

新型空气孔长方形排列单模单偏振光子 晶体光纤的数值模拟*

张方迪† 刘小毅 张 民 叶培大

(北京邮电大学电信工程学院, 光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876)

(2006 年 4 月 15 日收到, 2006 年 6 月 5 日收到修改稿)

提出了一种空气孔长方形排列的单偏振光子晶体光纤结构, 并利用基于棱边/节点混合元的带有完全匹配层吸收边界条件的全矢量有限元方法对该结构进行了分析. 对设计思路进行了详细说明. 通过优化结构参数在理论上获得了波长在 1.38—1.61 μm 范围内仅有慢轴模且限制损耗低于 0.1 dB/km 的单模单偏振操作.

关键词: 光子晶体光纤, 单偏振, 限制损耗, 全矢量有限元方法

PACC: 4280M, 4210N, 4281D, 8120J

1. 引 言

在相干光通信系统以及光纤传感系统中, 保偏光纤有着非常重要的应用. 然而, 传统的保偏光纤一般由双折射光纤制成, 即使是在系统中加入起偏器也难以从根本上消除偏振模色散以及偏振模耦合对系统性能的影响. 鉴于此, 人们对一种只有一个偏振态的光纤进行过广泛的研究^[1-4].

在一定波长范围内, 可以通过两种途径来实现这种光纤. 一种是使光纤保持非常高的偏振相关损耗 (polarization dependent loss)^[1,2], 另一种是设计出一种特殊结构的光纤, 在该光纤中传播的光只有一个偏振态, 而另一个偏振态则处于截止状态^[3,4]. 前一种光纤即为通常意义上的单偏振光纤 (single-polarization fiber), 而后一种光纤则是真正意义上的单偏振光纤.

近年来, 光子晶体光纤 (PCF) 引起了人们极大的兴趣. 通过改变空气孔的大小或空气孔间距等参数, 可以实现传统单模光纤所不能够具有的各种奇异特性, 其中包括宽波长范围内的单模传输和很高的模式双折射等^[5-15]. PCF 中的模式双折射一般通过破坏光纤截面的对称性而获得, 具体做法可以是改变光纤空气孔的形状或者纤芯附近空气孔的大

小^[12-15]. 最近研究表明, 改变并优化这种双折射光纤的结构参数同样可以实现单偏振甚至是单模单偏振 (single-polarization single-mode) 操作^[16,17].

本文提出了一种空气孔长方形排列的双折射 PCF 结构, 并利用基于节点/棱边混合元 (hybrid edge/nodal element) 的带有完全匹配层 (PML) 吸收边界条件的全矢量有限元方法对该结构进行了分析. 分析结果表明, 该结构光纤同样可以实现单偏振操作. 通过优化结构参数在理论上获得了波长在 1.38—1.61 μm 范围内仅有慢轴模且限制损耗低于 0.1 dB/km 的单模单偏振操作.

2. 理论方法

本文利用一种基于棱边/节点混合元的全矢量有限元方法对所设计的光纤进行模拟. 该方法适用于截面任意折射率分布光纤, 而且精度较高. 近年来被广泛应用于微结构光纤 (micro-structured optical fiber) 的研究之中. 分析中采用的棱边/节点混合元不仅能够消除伪解 (非物理解), 而且在分析中可以直接把电场作为工作变量.

封闭波导中, 电场满足如下矢量微分方程:

$$\nabla \times ([\mu_r]^{-1} \nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 [\epsilon_r] \mathbf{E} = 0, \quad (1)$$

式中, k_0 为光波在真空中的波数, \mathbf{E} 代表电场矢量,

* 国家自然科学基金 (批准号: 60372100, 60507007) 资助的课题.

† E-mail: frankmore21c@yahoo.com.cn

$[\epsilon_r]$ 和 $[\mu_r]$ 分别为相对介电张量和相对磁导率张量, 表达式分别为

$$\begin{aligned} [\epsilon_r] &= \epsilon_r [\Lambda], \\ [\mu_r] &= \mu_r [\Lambda]. \end{aligned} \quad (2)$$

这里的 $[\Lambda]$ 与 PML 参数设置有关, 具体内容可以参阅文献 [18].

