

微小空气孔传光的光子晶体光纤研究*

赵兴涛^{1)2)†} 刘晓旭¹⁾³⁾ 郑义²⁾ 韩颖¹⁾ 周桂耀¹⁾ 李曙光¹⁾²⁾ 侯蓝田¹⁾

1) (燕山大学电气学院, 河北省测试计量技术及仪器重点实验室, 亚稳材料科学与技术国家重点实验室, 秦皇岛 066004)

2) (北京交通大学理学院激光研究所, 北京 100044)

3) (河北科技师范学院理学院, 秦皇岛 066004)

(2012年2月20日收到; 2012年5月11日收到修改稿)

利用有限元方法对纤芯中心带有一个微小空气孔的光子晶体光纤进行了分析, 得到了其模场分布、损耗及色散特性随光纤结构参数及波长的变化规律. 根据光的衍射原理及光子晶体光纤的传输特性, 对空气孔传光的物理本质进行了解释. 得到了微小空气孔低损耗、高强度、单模传输时, 光子晶体光纤结构参数及波长的取值范围. 设计出了一种优化的光子晶体光纤结构, 其模场很好地集中在纤芯微小空气孔中, 限制损耗 $\alpha = 5.9 \times 10^{-5}$ dB/km, 为微小空气孔传光的光子晶体光纤设计及制备提供了理论指导. 光在空气孔中高强度、长距离传输, 为光与物质相互作用及非线性光纤光学提供了新的条件.

关键词: 光子晶体光纤, 空气芯, 有限元法, 模场分布

PACS: 42.81.-i, 42.81.Dp

1 引言

从微米到毫米直径的光波导在光通信、传感及能量传输等方面都已广泛应用, 还有很多方面的应用需要降低光波导的直径, 但是由于精度要求较高, 制备低损耗、亚波长尺度的光波导是很困难的. 最近, 制备出了亚微米及纳米尺度的光纤, 这些直径小于一个微米的纳米光纤是常用微米尺度光纤的几十分之一到几千分之一^[1-4]. 它们可以用作空气包层的亚波长直径的线波导, 也可以用于微米或纳米尺度的光子器件.

这些实芯光纤的传导特性已经有了很多研究, 但是空芯亚波长直径光纤的传导特性研究还很少. 最初光在低折射率材料中传输是由于两种折射率差很大的材料交界面的电场差产生的, 但是其损耗较高, 只能在几厘米长度范围内应用^[5,6]. 另一方面, 空芯光子带隙型光纤可以在空气芯中传光, 并

且损耗很低, 但是这种光纤只能传输特定波长的光, 且空气芯较大 (10 μm 左右), 导致光强降低, 限制了其应用^[7]. 实芯光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, 简记为 PCF) 可以使强光在微小纤芯中长距离传输, 但是当纤芯直径进一步缩小时, 光在波导中传输最终受到衍射的限制, 衍射作用使光从高折射率纤芯中散射出去^[8]. 后来实验证明这种散射光可以被局域到纳米尺度的微小空气孔中, 形成强化倏逝场, 可以在 PCF 纤芯内小于 200 nm 的亚波长空气孔中传输, 且损耗很低^[9,10]. 光在空气孔中高强度、长距离传输, 为光与物质的相互作用及非线性光学提供了新的条件.

本文利用有限元方法对纤芯中心带有一个微小空气孔的 PCF 进行分析^[11-13], 得到其模场分布及损耗特性随光纤结构参数 (孔间距、空气填充比、包层空气孔层数) 及波长的变化规律, 并对其产生原因进行解释; 寻找微小空气孔低损耗、强光、单模传输时 PCF 结构参数及波长的取值范围;

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 60637010)、国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB327604)、国家自然科学基金 (批准号: 60978028)、河北省自然科学基金 (批准号: F2010001313, F2010001291) 和秦皇岛市科学技术研究与发展计划 (批准号: 201001A076) 资助的课题.

† E-mail: zxt-81@sohu.com

并设计一组优化的 PCF 结构参数, 为微小空气孔传光 PCF 的制备提供理论指导.

2 PCF 的模场分布及损耗特性随结构参数的变化规律

纤芯中心带有微小空气孔的 PCF 端面图如图 1 所示. 图中灰色区域为纯石英材料, 白色圆圈为空气孔, 包层空气孔间距为 Λ , 空气孔直径为 d , 中心带有 1 个微小空气孔的区域为纤芯, 微小空气孔的直径为 d_c .

