

## 双包层大模场面积保偏掺镱光子晶体光纤研究\*

赵楠 陈瑰 王一礴 彭景刚 李进延†

(华中科技大学, 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

(2013年9月4日收到; 2013年10月26日收到修改稿)

采用改进的化学气相沉积法和溶液掺杂法制备出掺镱石英光纤预制棒, 以该预制棒为有源纤芯制备芯区直径约为  $30\ \mu\text{m}$  的双包层保偏掺镱光子晶体光纤. 模拟计算得到该保偏光纤的模场面积约  $232\ \mu\text{m}^2$ , 双折射系数  $B$  为  $5 \times 10^{-5}$ . 利用该光纤分别进行了脉冲激光和连续激光的放大测试实验, 在国内首次实现了高效率的飞秒激光放大,  $2\ \text{m}$  长的光子晶体光纤可得到  $1.64\ \text{W}$  的激光输出, 激光放大斜率效率为  $49.8\%$ . 同时  $5\ \text{m}$  长的光纤还能够实现  $8.12\ \text{W}$  的连续激光放大输出, 斜率效率达到  $55.9\%$ , 具有较高的斜率效率. 此外, 该光纤消光比约  $10\ \text{dB}$ , 具有良好的保偏特性.

**关键词:** 掺镱双包层, 保偏, 光子晶体光纤, 激光放大

**PACS:** 42.55.Tv, 42.55.Wd, 42.60.-v, 42.81.Gs

**DOI:** 10.7498/aps.63.024202

## 1 引言

镱离子具有能级结构简单、宽吸收谱和发射谱等优点, 采用掺镱光纤作为增益介质可以大范围提升激光器的输出功率<sup>[1]</sup>. 通过设计光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 芯区周围空气孔尺寸、间距以及排列方式, 可灵活地实现无截止单模特性、高非线性、高双折射、色散可控等特性<sup>[2]</sup>; 通过取代空气孔的方式还可实现大模场面积光子晶体光纤, 有效降低光纤中的非线性效应, 使光纤能承受非常高的平均功率和峰值功率. 高功率的光子晶体光纤激光器广泛应用于材料加工、激光武器、生物光学和医学等领域中<sup>[3-6]</sup>. 但一些高功率实验中存在输出光偏振度恶化的现象<sup>[7]</sup>, 为解决该问题并简化激光器系统中的偏振控制装置, 大模场面积及保偏特性兼备的PCF提供了一个很好的途径<sup>[8-10]</sup>. 目前多采用各向异性材料制备保偏光纤, 即在光纤中一部分毛细管由硼棒替换以引入应力, 从而产生保偏特性. 同时, 引入一圈大空气孔形成双包层结构, 可有效提升包层的数值孔径, 从而提

高抽运光耦合效率. 且空气包层也有利于激光器的散热, 避免高温损伤<sup>[11]</sup>. 信号光在包层空气孔和折射率匹配的掺硼区共同作用下被限制在芯区并实现单模单偏振传输. 双包层大模场面积保偏掺镱PCF适合于高功率激光器件如飞秒激光器的发展<sup>[12-15]</sup>, 在激光加工和国防激光武器等领域具有广阔的应用前景.

在保偏掺镱PCF方面, 丹麦NKT公司一直处于国际领先地位. 该公司在2005年制备的掺镱双包层PM (polarization maintaining) PCF模场面积可达到  $700\ \mu\text{m}^2$ , 消光比超过  $15\ \text{dB}$ , 相应的光纤激光器具有  $25\ \text{W}$  左右的输出功率<sup>[8]</sup>. 德国Jena大学也在该方面取得了很好的成果, 并于2008年制备出单模单偏振掺镱PM PCF, 该光纤具有更大的模场面积, 约  $1300\ \mu\text{m}^2$ , 其光纤激光器输出功率达到  $163\ \text{W}$ , 具有  $75\%$  的高斜率效率<sup>[16]</sup>.

