

## 微结构芯大模场平顶光纤及其传输特性分析\*

张银<sup>1)</sup> 陈明阳<sup>1)†</sup> 周骏<sup>2)</sup> 张永康<sup>3)</sup>

1) (江苏大学机械工程学院, 镇江 212013)

2) (宁波大学理学院, 宁波 315211)

3) (东南大学机械工程学院, 南京 211189)

(2013年3月28日收到; 2013年4月26日收到修改稿)

通过在纤芯引入非均匀分布的高折射率介质柱, 获得了大模场面积、平顶型模场分布的新型微结构光纤. 运用数值仿真, 分析了光纤在不同的结构参数下的模场面积、基模模场分布等特性. 研究表明: 通过合理设计光纤的包层和纤芯参数, 可以实现有效的平顶模场分布. 在工作波长为 1064 nm 时, 平顶光纤的基模模场面积可以达到  $1655 \mu\text{m}^2$ .

**关键词:** 大模场面积, 平顶光纤, 微结构芯, 数值仿真

**PACS:** 42.81.-i, 42.81.Qb

**DOI:** 10.7498/aps.62.174211

## 1 引言

大模场光纤被认为是解决光纤激光器功率提升面临的非线性效应及光纤损伤等功率增长限制的一种最直接有效的途径. 目前光纤激光器输出功率的迅速增长正是得益于大模场光纤的实现, 大模场光纤的研究因此成为高功率光纤激光研究领域的热点问题.

在激光应用中, 对激光束进行整形已是激光加工中不可缺少的一个环节, 例如在激光焊接中, 为了让焊接质量优良, 就要求焊点受热均匀, 这就要求激光束的光场分布为平顶型. 获得平顶激光束的方法有很多, 其中一种就是利用平顶光纤将入射激光束整形为具有平顶型光场分布的激光束. 所谓平顶光纤, 就是经它输出的激光束具有平顶型的模场结构. 众所周知, 从普通光纤输出的激光束在光纤横截面上的光场是呈类高斯型分布的, 要获得平顶型的光场, 就要采用具有特殊的光纤结构. 普通光纤的导光原理为全光反射, 其基本结构是: 内层为纤芯区, 外层为包层区, 纤芯区的折射率比包层区

的折射率稍大, 以便把光约束在纤芯区并向前传输. 由于普通光纤轴心附近的折射率大, 导致光纤输出端的激光光场在横向分布不均匀, 呈高斯或近高斯型分布.

通过在普通光纤的纤芯中引入一低折射率的圆环, 从而使光场向纤芯外侧扩展, 形成平顶光束, 获得具有平顶基模场分布的光束整形光纤<sup>[1]</sup>. 选择不同的低折射率内纤芯可以有效改变基模形状, 从而设计出不同模式形状和模式配置的光束整形光纤<sup>[2]</sup>. 微结构光纤也可以实现平顶光束输出. 例如, 周秦岭等<sup>[3]</sup>提出在由七个缺失的空气孔组成的纤芯中心引入一低折射率区域, 同样是形成低折射率的纤芯中心, 使光场向纤芯外侧扩展, 形成平顶光束.

然而, 若光纤要达到较大的模场面积, 则要求纤芯不同区域具有小的折射率差<sup>[4]</sup>, 同时这种结构的光纤对折射率差的精度要求也非常高. 这也使得这种光纤的制作难度增大.

本文提出一种实现大模场、平顶基模场分布的新型光子晶体光纤结构. 通过在平顶光纤的纤芯中引入不同尺寸的高折射率介质柱及包层中引入

\* 江苏省高校“青蓝工程”优秀青年骨干教师资助项目、国家自然科学基金(批准号: 61275153)和浙江省重中之重学科开放基金(批准号: xkz12003)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: miniyong@163.com

大尺寸的低折射率孔, 并对其选择合适的参数, 形成一种能有效实现大模场面积、平顶场分布的新型结构光纤. 纤芯中采用不同尺寸的高折射率介质柱可形成平顶光束所需的折射率分布, 解决了采用普通光纤结构时, 纤芯的折射率分布变化过小而无法实际制作的技术障碍. 因此, 通过选择合适的参数, 该结构光子晶体光纤可以很好的实现大模场面积和平顶基模场分布.