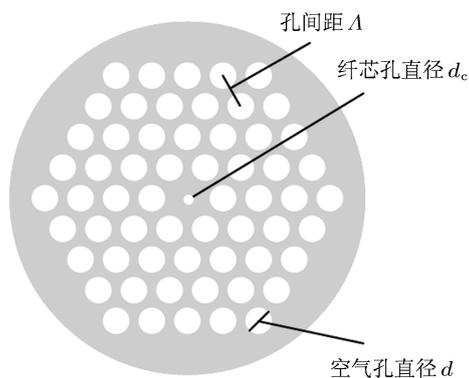


图 1 纤芯中心带有微小空气孔的 PCF 端面图

利用有限元方法对图 1 所示的中心纤芯带有

微小空气孔的 PCF 进行了模拟, 得到其不同结构参数及波长的模场分布. 纤芯中心空气孔分布的光场能量占模式总能量的比例可由

$$\frac{W_c}{W} = \left[\iint_{S_c} |E|^2 dx dy \right]^2 / \iint_s |E|^2 dx dy$$

计算得到, S_c 表示对纤芯中心空气孔积分, S 表示对整个光纤端面积分. 光纤的限制损耗由传播常数 β 决定, 损耗 $\alpha = 8.686 \text{ Im}[\beta]$, 单位是 dB/m, 这样可以得到不同结构参数及波长 PCF 的损耗特性 [7]. PCF 的结构参数包括包层空气孔层数 N 、包层空气孔填充比 d/Λ 、纤芯微小空气孔填充比 d_c/Λ 、包层空气孔间距 Λ , 还有波长 λ , 这 5 个参数决定了 PCF 的模场分布及损耗特性. 下面分别论述每个参数对 PCF 模场分布及损耗特性的影响及其产生原因. 根据 PCF 的无截止单模特性 [14,15], 在以下所研究的 PCF 参数取值范围内, PCF 都是单模传输.

当 $N = 8, d/\Lambda = 0.8, d_c/\Lambda = 0.4, \Lambda = 1 \mu\text{m}$ 不变时, PCF 的模场分布及损耗随 λ 的变化如图 2 所示. 图 2(a), (b) 中圆形黑线代表空气孔与石英的交界面 (参考图 1); 越白的区域代表光强越强, 越黑的区域代表光强越弱. 从图中可以看出, 随 λ 的增加, 模场分布向纤芯空气孔及包层扩散, 光纤的限制损耗增加. 这可以由光的衍射原理进行解释: 当 λ 变