目前国内多家单位展开了对掺镱光子晶体光纤激光器的研究. 2012年, 华中科技大学设计制备出模场面积约  $1330\ \mu\text{m}^2$  的掺镱双包层光子晶体光纤, 采用  $1\ \text{m}$  长的光纤实现了  $102\ \text{W}$  激光输出, 斜率效率高达  $76\%$ , 首次实现了国产掺镱光子晶体光

\* 国家自然科学基金 (批准号: 81100701) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: [ljl@mail.hust.edu.cn](mailto:ljl@mail.hust.edu.cn)

纤高功率、高效率的激光输出<sup>[10]</sup>. 由于受到国外技术封锁的影响, 掺镱PCF相关技术仍有待进一步探索.

本文在PCF中引入掺硼棒构成保偏结构, 设计制备出双包层大模场面积保偏掺镱PCF. 利用该国产光纤搭建放大系统, 实现了高效率的飞秒激光放大, 激光输出1.64 W, 其斜率效率达到49.8%, 为实现高功率、高质量光纤激光奠定了基础.

## 2 光子晶体光纤的设计

### 2.1 光纤结构设计

光子晶体光纤的导光特性由光纤包层的空气孔直径 $d$ 和孔间距 $\Lambda$ 来决定<sup>[2]</sup>, 当 $d/\Lambda < 0.45$ 时, PCF便可实现无截止单模传输<sup>[17]</sup>, 因此通过替换中央空气孔, 在增加模场面积的同时也不会对光纤单模传输特性产生较大影响. 本文替换7个空气孔以进一步提升芯区直径, 达到30  $\mu\text{m}$ 左右. 实验通过替换掺硼棒引入应力, 利用掺硼棒的热膨胀系数 $\alpha$ 与纯石英不同( $\alpha_B = 5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,  $\alpha_{\text{silica}} = 1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ), 在光纤预制棒被拉伸成光纤离开拉丝塔后, 温度急剧下降, 具有较大热膨胀系数的掺硼区域收缩强烈, 产生应力并被固化保持, 使光纤具备应力双折射, 达到保偏特性<sup>[18]</sup>. 将应力区置于靠近芯区的两侧, 增强应力区对中心模场的影响. 同时在掺硼棒周围引入石英棒来进一步增强光纤的保偏性能. 实验设计了如图1所示的光纤, 中心为掺镱芯区, 直径约20  $\mu\text{m}$ ; 包层空气孔直径约1.4  $\mu\text{m}$ , 占空比为15%; 掺硼棒及石英棒的直径约9  $\mu\text{m}$ .

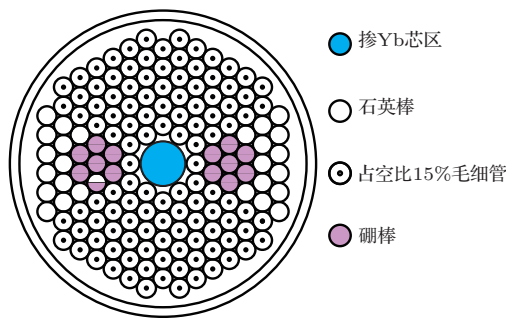


图1 光子晶体光纤端面设计图

### 2.2 光纤结构模拟计算

采用有限元法对图1所示的光纤结构进行模拟, 在不考虑介质色散特性的情况下, 石英折射率

$n_{\text{silica}}$  为1.457; 纤芯折射率增量 $\Delta n_1$ 为0.006, 为阶跃型掺杂; 掺硼区折射率增量 $\Delta n_2$ 为-0.0015; 空气孔折射率 $n_{\text{air}}$ 为1.

对于折射率为 $n$ 的介质, 由麦克斯韦方程组可得到波动方程:

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

其中,  $E$ 为电场强度,  $k_0$ 为真空中波数,  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ .

光纤具有纵向平移不变性, 因此可用 $E = E(x, y) \exp(-i\beta z)$ 来表述电场 $E$ ,  $E(x, y)$ 为光纤横截面的场分量,  $\beta$ 为传播常数. 通过端面离散并代入(1)式获得本征值方程:

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

其中,  $[A]$ 和 $[B]$ 为有限元矩阵,  $\{E\}$ 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.

