

文章编号: 0253-2239(2010)05-1497-04

大模面积平顶模场光子晶体光纤模式分析

周秦岭¹ 卢兴强² 张 光^{1,3} 陈丹平¹ 胡丽丽¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800
²中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800
³中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 通过全矢量有限差分法数值模拟,设计了一种大模面积平顶模场光子晶体光纤。光纤截面上空气孔为三角形格子分布,中心七个空气孔缺失并在其中心引入一低折射率区域。分析了内纤芯大小、空气孔间距和空气孔相对大小等参数变化对内纤芯折射率、基模模面积等特性的影响。给出了工艺上简单易行的平顶模场光子晶体光纤结构,其平顶模面积可达 $2000 \mu\text{m}^2$ 。发现增加内纤芯尺寸和导光波长,降低空气孔相对尺寸,可以减少光纤中的高阶模含量。

关键词 光纤光学; 平顶模式场光子晶体光纤; 有限差分法

中图分类号 TN913.7 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103005.1497

Mode Characteristics of a Large Mode Area Flattened-Mode Photonic Crystal Fiber

Zhou Qinling¹ Lu Xingqiang² Zhang Guang^{1,3} Chen Danping¹ Hu Lili¹

¹Key Laboratory of High Power Laser Materials, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

³Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A novel design approach of realizing flattened mode large mode area photonic crystal fibers (PCFs) is presented by introducing a depressed-index region in the core of 7-rod core triangular PCFs. The influences from structural parameters, such as the size of depressed inner core, air hole pitch and the relative size of air hole, on the refractive index of inner core and the fundamental mode area are calculated with full-vectorial finite-difference method. A flattened mode PCF with mode area as large as $2000 \mu\text{m}^2$ is given, which can be easily fabricated with present technique. In the simulation, it is also found that less higher order modes will be contained in the fiber by scaling the depressed inner core and light wavelength as well as decreasing the relative size of air hole.

Key words fiber optics; flattened mode photonic crystal fiber; finite difference method

1 引 言

大模面积光纤研制是当前国际研究热点之一。这主要有两方面的原因,一是高功率光纤激光器发展需求^[1,2]。目前高功率光纤激光器的应用领域日益广泛,进一步提高光功率和光束质量是光纤激光器发展

的重要目标,而大芯径光纤则是研制高功率光纤激光器的必备条件。第二是新型光纤结构层出不穷,为单模大模面积光纤研制提供了更多选择^[3]。除了传统的阶跃型光纤和渐变型光纤外,光子晶体光纤的成功研制有效地弥补了传统光纤制备工艺上的局限性。目前光子晶体光纤最大单模芯径已达 $100 \mu\text{m}$ ^[4]。

收稿日期: 2009-08-02; 收到修改稿日期: 2009-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(60707019,60878043)资助课题。

作者简介: 周秦岭(1975—),女,博士,副研究员,主要从事新型光纤、激光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail: kerryqing@hotmail.com

在纤芯直径和传播激光最大通量相同的情况下,单模平顶模场光纤传播的激光脉冲能量不仅可以达到高斯模场光纤的 3.9 倍,而且脉冲在传播过程中的时空扭曲效应小,具有更高的损伤阈值和更高的非线性阈值,因此研制大模面积平顶模式场光纤也是提高光纤输出功率的一种方法。

1999 年 Ghatak 等^[5]提出了一种大模面积平顶模场光纤结构,但这种光纤在国际上并没有引起足够的关注。近年来国内也开展了平顶模场光纤的研究工作^[6~10],主要涉及平顶模场光纤的结构设计、模式、弯曲以及激光等特性,但这些光纤对制作工艺均有较高的要求。本文提出了一种易于制备的七个空气孔缺失的平顶模式场光子晶体光纤(PCF)结构,通过数值模拟方法研究了光纤结构参数之间的相互影响、基模模面积变化规律以及结构参数变化对高阶模含量的影响。