将光纤截面分割为许多小三角形单元, 并在各三角形单元内利用 CT-LN 矢量基函数 (constant tangential and linear normal vector basis functions)^[19] 将电场 E 分解为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \{U(x, y)\}^T \{e_t\}_e \\ \{V(x, y)\}^T \{e_t\}_e \\ j\beta \{L(x, y)\}^T \{e_z\}_e \end{bmatrix} \\ &= \exp(-j\beta z), \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $\{e_t\}_e$ 与 $\{e_z\}_e$ 分别为单元 e 内棱边与节点变量 $\{U\}$ 与 $\{V\}$ 为与棱边对应的形函数向量, $\{L\}$ 为与节点对应的形函数向量, β 为传播常数, T 表示转置.

应用 (3) 式对 (1) 式的泛函式进行离散, 最终可以得到关于传播常数 β 的广义特征值方程

$$\begin{bmatrix} A_{tt} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} e_t \\ e_z \end{pmatrix} = \beta^2 \begin{bmatrix} B_{tt} & B_{tz} \\ B_{zt} & B_{zz} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} e_t \\ e_z \end{pmatrix}, \quad (4)$$

式中矩阵均为大型稀疏矩阵. 数值求解矩阵方程可以获得模式的传播常数 β , 从而得到有效折射率

$$n_{\text{eff}} = \text{Re}(\beta/k_0), \quad (5)$$

式中 $k_0 = 2\pi/\lambda$, 波长 λ 的单位为 μm . 将特征向量代入 (3) 式可求得对应模式的电场分布, 而通过 β 的虚部则可以获得该模式的限制损耗 L_c , 定义为

$$L_c = -\frac{20}{\ln 10} \text{Im}\beta \times 10^6, \quad (6)$$

式中限制损耗 L_c 的单位为 dB/m.

3. 设计与结果分析

本文设计的单偏振光纤的空气孔呈长方形排列, 其截面如图 1 所示, 图中 d' 与 d 分别为纤芯附近大空气孔直径与包层空气孔直径, Λ_x (以下用 Λ 代替) 与 Λ_y 分别为 x (慢轴) 方向与 y (快轴) 方向上空气孔间距. 为了简化设计, 取 $\Lambda_y = 0.80\Lambda$, 包层空气孔相对孔径 $d/\Lambda = 0.50$, 空气孔层数为 10 (图中未全部画出).

对于较为理想的单偏振光纤, 必须满足单偏振

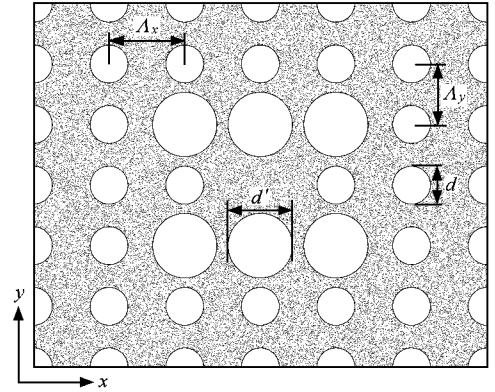


图 1 空气孔长方形排列高双折射 PCF 截面示意图

操作和低损耗两个条件. 首先, 光纤要在指定波长处满足单偏振操作条件, 即操作波长必须位于快轴模与慢轴模截止波长之间. 其次, 光纤必须是低损耗的. 对于空气孔层数有限的 PCF, 光纤中的所有模式均是泄漏的, 从而总是存在着限制损耗. 受工艺限制, 目前制作出的 PCF 损耗普遍较高. 因此, 我们一方面需要降低与工艺相关的损耗, 另一方面则是降低光纤的限制损耗, 设计出限制损耗尽可能低的 PCF.