模场面积可通过有效模场面积公式求得:

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

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

保偏光纤的模式双折射系数是衡量光纤偏振特性的重要参量, 基模的双折射可表示为

$$B = |n_x - n_y|, \quad (4)$$

其中,  $n_x$ 和 $n_y$ 分别表示基模的两个正交偏振态 $x$ 轴和 $y$ 轴所对应模式的有效折射率. 由此得到该光纤的拍长为

$$L_B = \frac{\lambda}{B}. \quad (5)$$

偏振消光比(PER)反映了光纤保持偏振态的优劣程度, 消光比计算公式可表示如下:

$$PER = 10 \log \frac{P_2}{P_1} (\text{dB}), \quad (6)$$

$P_1$ 和 $P_2$ 分别表示光纤输出端正交的慢轴和快轴方向所对应的输出功率, 消光比值越大, 代表光纤偏振保持能力越好.

通过对光纤结构模拟计算, 得到如图2所示的1550 nm处基模模场分布图. 分析图2可以看出, 1550 nm处模场能量几乎完全被约束在纤芯中. 利用(3)式模拟计算得到1550 nm处 $HE_{11}^x$ 模和 $HE_{11}^y$ 模的有效模场面积分别为232  $\mu\text{m}^2$ 和

229  $\mu\text{m}^2$ , 如此大的模场面积可降低纤芯中光束的能量密度, 从而减小非线性效应, 提高输出光束的质量. 根据模拟结果计算得 1550 nm 处, 双折射系数  $B$  为  $5 \times 10^{-5}$ , 拍长  $L_B$  为 0.031 m, 双折射系数  $B$  与传统保偏光纤数值相当. 分析原因可能是因为芯区掺杂浓度比较高, 光束被完全限制在纤芯, 受到两侧应力区影响很小, 实验过程中可以采用在芯区掺氟的方法降低纤芯折射率, 从而增大两侧应力区对中心光场的作用.

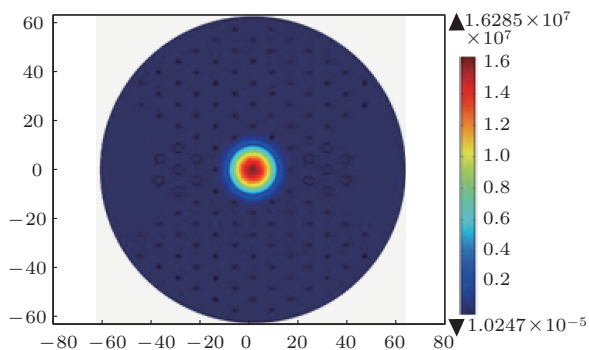


图2 基模模场分布

图3为光纤端面应力分布曲线. 从图中可以看出, 在横坐标20—40  $\mu\text{m}$  和80—100  $\mu\text{m}$ , 即纤芯两侧掺硼区域的应力张力很大, 最高处达到  $1.7 \times 10^8 \text{ N/m}^2$  左右, 说明该区域存在理想的应力分布, 证明了光纤结构设计的合理性.

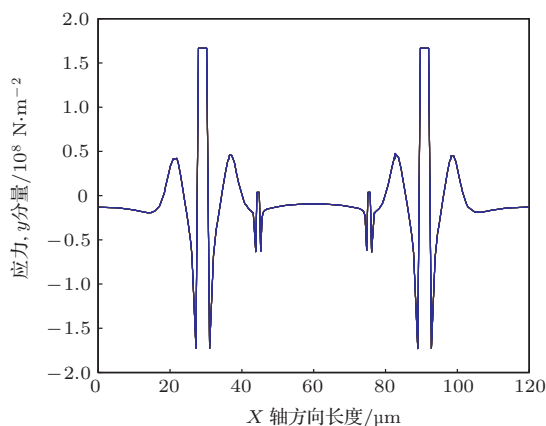


图3 光纤端面应力分布

### 3 掺镱光子晶体光纤的制备

实验采用改进的化学气相沉积工艺(modified chemical vapor deposition, MCVD)<sup>[19]</sup> 结合溶液掺杂法制备大芯径掺镱光纤预制棒. 纤芯组分为镱铝磷共掺, 采用溶液掺杂法引入镱离子, 掺杂浓

