030201) 资助的课题.

† E-mail: ljj@mail.hust.edu.cn

气孔直径与空气孔间距之比及占空比为 0.15. 不考虑介质的色散特性, 石英折射率  $n_{\text{silica}}$  为 1.45; 纤芯折射率增量  $\Delta n$  为 0.0013, 为阶跃形掺杂; 空气孔折射率  $n_{\text{air}}$  为 1.

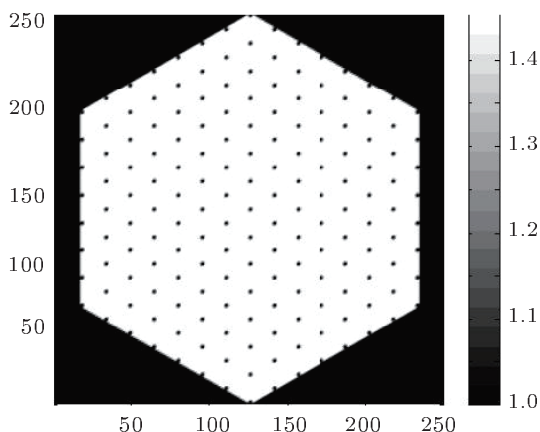


图1 光子晶体光纤模拟几何结构图

对于折射率为  $n$  的介质而言, 从 Maxwell 方程出发, 可得矢量波动方程:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 n^2 \mathbf{E} = 0, \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{E}$  为电场强度矢量,  $k_0$  为真空中的波数,  $k_0 = 2\pi/\lambda$ .

考虑到光纤具有纵向平移不变性,  $\mathbf{E}$  可被表述为  $\mathbf{E} = \mathbf{E}(x, y) \exp(-i\beta z)$ ,  $\mathbf{E}(x, y)$  为光纤横截面的场分量,  $\beta$  为传播常数. 采用曲线混合棱边/节点元三角形单元对光纤的端面进行离散化, 这种单元可以精确地模拟圆形空气孔的曲线边界, 有效地避免伪解. 通过端面离散并代入 (1) 式获得本征值方程:

$$([\mathbf{A}] - k_0^2 n_{\text{eff}}^2 [\mathbf{B}]) \{\mathbf{E}\} = 0, \quad (2)$$

式中,  $[\mathbf{A}]$  和  $[\mathbf{B}]$  为有限元矩阵,  $\{\mathbf{E}\}$  为模式的离散化电场强度,  $n_{\text{eff}}$  为模式的有效折射率.

这样矢量波动方程变成标准的本征值问题, 通过数值求解, 可得光纤的模场分布及相应的有效折射率, 进而对光纤的性能进行模拟分析. 为了更加接近计算区域而又不影响计算结果, 将各向异性完美匹配层应用于计算区域的外部边界.

有效模场面积计算公式为

$$A_{\text{eff}} = \frac{(\iint_S |\mathbf{E}|^2 dx dy)^2}{\iint_S |\mathbf{E}|^4 dx dy}, \quad (3)$$

式中,  $\mathbf{E}$  为光纤横截面上电场矢量,  $S$  表示光纤的整个横截面.

图 2 中显示的是 PCF 有源纤芯依次替代 1 个、7 个、19 个、37 个、61 个空气孔的光纤结构对应的基模有效模场面积和非线性系数 [12]. 从图中可以看出, 增加有源纤芯替代的空气孔个数可以显著地增大基模的有效模场面积, 降低非线性系数. 而当基模有效模场面积增长至一定程度后, 对降低非线性系数效果不明显. 因此采取替代 37 个空气孔的结构制备大模场有源 PCF.