为此, 我们首先对 $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.5$, d'/Λ 分别为 0.90, 0.85 和 0.80 三种结构进行了分析. 利用光纤截面的对称性仅需要分析截面的四分之一, 这样可以极大地减小运算工作量. 此外, 运算中将空气孔层数由 10 层近似为 4 层, 近似的目的同样是为了减小运算工作量. 因为根据文献 [11] 所得结论, PCF 有效折射率主要由最内层空气孔的分布决定, 所以这种近似完全是可行的.

图 2 为三种不同 d' 的情况下各模式的有效折射率与波长的关系. 本文中光纤背景材料为二氧化硅, 折射率均由 Sellmeier 方程^[20] 求得. 从图 2 可以发现, 包层填充基模 (FSM) 有效折射率曲线是两条不同的曲线, 与文献 [16, 17] 中的情形不同, 这是由于包层空气孔为长方形排列, 两个偏振方向上的 FSM 不再简并, 所以在图 2 中表现出了两条不同的曲线. 正是因为如此, 当光纤的两个正交模 (快轴模和慢轴模) 截止时, 其有效折射率曲线将分别与对应偏振方向下的 FSM 有效折射率曲线相交. 从图 2 可以看出, 随着 d' 的增大, 快轴模与慢轴模的有效折射率均减小, 在图中则表现为慢轴模与快轴模的有效折射率曲线相对于 FSM 折射率曲线整体往下移动. 由于 y 偏振方向上的 FSM 的有效折射率总是高于 x 偏振方向的, 所以我们始终可以找出单偏振波

长范围.当 d' 减小时,光纤的单偏振波长范围往长波长方向移动.图 2(b)中,光纤的快轴模和慢轴模将分别在波长为 1.25 和 1.65 μm 附近处截止,所以当 $d'/\Lambda = 0.85$ 时,光纤在波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 时满足单偏振操作要求.