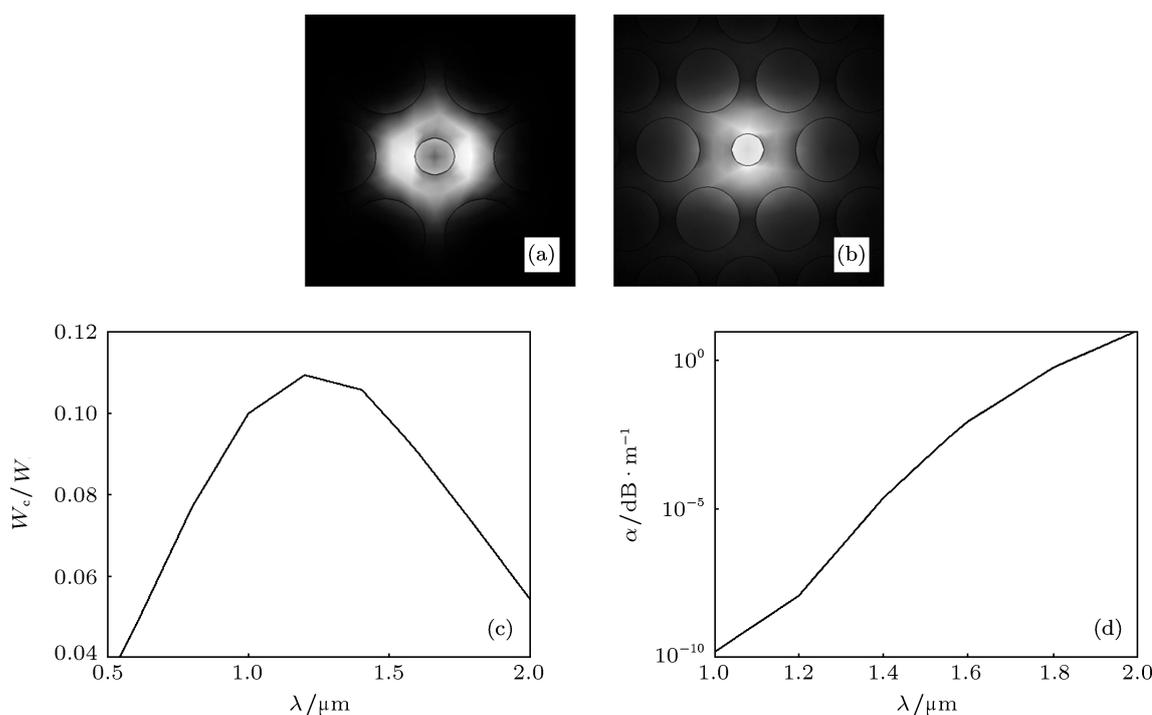


图 2 PCF 的模场分布及损耗随 λ 的变化 (a) $\lambda = 1 \mu\text{m}$; (b) $\lambda = 2 \mu\text{m}$; (c) W_c/W ; (d) 损耗谱

大时, 衍射作用增强, 模场由石英芯向纤芯空气孔及包层散射, PCF 的限制损耗增加; 从图 2(c) 可以看出, 在短波段 W_c/W 随 λ 的增大而增大, 这时衍射作用使光能量向纤芯空气孔的散射较强; 在长波段 W_c/W 随 λ 的增大而减小, 这时衍射作用使光能量向包层散射较强.

当 $N = 8, d/\Lambda = 0.8, d_c/\Lambda = 0.4, \lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 不变时, PCF 的模场分布及损耗随 Λ 的变化如图 3 所示. 从图中可以看出, 随 Λ 的增加, 模场分布由纤芯空气孔及包层向石英芯集中, 光纤的损耗减小, 其变化规律与图 2 中随 λ 的变化相反. 同样也可由光的衍射作用进行解释: 当 Λ 变大时, 衍射作用减弱, 模场集中到高折射率的石英中传输, PCF 的限制损耗降低; 从图 3(c) 可以看出, 在短波段 W_c/W 随 Λ 的增大而增大, 这表明由于衍射作用减弱, 使光能量由包层回到中心纤芯中; 在长波段 W_c/W 随 Λ 的增大而减小, 这表明由于衍射作用减弱, 使光能量由纤芯空气孔回到高折射率的石英中. 所以要使微小空气孔强光、低损耗传输, Λ/λ 需要选取合适的值. 综合图 1、图 2 可以得出, 当 $\Lambda/\lambda \approx 0.8$ 时, W_c/W 最大.

当 $N = 8, d/\Lambda = 0.8, \Lambda = 1 \mu\text{m}, \lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 不变时, PCF 的模场分布及损耗随 d_c/Λ 的变化如

图 4 所示. 从图中可以看出, 随 d_c/Λ 的增加, 模场分布由纤芯向外扩散, 光纤的损耗增加. 这是由 PCF 的传输特性决定的, d_c/Λ 越大, 纤芯与包层的折射率差越小, 模场就向包层扩散, 同时损耗增加 [16,17].

从图 4(c) 可以看出, 当纤芯空气孔 (d_c/Λ) 较小时, W_c/W 随 d_c/Λ 的增大而增大, 这主要是由于纤芯空气孔的面积变大, 所以传输的能量比例变大. 当纤芯空气孔 (d_c/Λ) 较大时, W_c/W 随 d_c/Λ 的增大而减小, 这主要是由于模场分布向外扩散, 所以纤芯空气孔传输的能量比例减小. 图 4(d) 表示纤芯空气孔归一化光能量密度 W_{av} (单位面积的能量) 随 d_c/Λ 的变化规律. 可以看出, 随 d_c/Λ 的增加, 纤芯空气孔的光能量密度减弱. 所以在 PCF 设计时, d_c/Λ 选取较小的值, 可以使微小空气孔传输更强的光.

当 $N = 8, d_c/\Lambda = 0.4, \Lambda = 1 \mu\text{m}, \lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 不变时, W_c/W 及损耗随 d/Λ 的变化如图 5 所示. 从图中可以看出, W_c/W 随 d/Λ 的增加而增加, 模场分布向纤芯空气孔集中, 光纤的损耗减小. 这是由 PCF 的传输特性决定的, d/Λ 越大, 纤芯与包层的折射率差越大, 模场向纤芯中心集中, 同时损耗降低. 所以在 PCF 设计时, d/Λ 尽量选取较大的值, 可以使微小空气孔传输更强的光.