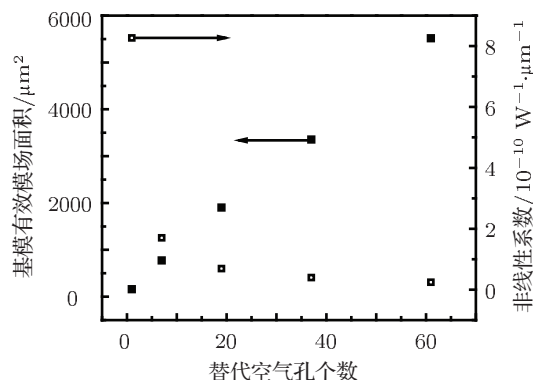


图2 替代空气孔个数对光纤基模有效模场面积和非线性系数的影响

### 3 掺镱光子晶体光纤的制备

采用改进的化学气相沉积工艺 (conventional modified chemical vapor deposition, MCVD) 和气相液相混合掺杂技术制备大芯径掺镱石英光纤预制棒 [13,14], 缩棒气氛为 1 : 10 的氯气 : 氧气混合气氛. 纤芯组分为铝镱磷共掺, 掺杂浓度分别为 0.45 mol%, 0.12 mol%, 0.2 mol%, 镱通过液相掺杂方式引入, 溶液为 1 : 10 的乙醇 : 盐酸混合液. 铝、磷通过气相沉积过程引入. 有源光纤预制棒制备完毕后, 进行精密机械加工, 实现掺杂区域面积占总预制棒截面面积的 60%, 即 60% 的芯包比的芯棒, 芯棒为圆形. PCF 采用堆拉法制备. 毛细管堆积完毕后, 用芯棒替代中心及三层毛细管, 共 37 个毛细管. 之后经套包层、拉丝、涂覆, 制备成双包层有源 PCF [15]. 拉丝速度为 7 m/min.

### 4 光纤测试及结果分析

通过光纤分析仪 EXFO NR-9200 无损检测光纤预制棒的径向折射率剖面分布. EXFO NR-9200 的折射率分辨率为  $10^{-4}$ , 测量不确定度为 0.001. 测试在常温下进行. 通过日本日立公司扫描电子

显微镜 X-650 检测光纤端面形状. X-650 的分辨率为  $60 \text{ \AA}$ . 测试在常温下进行.

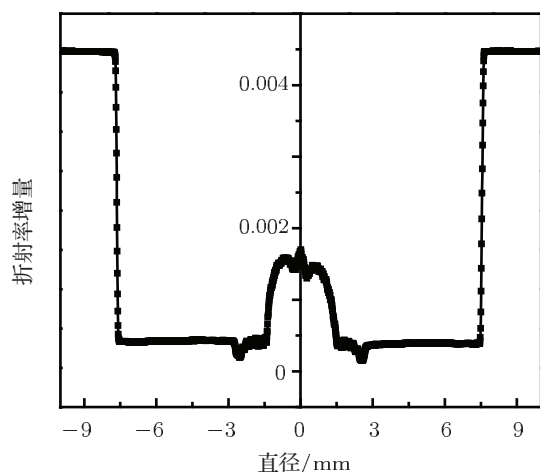


图3 光纤预制棒的折射率剖面图

光子晶体光纤激光器采用最简单的线性谐振腔结构搭建. 准直聚焦采用 1:1 成像系统, 透镜直径为 40 mm, 焦距 72.87 cm, 镀 976 nm 高透 1064 nm 高反膜. 光纤端面垂直切割, 光纤一端端面 4% Fresnel 反射和光纤另一端高反射二色镜构成谐振腔. 采用单端端面抽运方式, 泵源为 Nlight 公司的半导体激光器, 最大功率 400 W, 工作波长 976 nm, 输出光纤直径为 200  $\mu\text{m}$ , 数值孔径为 0.22. 采用水冷装置, 控制激光器工作温度为  $18^\circ\text{C}$ .

#### 4.1 折射率剖面分析

图 3 给出了掺镜光纤预制棒的径向折射率剖面分布. 常规光纤预制棒的有源掺杂区域直径约

为 1.2 mm. 为制备大芯径光纤预制棒, 采用多趟沉积的方式, 实现有源掺杂区域的直径达 3 mm. 通过精确控制气相掺杂过程中加热温度和气体流量对铝和磷掺杂浓度进行控制, 调节折射率分布形状.