度为 0.12 mol%, 溶液采用 1 : 10 的乙醇盐酸混合液; 采用气相沉积方式引入铝、磷, 掺杂浓度分别为 0.45 mol% 和 0.2 mol%. 光纤预制棒制备完毕后, 再次利用 MCVD 工艺进行缩棒, 使掺镱区面积与预制棒横截面积之比达到 60%, 即制备芯包比为 60% 的芯棒. 采用拉法制备 PCF, 用掺镱芯棒取代中心及周围一层毛细管, 共 7 根; 用掺硼棒取代纤芯两侧对称的毛细管, 共 14 根; 用石英棒取代掺硼棒外侧对称的毛细管, 共 26 根. 经过套包层、拉丝、涂覆, 制备出双包层大模场面积保偏掺镱光子晶体光纤. 熔融温度为 2150  $^{\circ}\text{C}$ , 拉丝温度为 2060  $^{\circ}\text{C}$ , 拉丝速度为 17 m/min.

## 4 光纤测试与结果分析

### 4.1 光子晶体光纤形貌分析

图4是双包层大模场面积保偏掺镱 PCF 的扫描电镜测试结果. 根据扫描电镜右下方的比例尺寸可以计算出 PCF 的具体参数: 纤芯直径约 30  $\mu\text{m}$ , 其中掺镱区直径 20  $\mu\text{m}$ ; 内包层直径约 225  $\mu\text{m}$ , 空气孔直径约 1.3  $\mu\text{m}$ , 孔间距约 8.9  $\mu\text{m}$ , 占空比 15%; 外包层直径 400  $\mu\text{m}$ , 外包层空气孔数为 81, 桥宽约 1.1  $\mu\text{m}$ , 桥长约 81.02  $\mu\text{m}$ . 从图4可以看出, 光纤内包层应力区附近有一处空气孔缺失现象, 初步分析为掺硼棒受热膨胀挤压毛细管所致, 但不影响其保偏特性.

### 4.2 光纤激光放大性能分析

#### 4.2.1 空间耦合脉冲激光放大测试实验

实验利用该光纤搭建放大系统平台, 装置如图5所示. 采用非线性线偏振旋转锁模激光器作为振荡级种子光, 其输出脉宽为 224 fs, 平均功率为 190 mW. 放大级采用 976 nm 激光反向抽运, 2 m 长国产保偏掺镱大模场 PCF 作为增益介质, 其端面被打磨成  $8^{\circ}$  以避免光纤端面反馈形成的自激振荡. 其中, 光栅的作用是对输出脉冲进行压缩, 中间的滤波器用于滤掉抽运光.

图6为放大器输出的平均功率随抽运功率的变化曲线. 飞秒激光经过放大后, 由于光纤色散展宽和非线性自相位调制的作用, 直接输出脉宽为 1.39 ps. 当放大系统抽运功率为 4 W 时, 通过放大器得到 1.64 W 的激光输出, 放大器斜率效率达到 49.8%.

