

椭圆形高折射率芯 Bragg 光纤的偏振和色散特性*

刘小毅 张方迪 张 民 余重秀 张 磊 吕召彪 叶培大

(北京邮电大学光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876)

摘 要 应用全矢量有限元方法, 分析了椭圆形高折射率芯 Bragg 光纤的偏振和色散特性, 详细讨论了光纤结构参量对模式双折射的影响, 结果发现: 椭圆形高折射率芯 Bragg 光纤的模式双折射在 10^{-3} 量级, 比传统保偏光纤高出一个量级, 且随波长的增加而单调递增; 模式双折射随包层低折射率材料填充比的增加而减小, 但与包层周期的变化几乎无关. 此外, 提高椭圆率或材料间的折射率比可显著增强模式双折射. 研究结果有助于设计高性能的一维微结构保偏光纤.

关键词 导波与光纤光学; Bragg 光纤; 有限元; 偏振; 色散

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

0 引言

高折射率芯 Bragg 光纤截面具有一维的周期性包层结构, 可以看作普通光子晶体光纤(PCF)^[1~3] 与传统 Bragg 光纤^[4] 相结合的产物, 是近年来提出的一种新型结构^[5]; 其芯层由高折射率材料形成, 而包层结构与传统的 Bragg 光纤相同, 是径向折射率高低周期性分布的介电结构. 研究表明, 这种微结构光纤也具有许多独特的性质: 如在 800 nm 和 1550 nm 附近的色散平坦特性以及极高的非线性系数^[5~7] 等. 光子晶体光纤中存在较高的折射率比, 并且在引入结构的非对称性方面具有很高的自由度, 可以获得很高的双折射, 达到 10^{-3} 以上^[8,9], 目前已经在实验中获得了应用^[10,11]. 但这种空气-二氧化硅 (air-silica) 二维结构的一个缺点是在拉制过程中容易导致横截面结构的畸变, 导致实际值与设计值之间的偏离. 相反, 一维的高折射率芯 Bragg 光纤则可以很好的克服这种现象^[7].

椭圆形结构是产生双折射的常用方法, 本文将其引入到高折射率芯 Bragg 光纤的设计中, 并应用全矢量有限元方法 (full-vector finite element method), 分析了椭圆形高折射率芯 Bragg 光纤的偏振和色散特性, 详细研究了光纤结构参量与其偏振特性的关系.

1 结构描述

椭圆形高折射率芯 Bragg 光纤由一系列同心且相似的椭圆构成, 其结构如图 1. 固定椭圆的长轴为 y 轴方向, 短轴为 x 轴方向. 利用椭圆率 ($U =$ 椭圆长轴长度/椭圆短轴长度) 以及短轴方向的波导结构

参量就可以完整的描述整个结构, 设沿短轴方向的波导结构参量为: 芯径 R , 包层周期 Λ 与芯径 R 的比例 $d = \Lambda/R$, 包层低折射率材料的填充比 $d_f = a/\Lambda$. 选取二氧化硅为高折射率材料 $n_1 = 1.46$, 为了支撑整个结构, 选取低折射率材料的折射率为 $n_2 = 1.2$. 本文的结论同样适用于其它折射率配置.

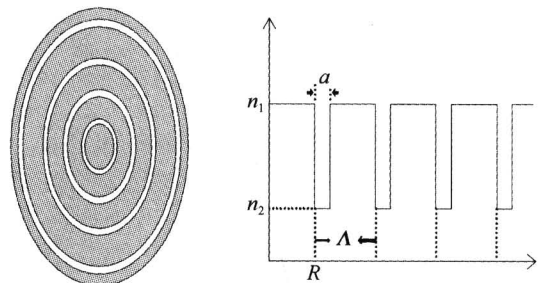


图 1 椭圆形高折射率芯 Bragg 光纤截面及其沿短轴方向折射率分布

Fig. 1 Cross section of elliptical high-index-core Bragg fiber and its index profile along the short axis

2 矢量有限元方法

有限元法是解决光波导问题的有效工具之一, 可适用于任意折射率分布的波导截面, 功能强大, 可达到很高的准确度, 近年来广泛应用于微结构光纤 (Microstructured Optical Fiber) 的分析与设计. 在众多全矢量有限元方法 (full-vector finite element method) 中, 混合棱边/节点元 (hybrid edge/nodal elements) (如图 2) 不仅可以有效地消除伪解 (非物理模式), 而且由于强加了横向场的连续性, 消除了