#### 4.2 光子晶体光纤形貌分析

图 4 给出了空气包层大模场面积掺镜 PCF 的扫描电镜测试结果. 通过扫描电镜照片右下端的比例尺寸可以计算出 PCF 的具体参数: 纤芯直径约为 90  $\mu\text{m}$ , 空气孔直径约为 2  $\mu\text{m}$ , 占空比约为 0.15; 内包层直径为 300  $\mu\text{m}$ ; 空气包桥数为 76 个, 桥宽约为 630 nm, 桥长约为 28.5  $\mu\text{m}$ ; 外包层直径为 500  $\mu\text{m}$ . 结合折射率分布测试结果, 模拟获得 PCF 的模场面积约为 1330  $\mu\text{m}^2$ , 纤芯数值孔径 0.065, 包层数值孔径 0.5. PCF 的模场面积小于设计模拟结果, 这是由于预制棒加工芯包比小于 1. 基模有效模场面积随芯包比的增加呈指数型增长, 如图 5 所示. 因此加工更高芯包比例的芯棒, 将有利于光纤实现更大的有效模场面积.

#### 4.3 激光性能分析

图 6 为由空气包层大模场掺镜 PCF 搭建的激光器系统斜率效率图. 抽运功率为 10 cm 长短光纤标定的入纤功率, 激光功率为 1.08  $\mu\text{m}$  波长处的激光功率. 激光器最高实现 102 W 激光输出, 斜率效率为 76%. 从图 6 中可以看出, 在当前百瓦级功率输出的情况下, 未观测到斜率效率的降低. 因此进一步增大抽运功率, 光纤激光器可以实现更高功率的激光输出.

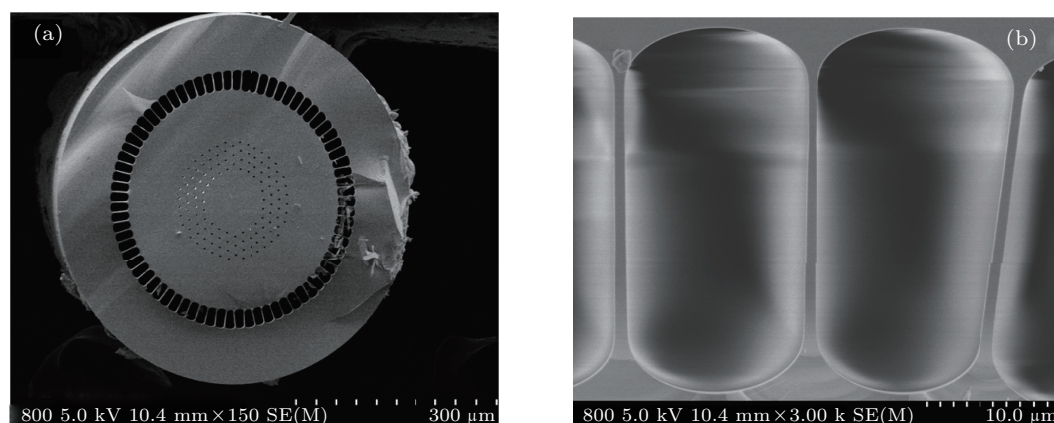


图4 (a) 光子晶体光纤横截面扫描电镜图; (b) 空气包层扫描电镜图

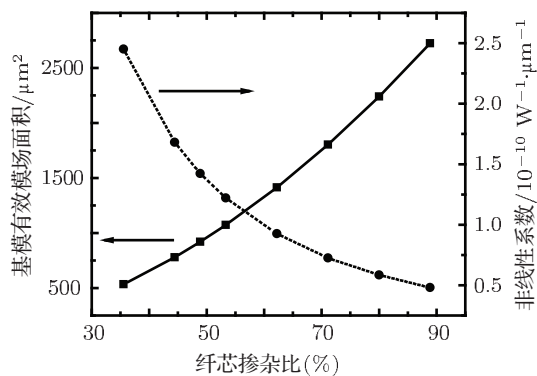


图5 纤芯中掺杂区域所占比例对光纤基模有效模场面积和非线性系数的影响

图7为掺镜光子晶体光纤激光器激光光束的强度分布,从图中可以看出激光器为多模.对于缺失37孔的光纤结构,没有无截止单模特性<sup>[16,17]</sup>,而且即便是纤芯未掺杂的条件下要实现光纤单模

传输,就现在的制备工艺而言也非常困难.因此需要采取弯曲盘绕或其他模式控制技术,提高激光器光束质量.