## 2 数值仿真

平顶光纤的横截面结构如图 1 所示, 光纤的纤芯由 5 层高折射率介质柱组成, 即采用微结构芯实现调节纤芯区的折射率分布. 微结构芯<sup>[5,6]</sup>的思想曾被用于获得高双折射光纤<sup>[7-9]</sup>、大模场光纤<sup>[10,11]</sup>以及实现对大模场光纤的弯曲补偿<sup>[12]</sup>. 采用六个低折射率介质柱以有效束缚纤芯内的光场. 光纤的基本参数如下: 光纤的基质材料、低折射率介质柱、高折射率介质柱的折射率分别为  $n_b = 1.45$ ,  $n_l = 1.443$ ,  $n_h = 1.4515$ . 高、低折射率介质柱的周期分别为  $\Lambda = 4 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda_l = 40 \mu\text{m}$ . 低折射率介质柱、最外层高折射率介质柱和内层高折射率介质柱直径分别用  $d_l$ ,  $d_m$ ,  $d_h$  表示. 本文假设工作波长  $\lambda = 1064 \text{ nm}$ .

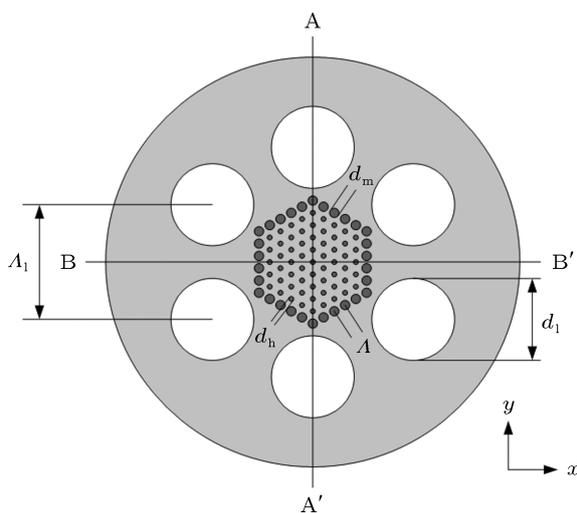


图 1 平顶光子晶体光纤的横截面示意图

首先, 我们利用光束传播法进行模拟分析来确定平顶光纤中最外层的高折射率介质柱的直径  $d_m$ . 这里取  $d_l = 26 \mu\text{m}$ ,  $d_h = 1.2 \mu\text{m}$ . 图 2 分别给出了最外层高折射率介质柱直径  $d_m$  与内层高折射率介质柱直径  $d_h$  的关系为  $d_m = d_h$ ,  $d_m = 2.5d_h$ ,  $d_m = 2d_h$

时的模场分布图. 由图 2(a) 可见, 当  $d_m = d_h$  时, 基模模场呈类高斯型分布, 从轴向看, 其场强逐渐减小. 如图 2(b) 所示, 当  $d_m = 2.5d_h$  时, 基模模场则呈“凹”形分布, 场强在纤芯边缘达到最强. 从图 2(c) 可见, 当  $d_m = 2d_h$  时, 基模模场呈较理想的平顶型分布, 场强分布均匀, 模场边缘光滑陡直. 图 3 为  $d_m = 2d_h$  时的二维场强等高线分布图, 由图可见, 在纤芯处场强差别较小. 这是因为处于纤芯外侧直径较大的高折射率介质柱使得纤芯的等效折射率分布呈内低、外高的特点, 从而使场强变得平坦.

文献 [13] 指出可以用纤芯区最高与最低光强之差的相对值来表示平顶光纤的质量. 相类似的, 我们以下式来定义平顶缺陷度

$$\Delta = \frac{g_{\max}(x,y) - g_{\min}(x,y)}{(g_{\max}(x,y) + g_{\min}(x,y))/2}, \quad (1)$$

式中  $g_{\max}(x,y)$  为光纤纤芯区域光强最大值,  $g_{\min}(x,y)$  为光纤纤芯区域光强最小值. 计算结果表明, 对于  $d_m = 2d_h$  时, 其  $\Delta$  值为 9%. 相对比的, 对于场强如图 2(a), (b) 所示的非平顶光纤, 其  $\Delta$  值分别为 106.2% 和 85.3%. 可见, 平顶光纤的  $\Delta$  值远小于非平顶光纤.