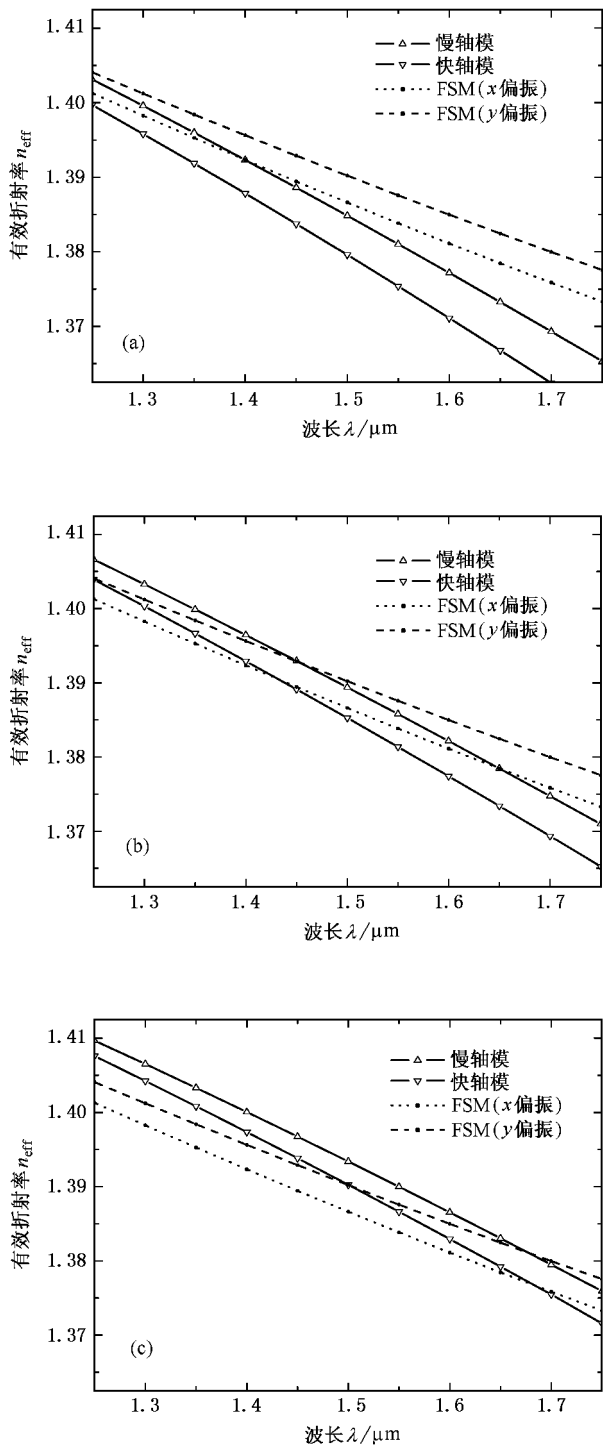


图 2 不同模式的有效折射率 n_{eff} 与波长 λ 的关系 $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.50$. (a) $d'/\Lambda = 0.90$ (b) $d'/\Lambda = 0.85$ (c) $d'/\Lambda = 0.80$

鉴于以上的分析,我们对图 2(b)参数下的 10 层空气孔结构光纤进行了进一步分析.图 3 给出了该光纤各模式的有效折射率随波长变化曲线.从图 3 可以看出,快轴模和慢轴模的截止情况与图 2(b)所示基本相同,从而也证实了文献 [11] 中的结论是正确的.图 4 为两个偏振模的限制损耗随波长变化曲线.从图 4 可以看出,快轴模的限制损耗在波长接近 1.25 μm 时急剧增大,慢轴模的限制损耗则在波长大于 1.60 μm 之后增势加大.尽管在 1.28—1.48 μm 范围内,慢轴模限制损耗不超过 0.1 dB/km,但是当波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 时已高达约 4.0 dB/km,不是很理想,因此需要进一步优化光纤的结构参数以获得更低的限制损耗.

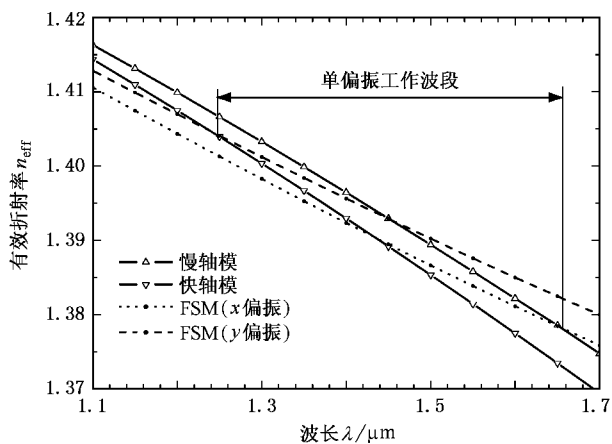


图 3 当 $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$ 时有效折射率随波长变化曲线 $d/\Lambda = 0.50$, $d'/\Lambda = 0.85$

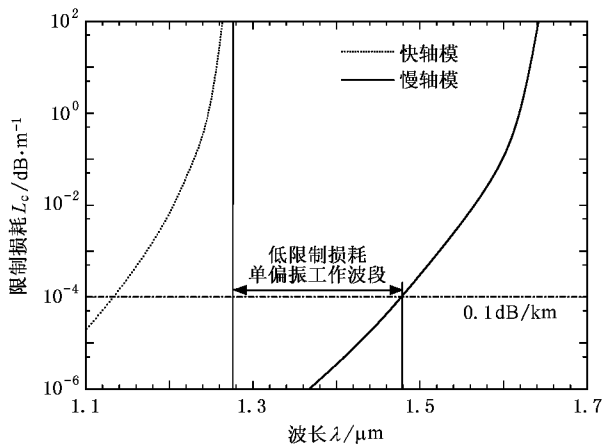


图 4 当 $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$ 时限制损耗随波长变化曲线 $d/\Lambda = 0.50$, $d'/\Lambda = 0.85$