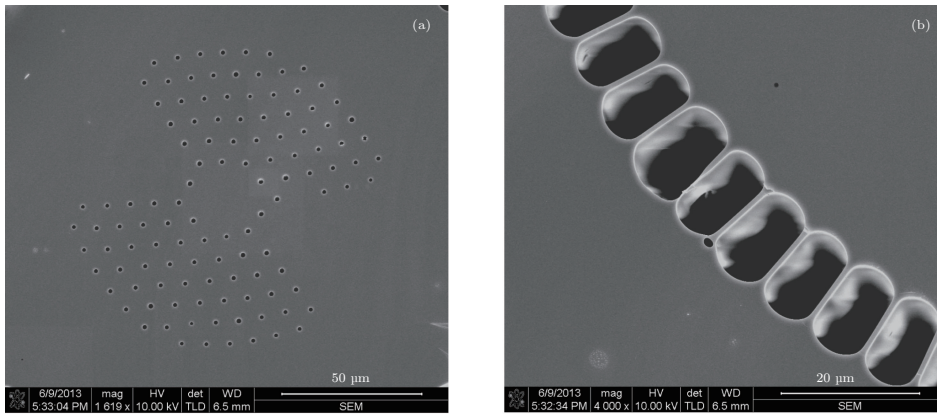


图4 (a) 光子晶体光纤横截面扫描电镜图; (b) 空气包层扫描电镜图

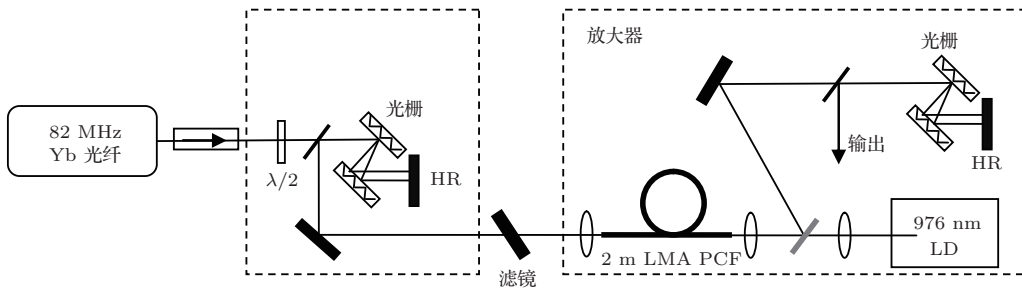


图5 光纤脉冲激光放大实验装置图(HR-全反镜, LD-激光二极管, LMA-PCF 大模场面积光子晶体光纤)

#### 4.2.2 全光纤连续激光放大测试实验

全光纤连续激光放大测试实验装置如图7所示, 信号源为1080 nm 光纤激光器, 采用915 nm 的LD 正向抽运, 5 m 长国产保偏掺镨大模场PCF 作为增益介质, 信号光和抽运光通过合束器耦合到PCF 中. 光纤尾端放置45° 1080 nm 高反、915 nm 高透的双色镜, 用功率计测量输出激光功率.

图8为放大器输出的平均功率随抽运功率的变化曲线. 当该放大系统抽运功率为12.2 W时, 输出端可得到8.12 W的激光输出, 斜率效率达到55.9%, 具有很理想的激光放大效果. 通过对光纤长度和熔接工艺进一步优化, 采用更高的抽运或信号光功率, 可以得到更高的激光输出功率. 此外, 实

验测得该PCF 与无源20/400 μm 光纤熔接损耗为0.784 dB, 损耗值较低.