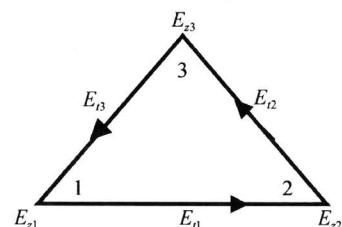


图 2 混合棱边/节点元
Fig. 2 Hybrid edge/nodal element

* 国家 973 计划: 新一代通信光电子集成器件及光纤的重要结构工艺创新与基础研究 (编号: 2003CB314906) 资助
Tel: 010-62281188 Email: liuxybest@hotmail.com
收稿日期: 2005-07-06

处理界面连续性条件的困难,可以方便地使用电场作为工作变量^[12]. 在封闭波导内,电场满足矢量波动方程

$$\nabla \times ([\mu_r]^{-1} \nabla \times E) - \kappa_0^2 [\epsilon_r] E = 0 \quad (1)$$

式中 κ_0 为自由空间波矢量, E 代表电场矢量, $[\epsilon_r]$ 和 $[\mu_r]$ 分别为相对介电常量张量和磁导率张量. 利用 constant tangential and linear normal (CT/LN) 矢量基函数对上式进行标准的有限元离散之后,可得到一个广义本征值方程

$$\begin{bmatrix} A_u & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} e_t \\ e_z \end{Bmatrix} = \beta^2 \begin{bmatrix} B_u & B_{uz} \\ B_{zu} & B_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} e_t \\ e_z \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中的矩阵均为大型稀疏矩阵. 数值求解该本征值方程,即可得到指定频率下的传播常量和电场分布. 矩阵的具体形式及求解过程请参考文献[12]. 利用波导结构的对称性,只需分析四分之一的波导结构,可大大节约计算时间和内存需求. 为保证有限元编码的正确性,首先参照文献对高折射率芯 Bragg 光纤的色散进行了验证,计算结果与文献结果相符^[5,6].

3 模场分布

对图 1 的椭圆形高折射率芯 Bragg 光纤,选取其结构参量为:椭圆率 $U=2$,芯径 $R=1.5 \mu\text{m}$,包层周期 Λ 与芯径 R 之比为 $d=\Lambda/R=0.8$,包层低折射率材料的填充比 $d_f=a/\Lambda=0.3$. 应用上述矢量有限元分析,数值求解得到的广义本征值方程,可分别获得基模 (HE_{11}) 两个偏振模的全矢量电场分布. 图 3 给出了 x 偏振模—— HE_{11}^x 的三个电场分量的场强分布,显然 y 分量的场强明显弱于 x 分量,大约为其 0.1%,使得横向场呈现出明显的线偏振特性,这点从矢量场分布图(图 4)中得到验证. 值得注意的是,由于两种材料之间存在较高的折射率比, z 分量变得不可忽略,大约为主分量(x 分量)的 20%,这与普通光子晶体光纤中的情况基本相同^[13]. 另一偏振模式 HE_{11}^y 的场分布与此类似,不再给出. 图 5 给出了波长 1550 nm 处 x 偏振基模的模场等高线图,可见模场被严格限制在芯区,且呈椭圆形分

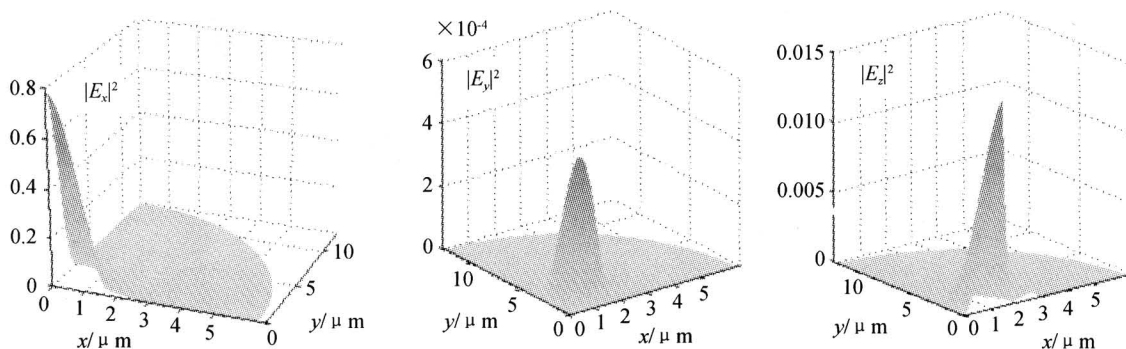


图 3 结构参量为 $U=2, R=1.5 \mu\text{m}, d=0.8, d_f=0.3$ 的椭圆形高折射率芯 Bragg 光纤在 1550 nm 处 x 偏振模的三个电场分量的场强分布(四分之一)