降低光纤限制损耗的途径有很多,如增加包层空气孔层数或者增大空气孔直径等^[21].为了能够在 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 获得比较低的限制损耗,我们采取增大空气孔间距的办法,空气孔的相对直径则保持不变.光纤同样为 10 层空气孔结构,结构参数分别为 $\Lambda = 2.2 \mu\text{m}$, $\Lambda_y = 0.8\Lambda$, $d/\Lambda = 0.50$, $d'/\Lambda = 0.85$.图 5 给出了各个模式的有效折射率与波长的关系.从图 5 可以看到,快轴模在波长 $\lambda = 1.35 \mu\text{m}$ 附近处截止,而慢轴模则在波长大于 $1.75 \mu\text{m}$ 的某处截止.与图 3 相比,两模式的截止波长均有所增大,不过 $1.55 \mu\text{m}$ 仍然处于单偏振范围之内,不影响设计目标.图 6 为光纤的限制损耗曲线.从图 6 可以看出,在 $1.38\text{--}1.61 \mu\text{m}$ 波长范围内,光纤将可以实现仅有慢轴模且限制损耗低于 0.1 dB/km 的单偏振传输.由于在分析中此波长范围内未观察到任何高阶模式,所以

光纤在此波长范围内是单模单偏振的.

图 7 给出了该结构光纤的慢轴模在波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 的模场分布以及坡印亭矢量轴向(z 方向)分量分布.从图 7 可以看出,模场被很好地束缚在纤芯区域,中心附近沿轴向的坡印亭矢量为椭圆形分布,远离中心则渐趋于圆角矩形分布.

4. 讨 论

以上为不同结构参数下优化的结果.然而,由于受到工艺条件的限制,实际制作的光纤与设计之间会存在一定的偏差,这势必会对光纤的传输特性产生影响,因此有必要对这种偏差的影响做进一步分析.

图 8 给出了 $d'/\Lambda = 0.85 (1 + 1.0\%)$ (正三角形), $d'/\Lambda = 0.85$ (空心圆)和 $d'/\Lambda = 0.85 (1 - 1.0\%)$ (倒三角形)下两个正交偏振模式的限制损耗随波长变化曲线.由图 8 可以看出,随着 d' 的增大,光纤的单偏振范围往短波长方向移动.三种情形下,单偏振低限制损耗范围分别为 $1.32\text{--}1.575$, $1.375\text{--}1.61$ 和 $1.42\text{--}1.64 \mu\text{m}$.相同波长下,当 d' 增大时,快轴模(虚线)与慢轴模(实线)的限制损耗均增大,这是由于 d' 的增大降低了光纤纤芯与包层之间的折射率差,有更多的光往外泄漏导致的.

图 9 为空气孔相对孔径(d/Λ 和 d'/Λ)不变的情形下, Λ 分别为 $2.20 (1 + 1.0\%)$ (正三角形), 2.20 (空心圆)以及 $2.20 (1 - 1.0\%)$ (倒三角形)时限制损耗随波长变化曲线,图中实线代表慢轴模,快轴模则以虚线表示.三种情形下,光纤快轴模的截止波长分别为 1.38 , 1.375 和 $1.40 \mu\text{m}$,总体影响较 d' 小.从图 9 可以看出,当 Λ 由 $2.20 (1 - 0.01)$ 增大到 $2.20 (1 + 0.01)$ 时,快轴模的截止波长先减小后增大.不过这只是一个局部现象,很难定性地进行分析,其原因可能与材料色散(一阶)有关.

综合以上分析可以看出,为了保持较好的设计特性,使光纤在设计波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处实现单偏振传输,我们需要将 d'/Λ 值之偏差控制在一定范围之内,如 $\pm 1.0\%$.在目前的工艺水平条件下,将光纤尺寸偏差控制在 $\pm 1.0\%$ 范围内是能够满足的,因此本文设计的单偏振光纤是可以实现的.