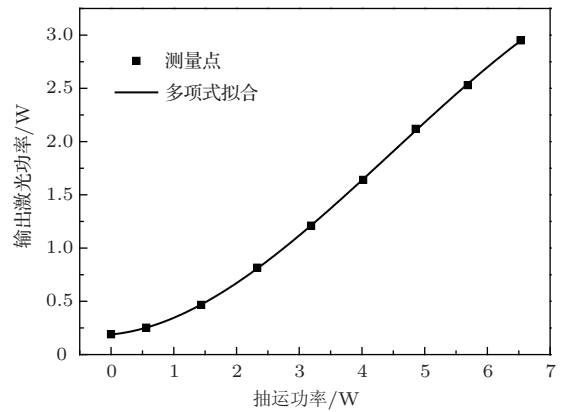


图6 空间耦合放大器输出的平均功率随抽运功率变化曲线

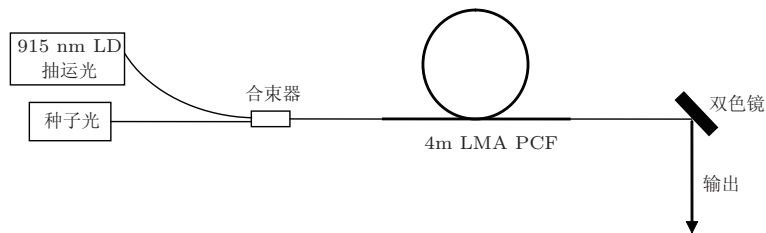


图7 全光纤连续激光放大实验装置图

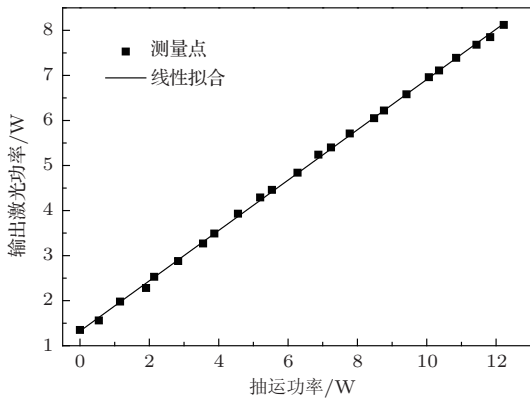


图8 全光纤放大器输出的平均功率随抽运功率变化曲线

### 4.3 光子晶体光纤保偏特性分析

图9为光纤保偏性能参数消光比的测试装置. 光源采用振荡级加放大级的飞秒激光器, 输出为线偏光. 光纤前放置半波片作起偏器, 光纤后半波片作检偏器, 利用偏振分光棱镜分出水平偏振光和垂直偏振光. 起偏器用来调整光的入射偏振态与PCF的应力元方向一致, 检偏器用来调整光的出射偏振态与PBS (polarizing beam splitters, 偏振分光棱镜) 的两个偏振方向一致. 由于光纤出射端透镜数值孔径较大, 所以仍存在经过包层传输的光, 加入小孔滤出纤芯部分. 光路稳定后调整波片, 使得功率比值最大. 同时对光子晶体光纤的芯区掺氟以降低纤芯折射率, 增大两侧应力区对中心光场的作用.

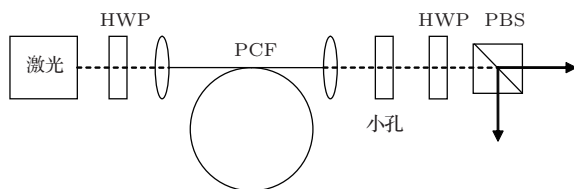


图9 保偏光纤消光比测试装置 (HWP, 半波片; Pinhole, 小孔, PBS, 偏振分光棱镜)

实验在每组均获取了两组数据, 分别为水平偏振光达到最大和垂直偏振光达到最大. 实验结果见表1.

表1 保偏光纤消光比测试数据

入射功率	最大功率/mW	最小功率/mW	偏振消光比/dB
情况1	39.6	1	15.98
情况2	94.5	7.5	11.00
情况3	173.3	17	10.08
情况4	242	25.7	9.74

从实验结果可以得出该光纤的偏振消光比约

为10 dB左右, 数值较大, 说明具有很好的保偏性能. 实验装置中小孔用于过滤背景光, 但并不能完全消除, 所以仍有残余, 对最后的结果稍有影响.

## 5 结论

本文制备了双包层大模场面积保偏掺镱光子晶体光纤. 通过搭建放大系统, 采用国产光纤在国内首次实现双包层大模场面积掺镱光子晶体光纤的高效率飞秒激光放大和全光纤连续激光放大, 且未观测到增益饱和现象. 该光纤具有较高的放大级斜率效率、大模场面积和很好的消光比特性, 为我国自主研发高效率、高质量的光纤激光输出打下良好基础.

感谢天津大学超快实验室在相关测试方面的帮助.