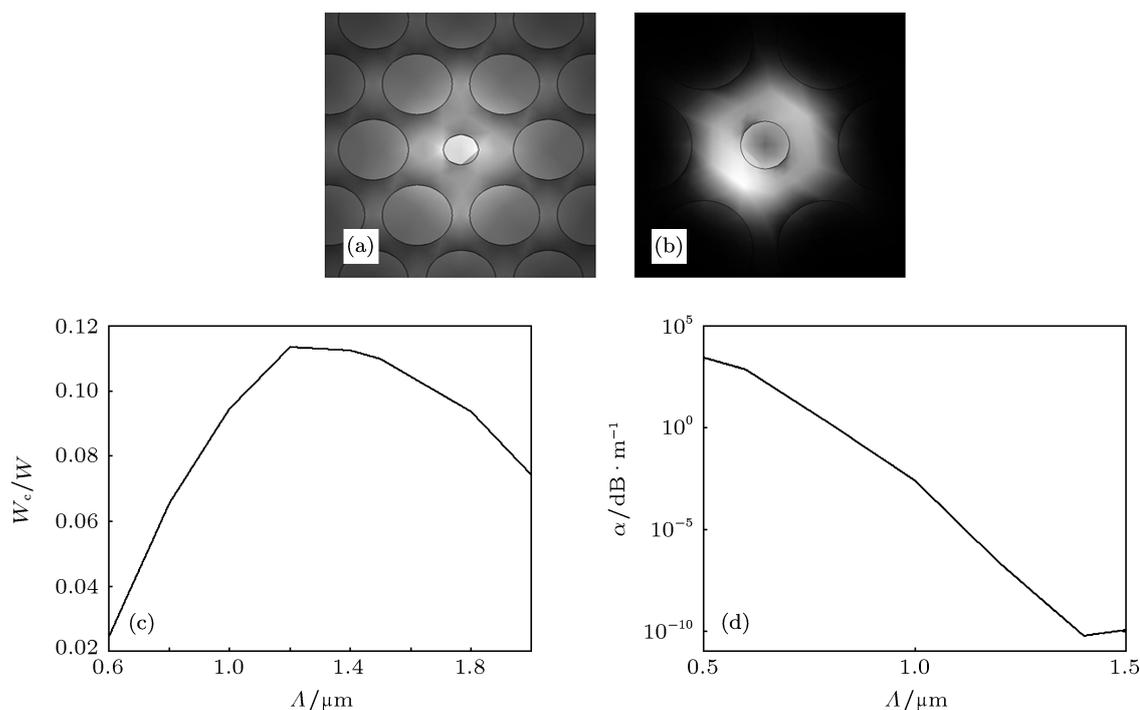


图 3 PCF 的模场分布及损耗随 Λ 的变化 (a) $\Lambda = 0.5 \mu\text{m}$; (b) $\Lambda = 1.5 \mu\text{m}$; (c) W_c/W ; (d) 损耗谱