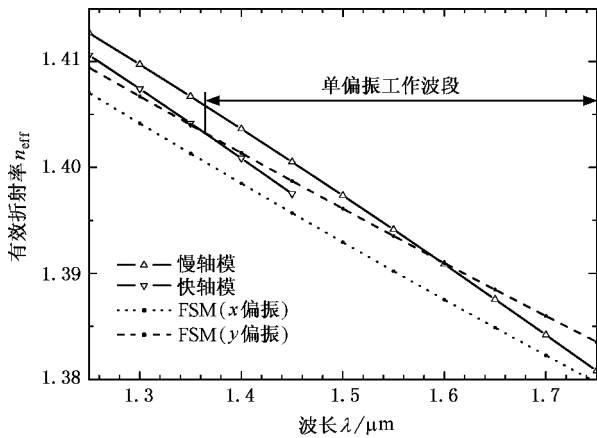


图 5 当 $\Lambda = 2.2 \mu\text{m}$ 时有效折射率随波长变化曲线 $d/\Lambda = 0.50$, $d'/\Lambda = 0.85$

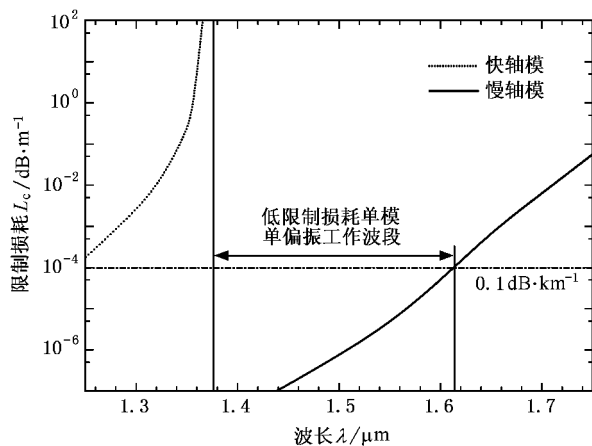


图 6 当 $\Lambda = 2.2 \mu\text{m}$ 时限制损耗随波长变化曲线 $d/\Lambda = 0.50$, $d'/\Lambda = 0.85$