2 理论模型

本文研究的光子晶体光纤截面如图 1 所示。三角形格子排布的空气孔(直径为 d , 间隔为 Λ)与周围基质玻璃共同构成包层,中心七个空气孔缺失构成纤芯,其中中心为一个圆形低折射率的内纤芯(半径为 R)。在下面数值模拟中,以石英玻璃为例进行分析,导光波长为 $1.064 \mu\text{m}$ 。石英玻璃折射率与波长的变化关系采用 Sellmeier 公式^[11]计算。

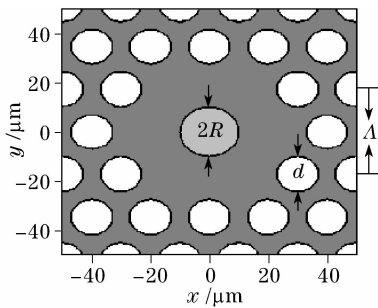


图 1 平顶模场光子晶体光纤截面图,不同灰度区域代表不同的折射率

Fig. 1 Cross section of flattened mode photonic crystal fiber, different regions are indicated by different colors

对于纵向均匀、无吸收的光波导结构,横向电磁场分量 $\mathbf{e}_t(x, y, z) = e_x \mathbf{x} + e_y \mathbf{y}$ (\mathbf{x}, \mathbf{y} 分别为 x, y 方向的单位矢量)满足下式^[12],

$$\begin{cases} (\nabla_t^2 + k^2 n^2 - \beta^2) e_x = -\frac{\partial}{\partial x} \left(e_x \frac{\partial \ln n^2}{\partial x} + e_y \frac{\partial \ln n^2}{\partial y} \right), \\ (\nabla_t^2 + k^2 n^2 - \beta^2) e_y = -\frac{\partial}{\partial y} \left(e_x \frac{\partial \ln n^2}{\partial x} + e_y \frac{\partial \ln n^2}{\partial y} \right), \end{cases}$$

式中 n, β 分别为光纤截面折射率函数和传播常数。

通过有限差分法求解上式,可以得到传播常数以

及相应的电场。根据预先设定的平顶模式场区域大小,通过迭代方法选取符合要求的中心区域折射率来实现平顶模场分布,具体步骤可参考文献[6,7]。

基模模面积 A_{eff} 定义为基模电场强度降为最大值的 $1/e$ 时的面积。

3 计算结果及分析

3.1 模场分布

当 $\Lambda = 20.0 \mu\text{m}$, $r/\Lambda = 0.35$, 内纤芯半径为 $10 \mu\text{m}$ 时,计算得到的光纤基模场分布如图 2 所示。图 2 给出了一个典型的平顶模式场三维与二维分布图。通过计算,要实现平顶模场,当 $\Lambda = 20.0 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.7$, $R = 10.0 \mu\text{m}$, $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ 时,内纤芯折射率为 1.44954,基模模场面积为 $2096 \mu\text{m}^2$ 。从图 2 可以看出,光纤基模中心区域为平顶分布。通过合理的结构参数设计,可以实现预先设计的光纤模式。

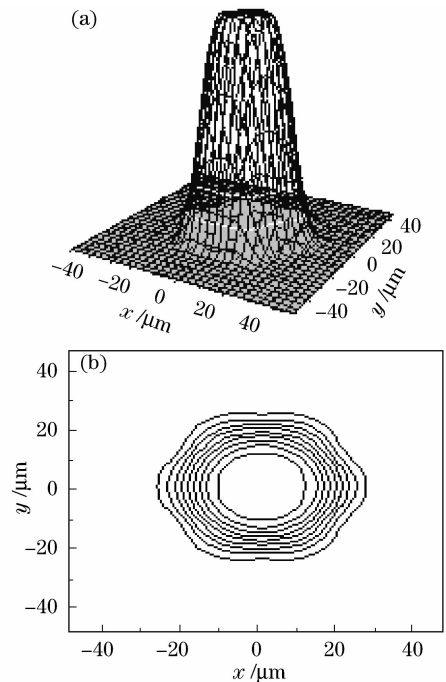


图 2 平顶模式场光子晶体光纤(a)三维和(b)二维基模场分布图

Fig. 2 3D and 2D visualization of the field distribution of the flattened-mode PCF