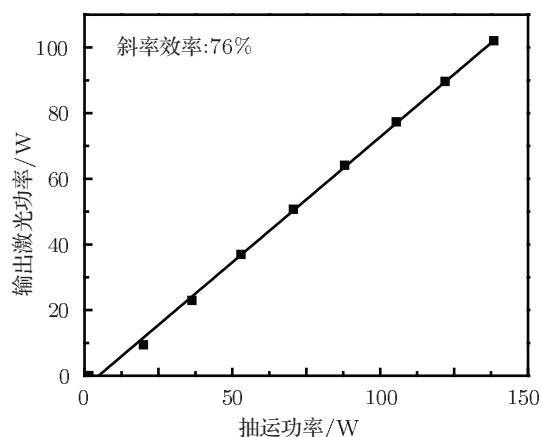


图6 高功率掺镜光子晶体光纤的激光特性

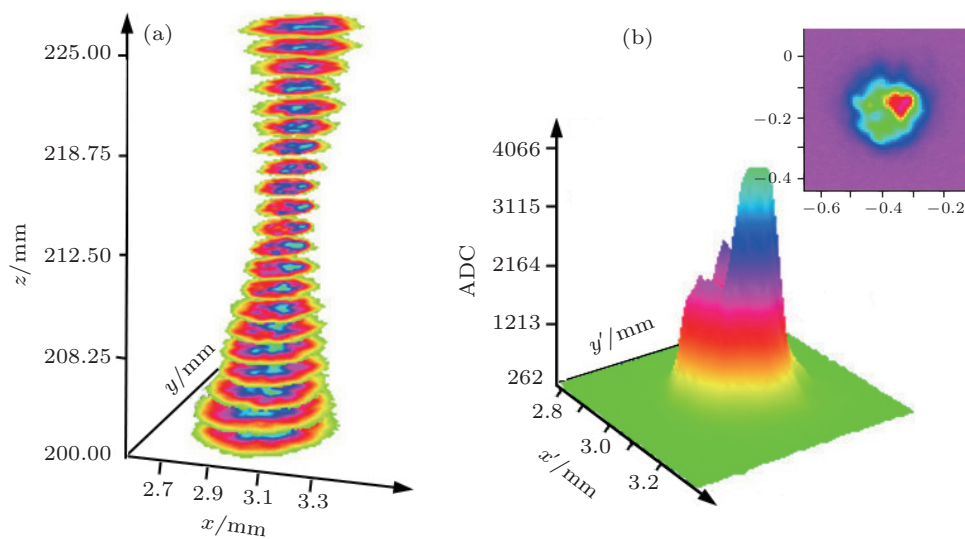


图7 (a) 激光光束在光轴上的光斑演变图; (b) 激光光束横截面强度分布

## 5 结论

本文制备了双包层大模场面积掺镜 PCF, 并通过线性谐振腔结构的搭建, 首次在国内实现双包层掺镜光子晶体光纤激光器, 该激光器具有高的斜率效率和输出功率. 结合实验结果分析了加工光纤预制棒芯包比对 PCF 基模模场面积的影响, 高精度加

工制备大芯包比有利于增大 PCF 的模场面积. 大的模场面积意味着光纤可实现更高的激光功率输出. 然而这种结构的设计也导致了光束质量的恶化, 需采用模式控制技术优化光纤激光器的光束质量.

感谢上海光机所和天津大学超快实验室在相关测试方面的帮助.