由图 2(c) 和图 3 可见, 在高折射率介质柱区域, 其场强高. 这一点可以理解为: 当我们在纤芯中引入高折射率介质柱时, 若介质柱之间距离较远、介质柱较大时, 则此时即所谓的多芯光纤, 不同介质柱相对独立, 成为单个纤芯, 因此, 高折射率介质柱中的场强高于纤芯其他区域. 当高折射率介质柱距离较近、介质柱直径较小时, 介质柱内的场强仍然会高于介质柱外区域场强. 但介质柱所占面积较小. 例如光纤结构参数为  $d_h = 1.2 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda = 4 \mu\text{m}$  时, 介质柱占纤芯区域的比例仅为 8%. 为进一步说明, 我们给出定义:

$$V = \frac{|S \times h' - \int h dS|}{S \times h'}, \quad (2)$$

其中  $S$  为光纤的纤芯面积,  $h'$  为纤芯区光强的最小值. 式中  $S \times h'$  为不存在介质柱引起的小突起时纤芯区的总能量,  $\int h dS$  为纤芯区的实际总能量. 计算可得, 当  $d_m = 2d_h$  时, 其  $V$  值为 0.86%. 由此可见, 介质柱突出部分所占能量较少, 对光纤平顶度影响较小.

图 4 为平顶光纤的模场面积随低折射率介质柱直径的变化曲线. 从图中可以看出, 模场面积随着低折射率介质柱直径  $d_l$  的增大而减小. 计算结果显示,  $d_l = 26 \mu\text{m}$  时, 光纤的模场面积可达

1655  $\mu\text{m}^2$ .

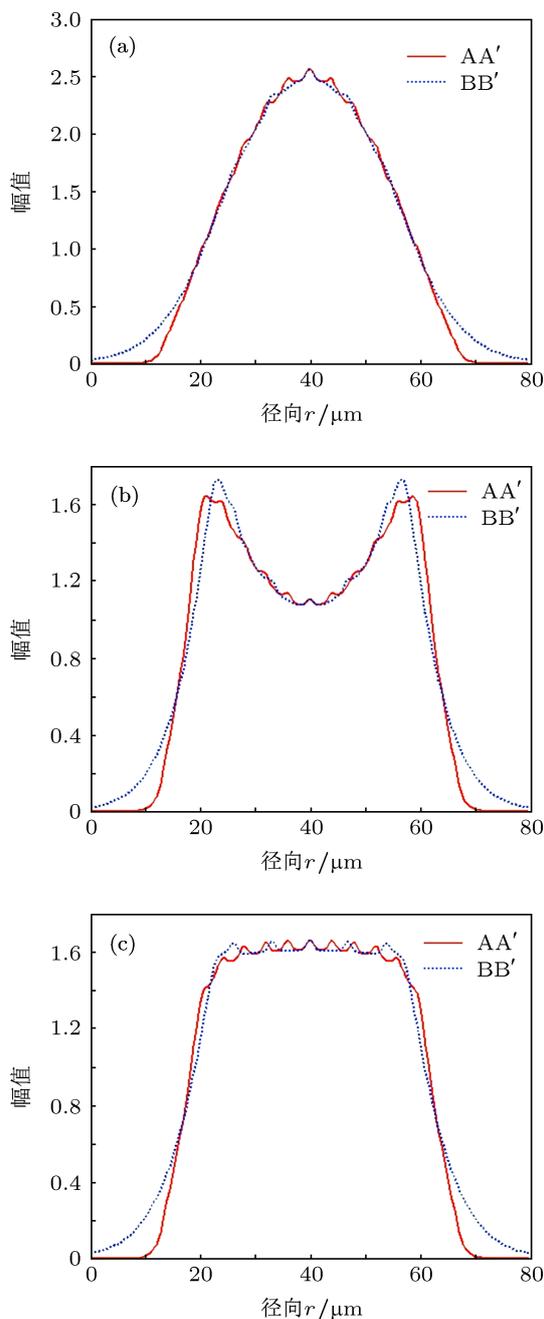


图2 最外层高折射率介质柱直径  $d_m$  与内层高折射率介质柱直径  $d_h$  比值不同时光纤径向的场强分布图(沿 AA', BB' 面)  
(a)  $d_m = d_h$ ; (b)  $d_m = 2.5d_h$ ; (c)  $d_m = 2d_h$