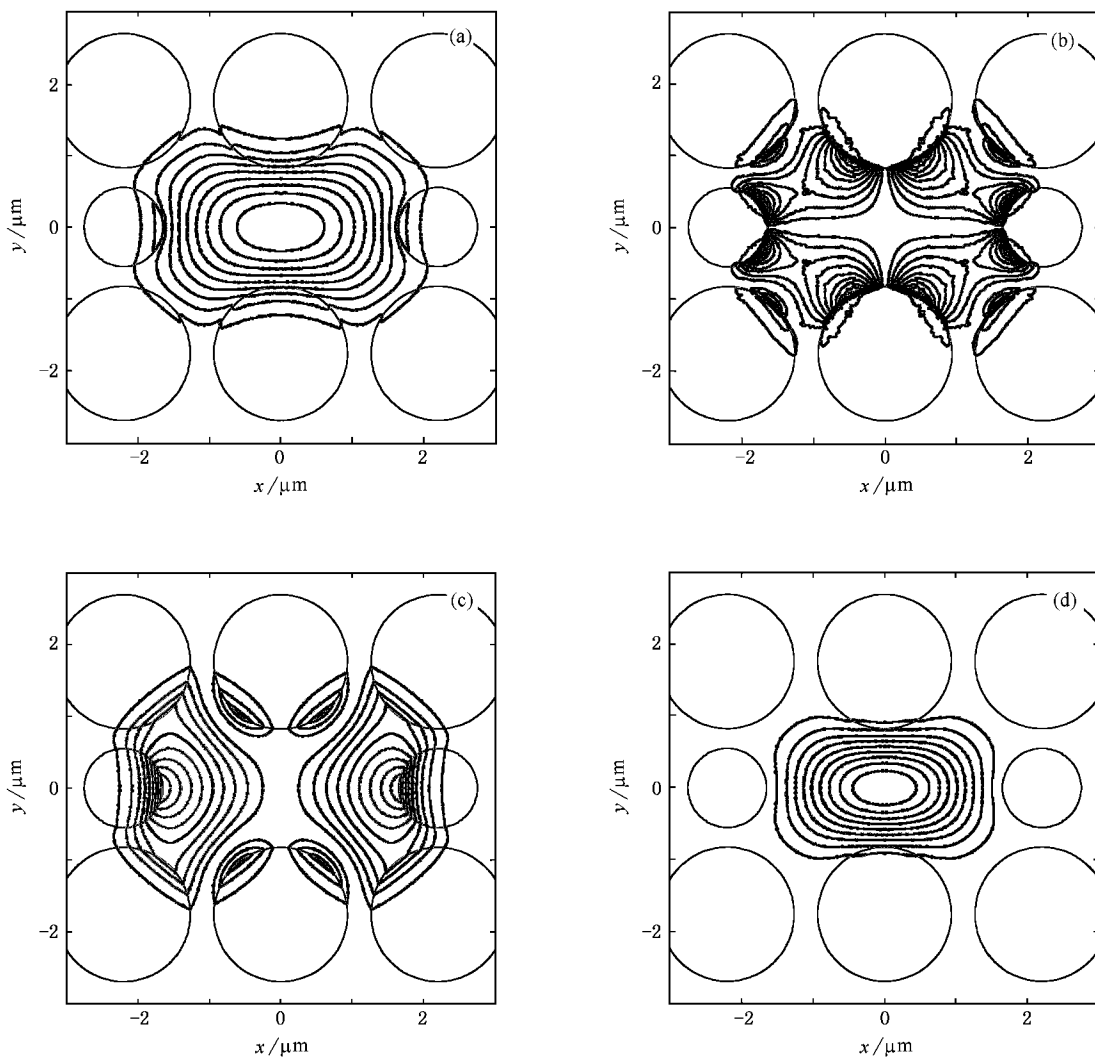


图 7 单模单偏振光纤模场分布和坡印亭矢量轴向(z 方向)分量分布 $\Lambda = 2.2$, $d/\Lambda = 0.50$, $d'/\Lambda = 0.85$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$. (a), (b), (c) 和 (d) 分别为慢轴 $|E_x|$, $|E_y|$, $|E_x|$ 的模场分布和坡印亭矢量轴向(z 方向)分量分布

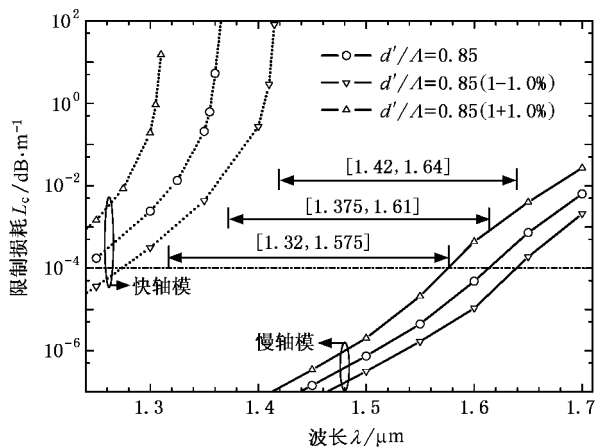


图 8 不同 d' 下限制损耗随波长变化曲线 $\Lambda = 2.2 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.50$

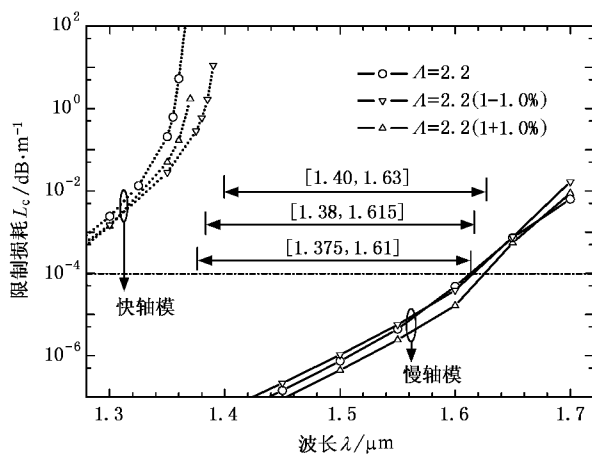


图 9 不同 Λ 下限制损耗随波长变化曲线 $d/\Lambda = 0.50$, $d'/\Lambda = 0.85$

5. 结 论

本文提出了一种空气孔长方形排列的双折射光纤,并利用基于节点/棱边混合元的带有 PML 吸收边界条件的全矢量有限元方法对该结构进行了分

析.研究表明,这种结构光纤同样可以实现单偏振操作.通过优化该结构的参数,在理论上获得了波长在 1.38—1.61 μm 范围内仅有慢轴模且限制损耗低于 0.1 dB/km 的单模单偏振操作.对该结构光纤的模场分布特性进行了研究,并分析了结构偏差对光纤传输特性的影响.