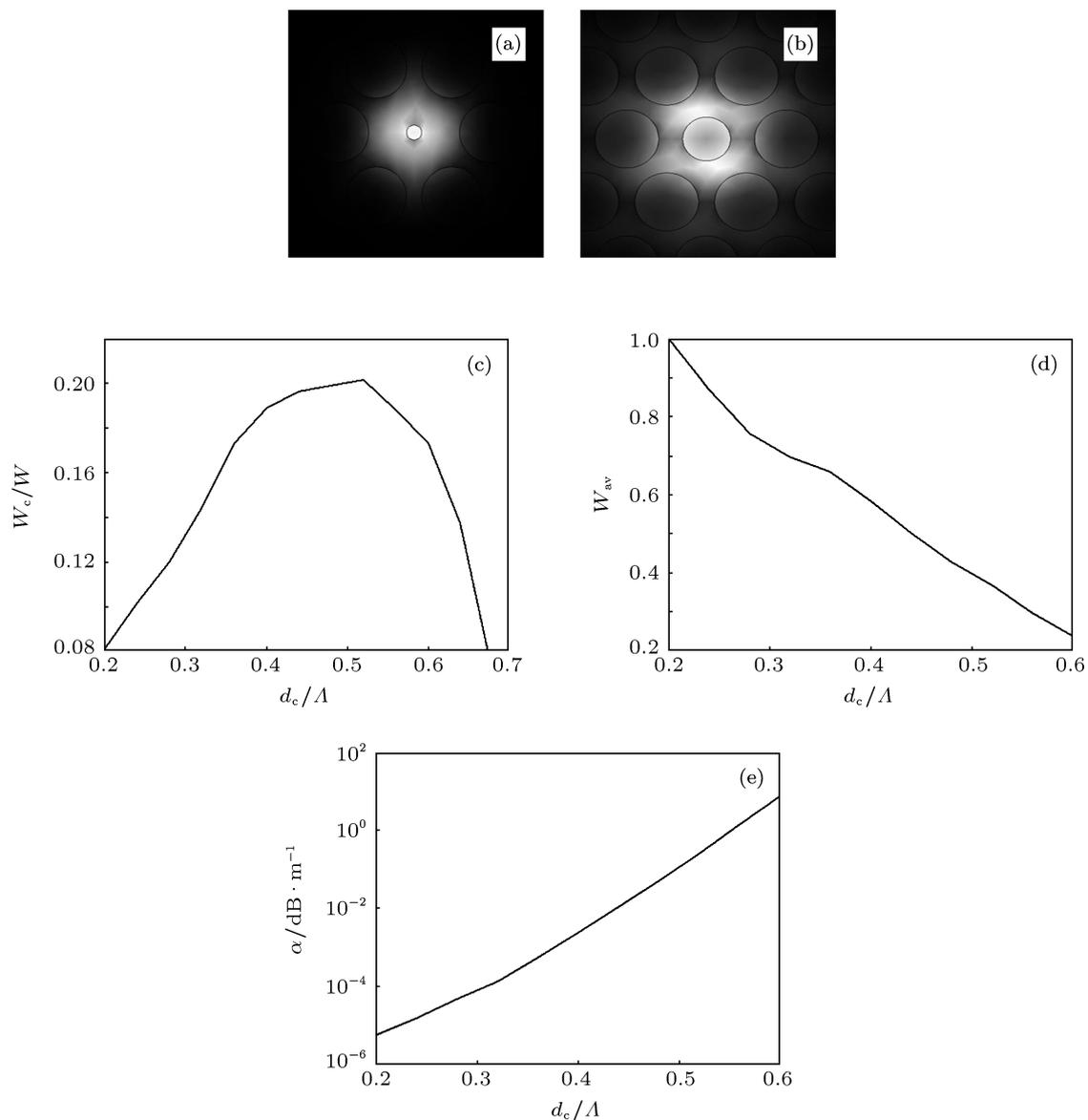


图4 PCF的模场分布及损耗随 d_c/Λ 的变化 (a) $d_c/\Lambda = 0.2$; (b) $d_c/\Lambda = 0.6$; (c) W_c/W ; (d) W_{av} ; (e) 损耗谱

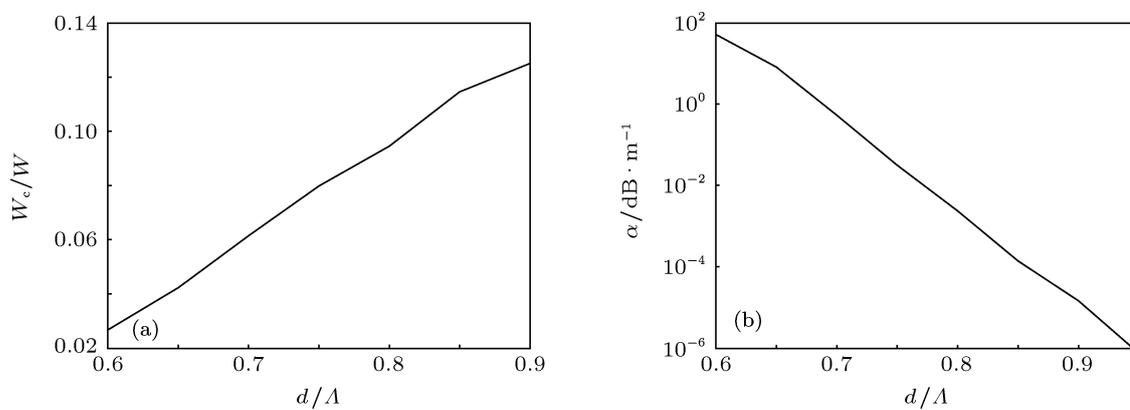


图5 W_c/W 及损耗随 d/Λ 的变化 (a) W_c/W ; (b) 损耗谱

当 $d/\Lambda = 0.8$, $d_c/\Lambda = 0.4$, $\Lambda = 1 \mu\text{m}$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 不变时, W_c/W 及损耗随 N 的变化如图 6 所示. 从图中可以看出, 随 N 的增加, W_c/W 没有明显变化, 光纤的损耗减小. 这是由于 PCF 包层空气孔层数越多, 其束缚光的能力就越强. 所以在 PCF 设计时, N 尽量选取较大的值, 可以使微小空气孔传输更强的光.