下面分析高折射率介质柱与包层的折射率差变化时,其模场分布的变化.图5给出了相同条件下 ( $d_m = 2d_h = 2.4 \mu\text{m}$ ,  $d_1 = 26 \mu\text{m}$ ),高折射率介质柱与包层的折射率差为  $\Delta n = 0$  (即不具有微结构芯),0.0013, 0.0015, 0.0017 时的模场分布图.由图可见,  $\Delta n = 0$  时,其模场呈标准的高斯型,而当光纤具有微结构芯时,即高折射率介质柱与包层的

折射率差  $\Delta n$  为 0.0013 或 0.0017 时,其纤芯区模场变化均比较平缓.由前述公式,可以得到,上述两种光纤的平顶缺陷度  $\Delta$  分别为 15.3% 和 16.6%,高于  $\Delta n = 0.0015$  时的  $\Delta$  值,但总体仍然具有平顶特性.这表明,采用微结构芯实现的平顶光纤对制作误差更不敏感,因而也更能保证获得平顶光束传输.

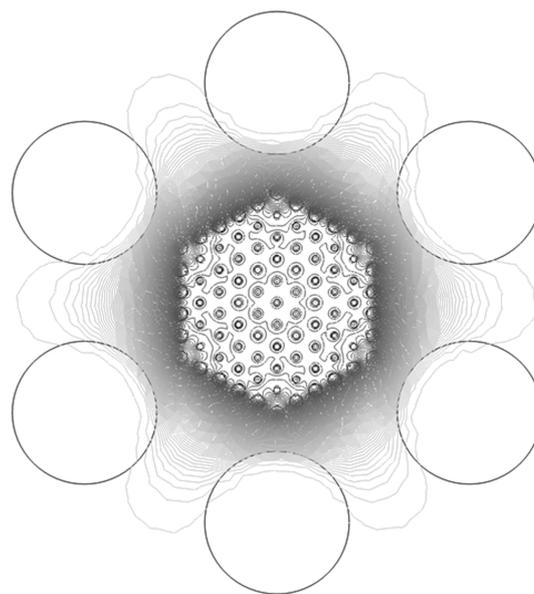


图3 光纤平顶型基模模场的二维径向场强分布图

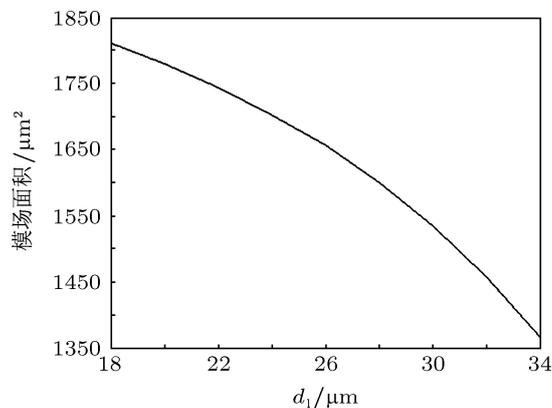


图4 平顶光纤的模场面积随低折射率介质柱直径  $d_1$  的变化曲线

可以从纤芯等效折射率的角度来理解微结构芯平顶光纤的宽制作容差特性.采用平面波展开法<sup>[14]</sup>可以获得微结构芯的等效折射率.图6给出了内纤芯区(周期  $\Lambda = 4 \mu\text{m}$ ,高折射率介质柱直径  $d_h = 1.2 \mu\text{m}$ )和外纤芯区(周期  $\Lambda = 4 \mu\text{m}$ ,高折射率介质柱直径  $d_h = 2.4 \mu\text{m}$ )的等效折射率  $n_{\text{core}}$  与基质材料折射率  $n_{\text{silica}}$  之差随周期变化的关系曲线.由图可见,纤芯的等效折射率与基质材料折射率之差  $n_{\text{core}} - n_{\text{silica}}$  在  $10^{-4}$  量级.当内纤芯区高折