- [1] Limpert J, Schreiber T, Clausnitzer T, Zöllner K, Fuchs H, Kley E, Zellmer H, Tünnermann A 2002 *Opt. Express* **10** 628
- [2] Hideur A, Chartier T, Ozkul C, Sanchez F 2001 *Opt. Lett.* **26** 1054
- [3] Okhotnikov O G, Gomes L, Xiang N, Jouhti T, Grudinin A B 2003 *Opt. Lett.* **28** 1522
- [4] Selvas R, Sahu J K, Fu L B, Jang J N, Nilsson J, Grudinin A B, Ylä-Jarkko K H, Alam S A, Turner P W, Moore J 2003 *Opt. Lett.* **28** 1093
- [5] Li S G, Liu X D, Hou L T 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1180 (in Chinese) [李曙光, 刘晓东, 侯蓝田 2004 物理学报 **53** 1180]
- [6] Yan F P, Li Y F, Wang L, Gong T R, Liu P, Liu Y, Tao P L, Qu M X, Jian S S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5735 (in Chinese) [延风评, 李一凡, 王琳, 龚桃荣, 刘鹏, 刘洋, 陶沛琳, 曲美霞, 简水生 2008 物理学报 **57** 5735]
- [7] Wang X Y, Li S G, Liu S, Zhang L, Yin G B, Feng R P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 064212 (in Chinese) [王晓琰, 李曙光, 刘硕, 张磊, 尹国冰, 冯荣普 2011 物理学报 **60** 064212]
- [8] Song Y J, Hu M L, Liu B W, Chai L, Wang Q Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6921 (in Chinese) [宋有建, 胡明列, 刘博文, 柴路, 王清月 2008 物理学报 **57** 6921]
- [9] Saitoh K, Koshiba M 2002 *IEEE J. Quantum Electron* **38** 927
- [10] Brechet F, Marcou J, Pagnoux D, Roy P 2000 *Opt. Fiber Technol.* **6** 181
- [11] Koshiba M 2002 *IEICE Trans. Electron.* **85** 881
- [12] Mortensen N A 2002 *Opt. Express* **10** 341
- [13] Webb A, Boyland A, Standish R, Yoo S, Sahu J, Payne D 2010 *J. Non-Cryst. Solids* **356** 848
- [14] Nagel S R, MacChesney J B, Walker K L 1982 *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques* **82** 305
- [15] Guo T Y, Lou S Q, Li H L, Jian S S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4724 (in Chinese) [郭铁英, 娄淑琴, 李宏雷, 简水生 2009 物理学报 **58** 4724]
- [16] Mortensen N A, Folkenberg J R, Nielsen M D, Hansen K P 2003 *Opt. Lett.* **28** 1879
- [17] Saitoh K, Tsuchida Y, Koshiba M 2005 *Opt. Express* **13** 10833

# Study of air-clad large-mode-area ytterbium doped photonic crystal fiber\*

Chen Gui Jiang Zuo-Wen Peng Jing-Gang Li Hai-Qing Dai Neng-Li Li Jin-Yan<sup>†</sup>

(*Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, College of Optoelectronic Science and Engineering,*

*Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

(Received 27 October 2011; revised manuscript received 26 November 2011)

## Abstract

The Yb<sup>3+</sup> doped double clad photonic crystal fiber (PCF) with a large core of around 90 μm in diameter is prepared from SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> core glass of an optical fiber preform through a conventional modified chemical-vapor deposition technique, solution doping and gas doping. The double clad PCF has a mode area of about 1330 μm<sup>2</sup>. The core and inner cladding have numerical apertures of about 0.065 and 0.5, respectively. 1 m long photonic crystal fiber laser generates up to 102 W output power with a slope efficiency of 76%. Such lasers are potentially scalable to high power.

**Keywords:** Yb<sup>3+</sup> doped double clad, photonic crystal fiber, mode area, fiber laser

**PACS:** 42.55.Wd, 42.81.Bm

---

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2011AA030201).

<sup>†</sup> E-mail: ljj@mail.hust.edu.cn