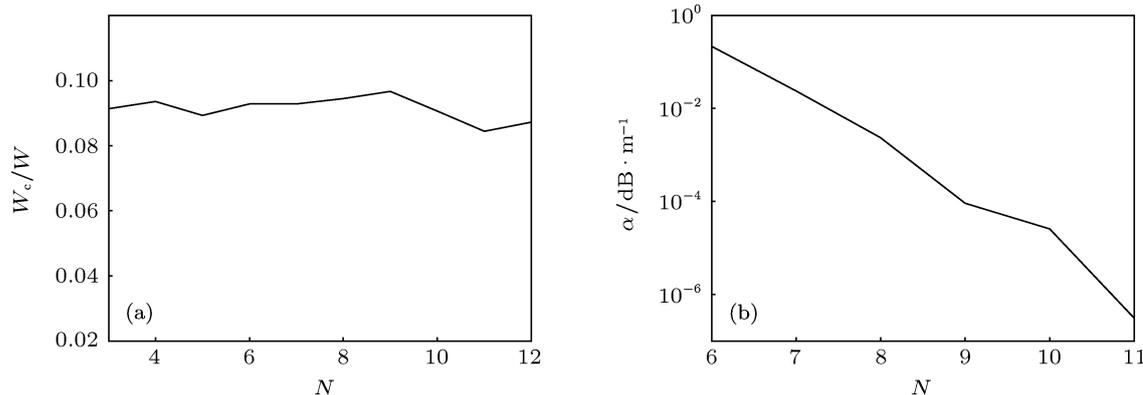


图 6 W_c/W 及损耗随 N 的变化 (a) W_c/W ; (b) 损耗谱

表 1 PCF 的模场分布及损耗随光纤结构参数及波长的变化规律

	N	d/Λ	d_c/Λ	Λ	λ
模场集中	—	增加	减小	$\Lambda/\lambda \approx 0.8$	
损耗减小	增加	增加	减小	增加	减小

3 PCF 的色散特性随结构参数的变化规律

PCF 色散系数 D 随结构参数及波长 λ 的变化规律如图 7—9 所示. 从图中可以看出, λ 在 1—1.8 μm 范围内, D 随 λ 的增大而减小. 当 $d/\Lambda = 0.8$, $d_c/\Lambda = 0.2$ 时, 对于不同的 Λ , D 随 λ 的变化规律如图 7 所示, D 随 Λ 的增大而增大, 零色散波长向长波段移动. 当 $\Lambda = 1$, $d_c/\Lambda = 0.2$ 时, 对于不同的 d/Λ , D 随波长 λ 的变化规律如图 8 所示, 在短波段, D 随 d/Λ 的增大而增大, 零色散波长向长波段移动; 在长波段, D 随 d/Λ 的增大而减小. 当 $\Lambda = 1$, $d/\Lambda = 0.8$ 时, 对于不同的 d_c/Λ , D 随 λ 的变化规律如图 9 所示, D 随 d_c/Λ 的增大而减小, 零色散波长向短波段移动.