射率介质柱的折射率发生变化 (例如折射率差变化  $2 \times 10^{-4}$ , 即从 0.0015 增大到 0.0017 或减小到 0.0013) 时, 其等效折射率与基质材料的折射率之差只变化了不到  $2 \times 10^{-5}$ . 即高折射率介质柱的较大折射率变化只会引起纤芯等效折射率的较小变化. 虽然外纤芯的等效折射率变化更大一些, 但仍然小

于高折射率介质柱的变化量. 因此, 这种光纤容差更强, 更容易保持平顶光束传输. 当  $\Delta n = 0.0015$  时, 内纤芯的等效折射率与外纤芯的等效折射率之差仅为  $3.5 \times 10^{-4}$ . 采用普通光纤制作工艺难以实现这种低折射率差, 这也反映出采用微结构芯的优势所在.

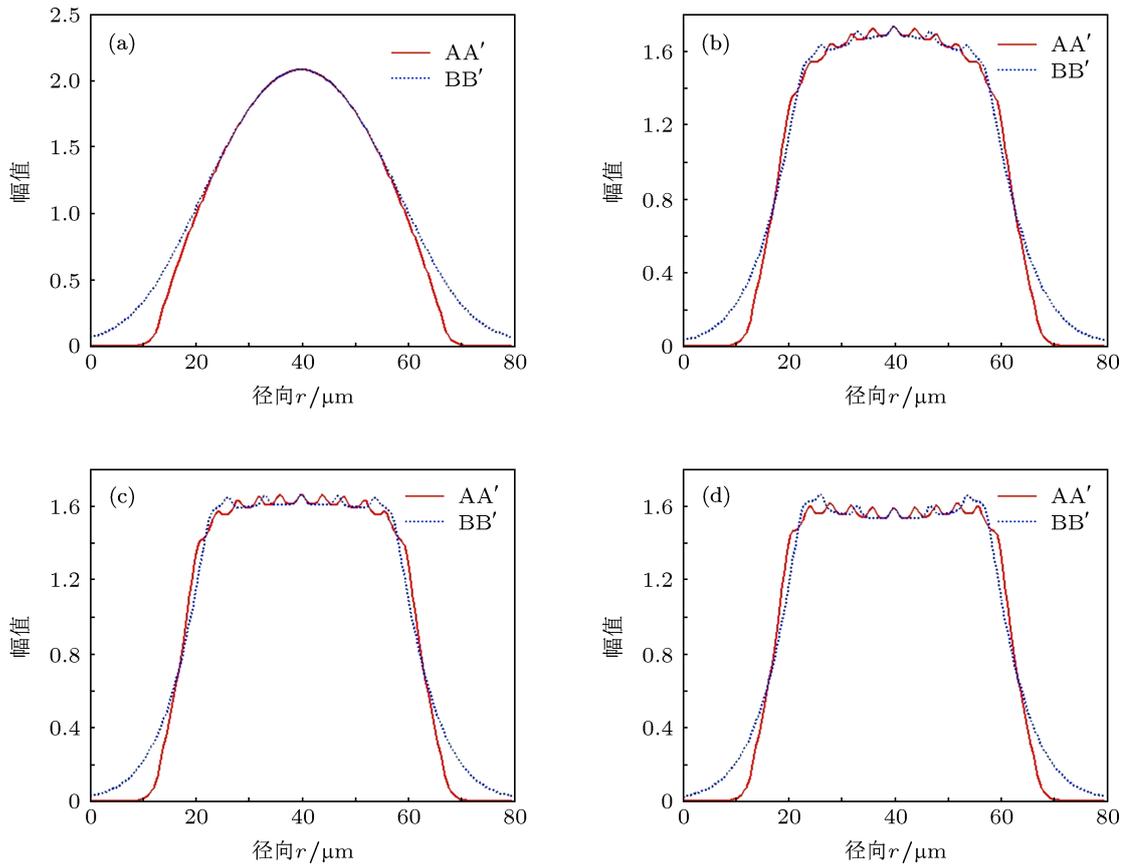


图 5 高折射率介质柱与包层的折射率差  $\Delta n$  取不同值时的模场分布图 (沿 AA', BB' 面) (a)  $\Delta n = 0$ ; (b)  $\Delta n = 0.0013$ ; (c)  $\Delta n = 0.0015$ ; (d)  $\Delta n = 0.0017$