3.2 结构参数变化对基模模场的影响

图 3 和图 4 分别给出了随着内纤芯尺寸增大,内纤芯折射率与基模模面积的变化曲线。计算中,孔间距为 $16.0 \mu\text{m}$,空气孔直径与间距比为 0.7。从图 3 可以看出,随着内纤芯尺寸增大,内纤芯折射率在以指数形式降低。内纤芯越大,其折射率越低。当内纤芯半径超过 0.8 倍孔间距时,内纤芯折射率

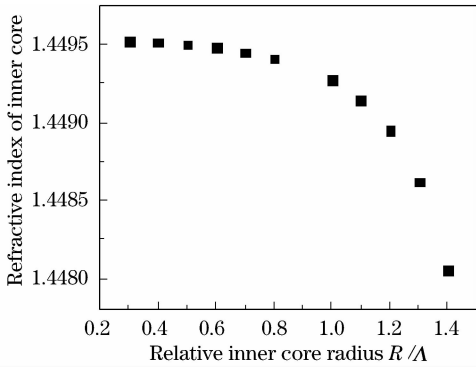


图 3 内纤芯折射率随着内纤芯大小变化曲线

Fig. 3 Refractive index of inner core varies with its size

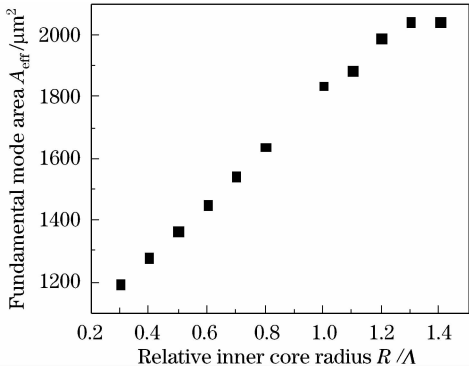


图 4 基模模面积随着内纤芯大小变化曲线

Fig. 4 Fundamental mode area varies with inner core size

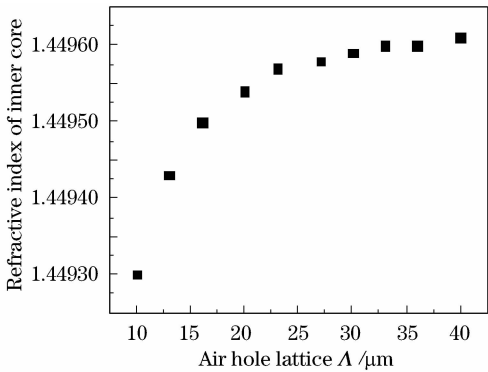


图 5 内纤芯折射率随着空气孔间隔变化曲线

Fig. 5 Refractive index of inner core varies with air hole pitch

快速降低。从图 4 可以看出,随着内纤芯尺寸增大,基模模面积逐渐增大。当内纤芯半径小于 1.2 倍孔间距时,基模模面积线性增加。继续增大纤芯尺寸时,模面积逐渐趋于饱和。图 5 和图 6 分别给出了随着空气孔间距增大,内纤芯折射率与基模模面积的变化曲线。计算中,空气孔直径与间距比为 0.7,内纤芯半径与空气孔间距比为 0.5。从图 5 可以看出,随着空间距增大,内纤芯折射率在逐渐增大。当孔间距超过 30 μm 时,内纤芯折射率变化趋于饱