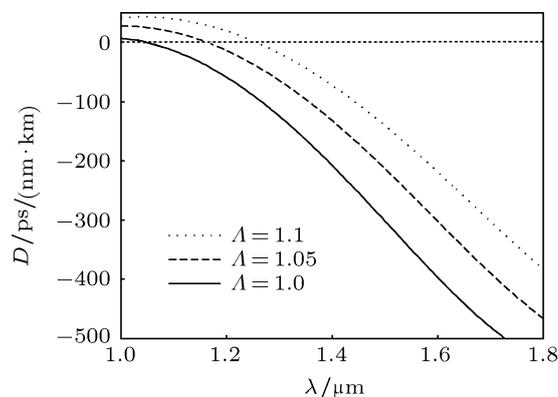


图 7 对于不同的 Λ , D 随 λ 的变化规律

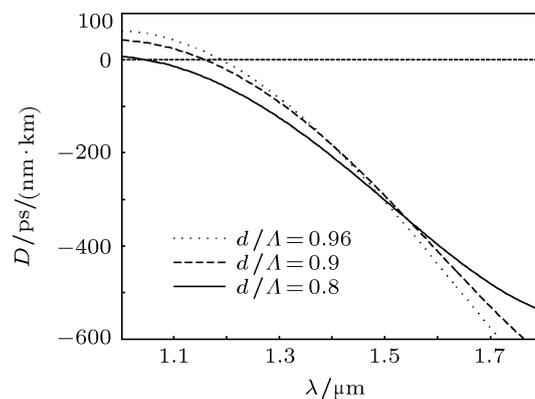
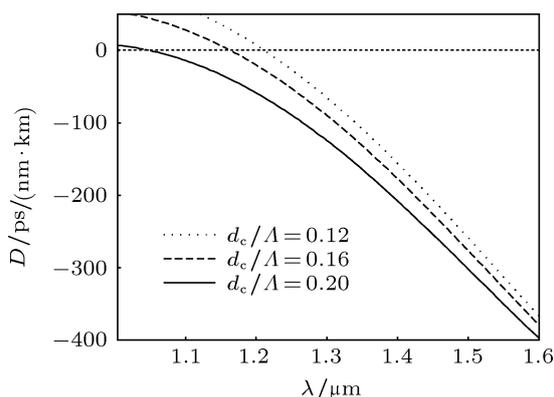


图 8 对于不同的 d/Λ , D 随波长 λ 的变化规律

图9 对于不同的 d_c/Λ , D 随 λ 的变化规律

4 纤芯带有微小空气孔 PCF 的设计

在 PCF 纤芯空气孔中可以填充各种气体, 进行气体检测、原子激发等实验研究. 在光与被测物质的相互作用过程中, 光的强度越大, 传输距离越长, 测量的精度就越高. PCF 的纤芯空气孔越大, 被测气体越容易填充, 测量的响应速度越快. 另一方面, 在 PCF 的制备过程中, 包层孔间距及纤芯空气孔越大, 越容易制备.

根据上节 PCF 的模场分布及损耗特性随光纤结构参数的变化规律, 综合考虑 PCF 的制备难度及在气体传感、原子激发等方面的应用要求, 选择合适的 PCF 结构参数. 当 $N = 8$, $\Lambda = 1 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.9$, $d_c/\Lambda = 0.2$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 时, 光纤的模场分布如图 10 所示. 从图中可以看出, 模场很好地集中在纤芯微小空气孔中, 纤芯空气孔能量占总模式能量的比例 $W_c/W = 0.1548$. 根据上节的损耗公式计算得到, 其限制损耗 $\alpha = 5.9 \times 10^{-5} \text{ dB/km}$.

由于空气的材料损耗极低, 所以设计的 PCF 具有很低的损耗值.

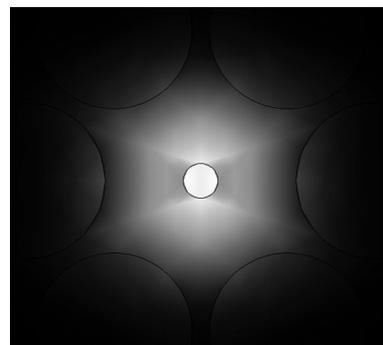


图10 所设计 PCF 的模场分布图

5 结论

利用有限元方法对纤芯中心带有微小空气孔 PCF 的传输特性进行了分析, 得到了其模场分布、损耗及色散特性随光纤结构参数 (N , Λ , d/Λ , d_c/Λ) 及 λ 的变化规律, 并根据光的衍射原理及 PCF 的传输特性, 对微小空气孔的传光机理进行了解释. 总结得到, 要使 PCF 模场向中心微小空气孔集中, 需要 d/Λ 增加、 d_c/Λ 减小、 $\Lambda/\lambda \approx 0.8$; 要使其损耗降低, 需要 N 增加、 d/Λ 增加、 d_c/Λ 减小、 Λ 增加、 λ 减小. 设计出了一组优化的 PCF 结构参数, 模场可以很好地集中在纤芯中心微小空气孔内, 其限制损耗 $\alpha = 5.9 \times 10^{-5} \text{ dB/km}$. 为微小空气孔传光 PCF 的制备提供了理论指导, 为新型低折射率材料中光传输及高密度光子集成器件的应用奠定了基础.