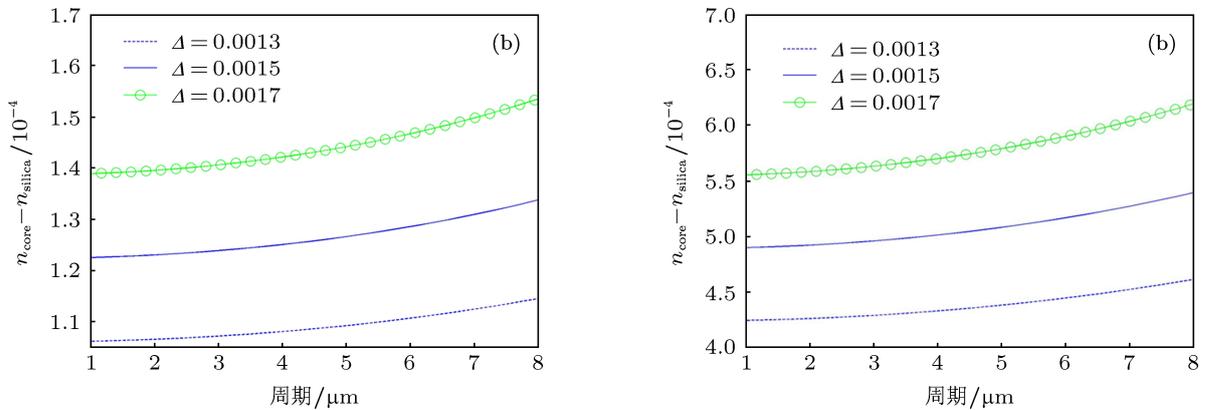


图 6 微结构芯的等效折射率  $n_{\text{core}}$  与基质材料折射率  $n_{\text{silica}}$  之差  $n_{\text{core}} - n_{\text{silica}}$  随周期变化的关系曲线 (a) 高折射率介质柱直径  $d_m = 1.2 \mu\text{m}$ ; (b) 高折射率介质柱直径  $d_m = 2.4 \mu\text{m}$

图 7 给出了不同折射率差时, 平顶光纤的模场面积随高折射率介质柱的归一化孔直径  $d_h/\Lambda$  的变化曲线.  $\Delta n = 0$  时即不存在微结构芯时, 光纤的模场面积仅为  $1476 \mu\text{m}^2$ . 高折射率介质柱的直径变化时, 微结构芯光纤存在最大模场面积. 例如, 当折射率差  $\Delta n = 0.0015$  时, 其模场面积最大值为  $1659 \mu\text{m}^2$ , 由于其平顶型模场分布, 其模场面积大于无微结构芯时的结果. 此时, 对应的高折射率介质柱归一化孔直径为  $d_h/\Lambda = 0.3$ . 即平顶光纤的结构参数. 因此, 当光纤模场为平顶光束时, 其模场也达到最大. 即使高折射率介质柱的折射率发生一定的偏差, 例如当  $\Delta n = 0.0013$  和  $0.0017$  时, 其模场面积仍可达  $1643 \mu\text{m}^2$  和  $1655 \mu\text{m}^2$ . 因此, 平顶光纤不仅光束质量好, 且模场面积也大于非平顶光纤, 有助于减小光纤中的非线性效应.

### 3 结论

我们在微结构光纤的纤芯中引入不同尺寸的

高折射率介质柱, 形成平顶光束所需的折射率分布, 解决了采用普通光纤结构时, 纤芯的折射率分布变化过小而无法实际制作的技术障碍. 研究表明, 这种结构具有更大的制作容差, 因而更容易实现. 这种新型结构的平顶光纤可用于光纤激光器的光束转换, 以实现大模场的平顶光束输出.