## 参考文献

- [1] Tünnermann A, Schreiber T, Röser F, Liem A, Höfer S, Zellmer H, Nolte S, Limpert J 2005 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **38** 681
- [2] Russell P 2003 *Science* **299** 358
- [3] Limpert J, Schreiber T, Clausnitzer T, Zöllner K, Fuchs H, Kley E, Zellmer H, Tünnermann A 2002 *Opt. Express* **10** 628
- [4] Hideur A, Chartier T, Ozkul C, Sanchez F 2001 *Opt. Lett.* **26** 1054
- [5] Okhotnikov O G, Gomes L, Xiang N, Jouhti T, Grudinin A B 2003 *Opt. Lett.* **28** 1522
- [6] 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
- [7] Limpert J, Liem A, Reich M, Schreiber T, Nolte S, Zellmer H, Tünnermann A, Broeng J, Petersson A, Jakobsen C 2004 *Opt. Express* **12** 1313
- [8] Schreiber T, Röser F, Schmidt O, Limpert J, Iliew R, Lederer F, Petersson A, Jakobsen C, Hansen KP, Broeng J, Tünnermann A 2005 *Opt. Express* **13** 7621
- [9] Wang H L, Wang C, Leng Y X, Xu Z Z, Hou L T 2010 *Chin. Phys. B* **19** 054212
- [10] Fu B, Li S G, Yao Y Y, Zhang L, Zhang M Y 2011 *Chin. Phys. B* **20** 024209
- [11] Chen G, Jiang Z W, Peng J G, Li H Q, Dai N L, Li J Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 144206 (in Chinese)[陈瑰, 蒋作文, 彭景刚, 李海清, 戴能利, 李进延 2012 物理学报 **61** 144206]
- [12] Li S G, Zhang W, Wei Z Y, Zhou G Y, Hou L T 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1996
- [13] Song Y J, Hu M L, Liu Q W, Li J Y, Chen W, Chai L, Wang Q Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5045 (in Chinese)[宋有建, 胡明列, 刘庆文, 李进延, 陈伟, 柴路, 王清月 2008 物理学报 **57** 5045]

- [14] Liu B W, Hu M L, Song Y J, Chai L, Wang Q Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6921 (in Chinese)[刘博文, 胡明列, 宋有建, 柴路, 王清月 2008 物理学报 **57** 6921]
- [15] Zhao Z Y, Duan K L, Wang J M, Zhao W, Wang Y S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6335 (in Chinese)[赵振宇, 段开棕, 王建明, 赵卫, 王屹山 2008 物理学报 **57** 6335]
- [16] Schmidt O, Rothhardt J, Eidam T, Röser F, Limpert J, Tünnermann A 2008 *Advanced Solid-State Photonics* Nara, Japan, January 27–30, 2008 pMG7
- [17] Birks T A, Knight J C, Russell P S J 1997 *Opt. Lett.* **22** 961
- [18] Tong W J 2006 *Ph. D. Dissertation* (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology) (in Chinese) [童维军 2006 博士学位论文 (武汉: 华中科技大学)]
- [19] MacChesney J B, O'Connor P B 1980 *U. S. Patent* 4 217 027

## Double-clad large-mode-area polarization-maintaining ytterbium doped photonic crystal fiber\*

Zhao Nan    Chen Gui    Wang Yi-Bo    Peng Jing-Gang    Li Jin-Yan<sup>†</sup>

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

( Received 4 September 2013; revised manuscript received 26 October 2013 )

### Abstract

The Yb<sup>3+</sup> doped double clad polarization-maintaining photonic crystal fiber 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 perform through a conventional modified chemical-vapor deposition technique and solution doping method, which contains a large core of around 30 μm in diameter. Through simulated calculation, the mode area of the double clad polarization maintaining photonic crystal fiber reaches about 232 μm<sup>2</sup> and the double refraction coefficient  $B$  can be  $5 \times 10^{-5}$ . In experiment, amplification tests of both pulse laser and continuous laser are conducted. The first domestic high efficient femtosecond laser amplification is achieved by using the photonic crystal fiber. A 2 m long photonic crystal fiber laser generates up to 1.64 W output power with a slope efficiency of 49.8%. And 5 m long fiber can reach 8.12 W continuous laser output, in which the slope efficiency is 55.9% and performs good amplification effect. Besides, the extinction ratio is about 10 dB, which indicates good polarization performance of the fiber.

**Keywords:** Yb<sup>3+</sup> doped double clad, polarization-maintaining, photonic crystal fiber, laser amplification

**PACS:** 42.55.Tv, 42.55.Wd, 42.60.-v, 42.81.Gs

**DOI:** 10.7498/aps.63.024202

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 81100701).

† Corresponding author. E-mail: [l jy@mail.hust.edu.cn](mailto:l jy@mail.hust.edu.cn)