- [1] Oulton R F, Sorger V J, Genov D A, Pile D F P, Zhang X 2008 *Nature Photon.* **2** 496
- [2] Tong L M, Gattass R R, Ashcom J B, He S L, Lou J Y, Shen M Y, Maxwell I, Mazur E 2003 *Nature* **426** 816
- [3] Tong L M, Lou J Y, Mazur E 2004 *Opt. Express* **12** 1025
- [4] Zhao C J, Tang Z X, Ye Y X, Fan D Y, Qian L J, Wen S C, Chen G H 2007 *Opt. Express* **15** 6629
- [5] Xu Q F, Almeida V R, Panepucci R R, Lipson M 2004 *Opt. Lett.* **29** 1626
- [6] Almeida V R, Xu Q F, Barrios C A, Lipson M 2004 *Opt. Lett.* **29** 1209
- [7] Saitoh K, Koshiba M 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 236
- [8] Foster M A, Moll K D, Gaeta A L 2004 *Opt. Express* **12** 2880
- [9] Bian Y S, Zheng Z, Liu Y, Zhu J S, Zhou T 2010 *Opt. Express* **18** 23756
- [10] Wiederhecker G S, Cordeiro C M B, Couny F, Benabid F, Maier S A, Knight J C, Cruz C H B, Fragnito H L 2007 *Nature Photon.* **1** 115
- [11] Koshiba M 2002 *IEICE Trans. Electron.* **85** 881
- [12] Brechet F, Marcou J, Pagnoux D, Roy P 2000 *Opt. Fiber Technol.* **6** 181
- [13] Guenneau S, Nicholet A, Zolla F, Lasquelllec S 2002 *IEEE Trans. Magn.* **38** 1261
- [14] Masanori K, Kunimasa S 2004 *Opt. Lett.* **29** 1739
- [15] Hädrich S, Schreiber T, Pertsch T, Limpert J, Peschel T, Eberhard T R, Tünnermann A 2006 *Opt. Express* **14** 6091
- [16] Wang J L, Yao J Q, Chen H M, Bing P B, Li Z X, Zhong K 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 104219 (in Chinese) [汪静丽, 姚建铨, 陈鹤鸣, 邴丕彬, 李忠洋, 钟凯 2011 物理学报 **60** 104219]
- [17] Cheng T L, Chai L, Lie Y F, Hu M L, Wang Q Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 024216 (in Chinese) [程同蕾, 柴路, 栗岩峰, 胡明列, 王清月 2011 物理学报 **60** 024216]

Study of photonic crystal fiber with an air core*

Zhao Xing-Tao^{1)2)†} Liu Xiao-Xu¹⁾³⁾ Zheng Yi²⁾ Han Ying¹⁾ Zhou Gui-Yao¹⁾
Li Shu-Guang¹⁾²⁾ Hou Lan-Tian¹⁾

1) (*Measurement Technology and Instrumentation Key Laboratory of Hebei Province, State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*)

2) (*Laser Institute of Science College, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

3) (*College of Physics and Chemistry, Hebei Normal University of Science and Technology, Qinhuangdao 066004, China*)

(Received 20 February 2012; revised manuscript received 11 May 2012)

Abstract

Photonic crystal fibers with an air hole in the core are analyzed by finite-element method. The relations of mode field distribution, confinement loss and dispersion characteristics with fiber structure parameter and wavelength are achieved. The principle of guiding light in air hole is explained by diffraction and the characteristics of photonic crystal fiber. For the fiber with low loss, single-mode, tightly confined light in the air core, the ranges of structure parameters and wavelengths are obtained. An optimal fiber structure is designed, of which the mode is tightly confined in the air core, and the confinement loss $\alpha = 5.9 \times 10^{-5}$ dB/km. These provide theoretical instruction for the design and fabrication of photonic crystal fiber with an air hole in the core. The high intensity in an air hole, coupled with long interaction length, promises a new class of experiments in light-matter interaction and nonlinear fiber optics.

Keywords: photonic crystal fiber, air core, finite-element method, mode distribution

PACS: 42.81.-i, 42.81.Dp

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60637010), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB327604), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60978028), the Young Scientists Fund of the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant Nos. F2010001313, F2010001291), the Science and Technology Development Program of Qinhuangdao, China (Grant No. 201001A076).

† E-mail: zxt-81@sohu.com