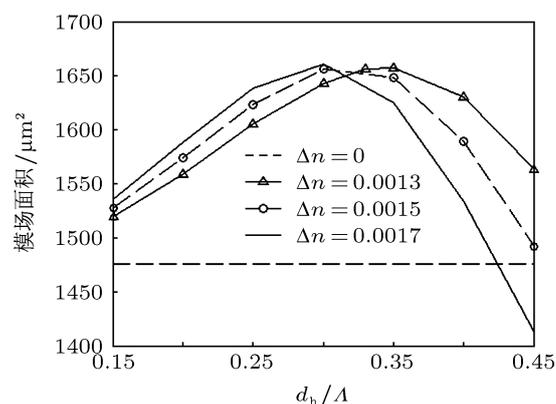


图 7 微结构芯光纤的模场面积随高折射率介质柱的归一化孔直径  $d_h/\Lambda$  的变化曲线

- [1] Yi J, Lee K, Park I, Kwon J H 2009 *J. Opt. Soc. Korea* **13** 146
- [2] Zhou Q L, Lu X Q, Qiu J R, Chen D P, Jiang X W, Zhu C S 2005 *Chin. Opt. Lett.* **3** 686
- [3] Zhou Q L, Lu X Q, Zhang G, Chen D P, Hu L L 2010 *Acta Opt. Sin.* **30** 1497 (in Chinese) [周秦岭, 卢兴强, 张光, 陈丹平, 胡丽丽 2010 光学学报 **30** 1497]
- [4] Jansen F, Stutzki F, Otto H J, Baumgartl M, Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A 2010 *Opt. Express* **18** 26834
- [5] Fang X H, Hu M L, Li Y F, Chai L, Wang Q Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2495 (in Chinese) [方晓惠, 胡明列, 栗岩峰, 柴路, 王清月 2009 物理学报 **58** 2495]
- [6] Chen M Y, Sun B, Zhang Y K, Tong Y Q, Zhou J 2010 *Opt. Commun.* **283** 3153
- [7] Cao Y, Li R M, Tong Z R 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 084215 (in Chinese) [曹晔, 李荣敏, 童峥嵘 2013 物理学报 **62** 084215]
- [8] Chen D R, Shen L F 2007 *IEEE Photon. Techn. Lett.* **19** 185
- [9] Chen M Y 2007 *Opt. Express* **15** 12498
- [10] Zhen S W, Lin Z, Ren G B, Jian S S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 044224 (in Chinese) [郑斯文, 林桢, 任国斌, 简水生 2013 物理学报 **62** 044224]
- [11] Vogel M M, Abdou-Ahmed M, Voss A, Graf T 2009 *Opt. Lett.* **34** 2876
- [12] Chen M Y, Zhang Y K 2011 *J. Lightwave Technol.* **29** 2216
- [13] Lu X Q, Zhou Q L, Qiu J R, Zhu C S, Fan D Y 2006 *Opt. Commun.* **259** 636
- [14] Johnson S, Joannopoulos J 2001 *Opt. Express* **8** 173

# Investigation on large-mode-area flat-topped optical fiber with microstructured core and its transmission characteristics\*

Zhang Yin<sup>1)</sup> Chen Ming-Yang<sup>1)†</sup> Zhou Jun<sup>2)</sup> Zhang Yong-Kang<sup>3)</sup>

1) (School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

2) (Faculty of Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

3) (School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

(Received 28 March 2013; revised manuscript received 26 April 2013)

## Abstract

A novel microstructured-core optical fiber with large mode area and flat-topped mode field distribution is proposed. The core of the fiber is composed of high refractive index dielectric cylinders with a non-uniform distribution. Numerical simulation on the mode area, mode field distribution of the fundamental mode and other aspects of the fiber indicates that the fiber can effectively obtain flat-topped mode field distribution by tuning the parameters of the cladding and the core of the fiber. In addition, the flat-topped fiber has a large mode area of  $1655 \mu\text{m}^2$  at the operating wavelength of 1064 nm.

**Keywords:** large mode area, flat-topped fiber, microstructured core, numerical simulation

**PACS:** 42.81.-i, 42.81.Qb

**DOI:** 10.7498/aps.62.174211

---

\* Project supported by the Qing Lan Project of Jiangsu Province, China, the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61275153), and the Open Fund of Key Subject of Zhejiang Province, China (Applied Nonlinear Science and Technology, Grant No. xkz12003).

† Corresponding author. E-mail: miniyong@163.com