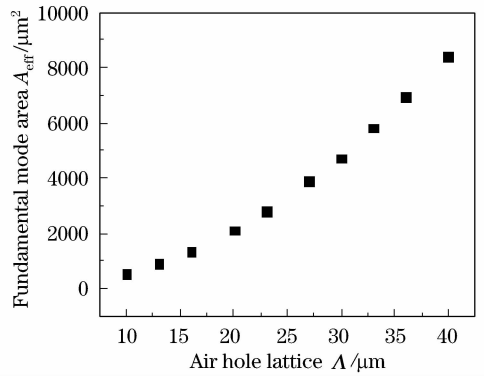


图 6 基模模面积随着空气孔间隔变化曲线

Fig. 6 Fundamental mode area varies with air hole pitch

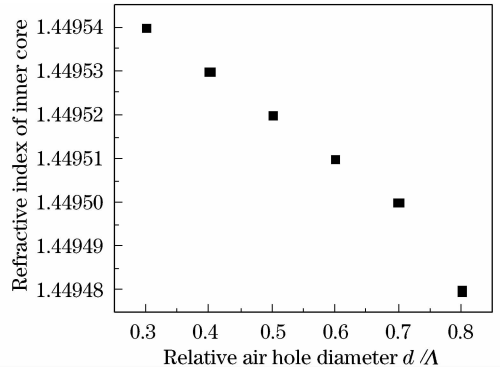


图 7 内纤芯折射率随着空气孔相对大小变化曲线

Fig. 7 Refractive index of inner core varies with the relative air hole diameter

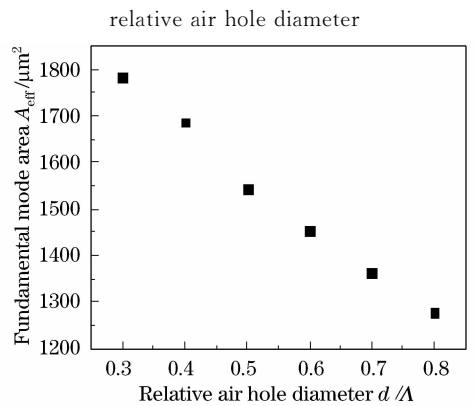


图 8 基模模面积随着空气孔相对大小变化曲线

Fig. 8 Fundamental mode area varies with the relative air hole diameter

和。从图 6 可以看出,随着空气孔间距增大,基模模面积呈指数增大。图 7 和图 8 分别给出了随着空气孔增大,内纤芯折射率与基模模面积的变化曲线。计算中,空气孔间距为 16.0 μm ,内纤芯半径为 8.0 μm 。从图 7 可以看出,随着空气孔增大,内纤芯折射率与基模模场面积都线性降低。根据上述结果可以看出,对于这种七个空气孔缺失的光子晶体光纤,要实现平顶模场,内纤芯折射率由内纤芯大小、

空气孔间距以及空气孔相对大小共同决定。当空气孔间距为 $20.0\ \mu\text{m}$,空气孔半径为 $7.0\ \mu\text{m}$,内纤芯半径 $10.0\ \mu\text{m}$ 时,基模模场面积可达 $2000\ \mu\text{m}^2$,此时内纤芯与基质玻璃的折射率差别在 0.0001 。根据现有的制备工艺,也是可以实现的。如果可以进一步缩小内纤芯与基质玻璃的折射率差,通过增大内纤芯尺寸,可以获得更大的模场面积。