- [1] Okamoto K 1984 *Appl. Opt.* **23** 2638
- [2] Chiang K S 1989 *J. Lightwave Technol.* **7** 436
- [3] Simpson J R, Stolen R H, Sears F M *et al* 1983 *J. Lightwave Technol.* **1** 370
- [4] Messerly M J, Onstott J R, Mikkelsen R C 1991 *J. Lightwave Technol.* **9** 817
- [5] Li S G, Liu X D, Hou L T 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2811 (in Chinese) [李曙光、刘晓东、侯蓝田 2003 物理学报 **52** 2811]
- [6] Ren G B, Wang Z, Lou S Q *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 484 (in Chinese) [任国斌、王 智、姜淑琴等 2004 物理学报 **53** 484]
- [7] Ren G B, Wang Z, Lou S Q *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1856 (in Chinese) [任国斌、王 智、姜淑琴等 2004 物理学报 **53** 1856]
- [8] Li S G, Liu X D, Hou L T 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1873 (in Chinese) [李曙光、刘晓东、侯蓝田 2004 物理学报 **53** 1873]
- [9] Hu M L, Wang Q Y, Li Y F *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4252 (in Chinese) [胡明列、王清月、栗岩锋等 2004 物理学报 **53** 4252]
- [10] Zhang D S, Dong X Y, Zhang W G *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1235 (in Chinese) [张德生、董孝义、张伟刚等 2005 物理学报 **54** 1235]
- [11] Li S G, Xing G R, Zhou G Y *et al* 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 238 (in Chinese) [李曙光、邢光龙、周桂耀等 2006 物理学报 **55** 238]
- [12] Ortigosa-Blanch A, Knight J C, Wadsworth W J *et al* 2000 *Opt. Lett.* **25** 1325
- [13] Steel M J, Osgood R M 2001 *Opt. Lett.* **26** 229
- [14] Lou S Q, Wang Z, Ren G B *et al* 2004 *Chin. Phys.* **13** 1052
- [15] Hansen T P, Broeng J, Libori S E B *et al* 2001 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13** 588
- [16] Saitoh K, Koshiha M 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 1384
- [17] Kubota H, Satoki K, Koyanagi S *et al* 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 182
- [18] Koshiha M, Tsuji Y, Sasaki S 2001 *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.* **11** 152
- [19] Koshiha M, Tsuji Y 2000 *J. Lightwave Technol.* **18** 737
- [20] Agrawal G P 1995 *Nonlinear Fiber Optics* (New York : Academic) p7
- [21] White T P, McPhedran R C, De Sterks C M *et al* 2001 *Opt. Lett.* **26** 1661

Numerical simulation of a novel rectangular-lattice single-polarization single-mode photonic crystal fiber^{*}

Zhang Fang-Di[†] Liu Xiao-Yi Zhang Min Ye Pei-Da

(*Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies of Ministry of Education ,
School of Telecommunication Engineering , Beijing University of Posts and Telecommunications , Beijing 100876 , China*)

(Received 15 April 2006 ; revised manuscript received 5 June 2006)

Abstract

A novel structure of single-polarization single-mode (SPSM) photonic crystal fiber (PCF) is proposed and analyzed numerically based on a full-vector finite element method with anisotropic perfectly matched layers. Through optimization a fiber with confinement loss less than 0.1 dB/km in the wavelengths range of 1.38 to 1.61 μm is obtained. The corresponding design procedures for the novel SPSM-PCF are also presented.

Keywords : photonic crystal fiber , single-polarization , confinement loss , full-vector finite element method

PACC : 4280M , 4210N , 4281D , 8120J

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60372100 , 60507007).

[†] E-mail : frankmore21c@yahoo.com.cn