3.3 平顶模场光子晶体光纤低阶模场图

平顶模场光子晶体光纤低阶模场图如图9。图9给出了平顶式模场光子晶体光纤的几种低阶模二

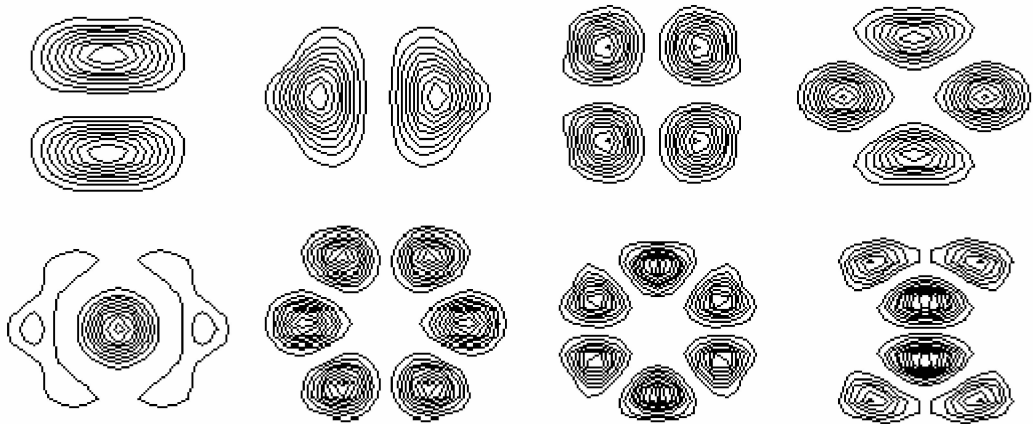


图9 平顶模式场光子晶体光纤低阶模场分布图

Fig. 9 Lower-order mode field patterns of the flattened mode photonic crystal fiber

4 结 论

通过全矢量法数值模拟了一种平顶式模场光子晶体光纤结构,给出了结构参数间的变化规律。经过合理的结构设计,平顶模场面积可以很容易超过 $2000\ \mu\text{m}^2$ 。此外增加内纤芯尺寸和导光波长,减小空气孔的相对大小可以减少光纤中的高阶模含量。

参 考 文 献

- 1 Wang Qingyue, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. Large mode area photonic crystal fiber laser output high average power femtosecond pulses [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1603~1606
王清月,胡明列,宋有建等. 用大模场光子晶体光纤获得高功率飞秒激光[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1603~1606
- 2 Yuan Yanyang, Gong Mali. Analysis and design of refractive index and dopant distributions for large mode area fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1355~1359
袁艳阳,巩马理. 大模面积光纤中折射率和掺杂分布的设计和分折[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1355~1359
- 3 Fang Hong, Lou Shuqin, Guo Tieying *et al.*. Novel high birefringence photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 202~206
方宏,娄淑琴,郭铁英等. 一种新结构高双折射光子晶体光纤[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 202~206

维分布图。通过计算发现,增大内纤芯尺寸、导光波长,减小空气孔相对大小,可以降低光纤中的模式数量。这可以理解为,在这种情况下,内纤芯与基质玻璃的折射率以及包层的有效折射率差增大^[6,7],内纤芯中的光波通过反射和折射进入外纤芯的效应也进一步增强;包层中的大空气孔的存在使高阶模通过衍射效应泄漏出去。由于光子晶体光纤相对于多包层光纤具有更高的泄漏损耗,因此在模场面积相同的情况下,平顶模场光子晶体光纤比平顶模场多包层光纤含有更少的模式,更容易实现单模传输。

- 4 C. D. Brooks, F. Di Teodoro. Multi-megawatt peak-power, single-transverse-mode operation of a $100\ \mu\text{m}$ core diameter, Yb-doped rod-like photonic crystal fiber amplifier [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(11): 111119~111121
- 5 A. K. Ghatak, I. C. Goyal, R. Jindal. Design of a waveguide refractive index profile to obtain a flat modal field [C]. *SPIE*, 1999, **3666**: 40~44
- 6 Qinling Zhou, Xingqiang Lu, Jianrong Qiu *et al.*. Beam-shaping microstructure optical fiber [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(12): 686~688
- 7 Lu Xingqiang, Zhou Qinling, Qiu Jianrong *et al.*. Design guidelines and characteristics of beam-shaping microstructure optical fibers [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **259**(2): 636~639
- 8 Zhao Chujun, Peng Runwu, Tang Zhixiang *et al.*. Modal fields and bending loss analyses of three-layer large flattened mode fibers [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **266**(1): 175~180
- 9 Zhao Chujun, Tang Zhixiang, Ye Yunxia *et al.*. Design guidelines and characteristics for a kind of four-layer large flattened mode fibers [J]. *Optik*, 2008, **119**(15): 749~754
- 10 Wang Chuncan, Zhang Fan, Lu Yuchun *et al.*. Photonic crystal fiber with a flattened fundamental mode for the fiber lasers [J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(11): 2232~2235
- 11 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. San Diego: Academic Press, 2001.
- 12 A. W. Snyder, J. D. Love. *Optical Waveguide Theory* [M]. London: Chapman & Hall, 1983.