Fig. 3 Quarter of the x -polarized field intensity profile of an elliptical high-index-core Bragg fiber with $U=2, R=1.5 \mu\text{m}, d=0.8, d_f=0.3$ at wavelength 1550 nm

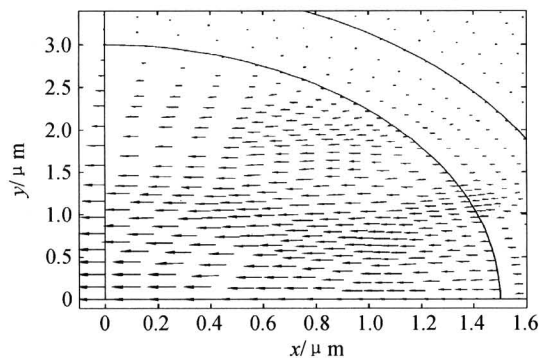


图 4 x 偏振模模场矢量图

Fig. 4 Quarter of the x -polarized modal field

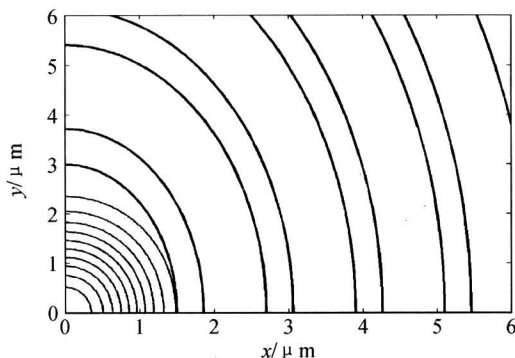


图 5 x 偏振模模场等高线(粗线所示为波导结构)

Fig. 5 Contour maps of the quarter of the electric field of x -polarized fundamental mode

布,沿椭圆长轴方向明显被拉长,与预期相符.而且,计算发现,随着波长的增加,模场将向包层区域进一步渗透,与一般的光子晶体光纤结果相同.

4 双折射特性

由于椭圆形结构的存在,基模的两个偏振模不再简并,形成模式双折射.通常,模式双折射可以表述为两个正交传播方向上有效折射率的差异,即

$$B = \frac{|\beta_x - \beta_y|}{\kappa_0} = |n_{\text{eff}}^x - n_{\text{eff}}^y| \quad (3)$$

B 值越大,双折射越高.下面将详细分析光纤的结构参量对其双折射特性的影响.首先,选取光纤结构参量 $U=2, d=0.8, d_f=0.3$,选取高折射率材料为二氧化硅 $n_1=1.46$,低折射率材料 $n_2=1.2$,并忽略材料色散.考察芯径 R 在不同的取值下模式双折射 B 随波长的变化情况.结果发现: B 的量级在 10^{-3} ,与高双折射光子晶体光纤在同一级别^[8,9],比传统保偏光纤高出一个量级,且随波长的增加而增大;而随着芯径 R 的减小,模式双折射亦将显著增加,如图 6.实际上,在其它参量固定的情况下,芯径 R 的变化即代表整个光纤结构的按比例缩放.因此,模式双折射随芯径 R 的变化趋势也可以由 Maxwell 方程的比例性质得到解释^[14].

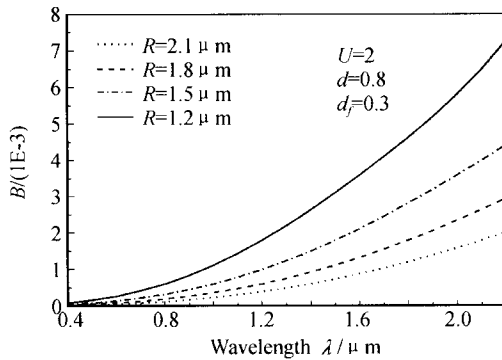


图 6 椭圆形高折射率芯 Bragg 光纤在不同的椭圆芯径 R 下对应的模式双折射

Fig. 6 Birefringence versus wavelength for elliptical high-index-core Bragg fiber at different core radius R

图 7(a)描述了模式双折射 B 随参量 d 的变化趋势,从图中可以看出,在其他参量固定的情况下, d 的变化即包层周期 Λ 的变化对模式双折射几乎没有影响.这种现象可以通过以下的简单原理得到解释:如果有一种具有两种折射率(n_1, n_2)分布的介质材料,其中 n_2 介质的几何填充因子为 f ,而且折射率的几何分布参量小于光的波长或与光的波长相当时,则可以将其等效为一个均匀的介质,等效折射率 n_e 可以表述为^[15]

$$n_e = f \cdot n_2 + (1-f) \cdot n_1 \quad (4)$$

可见,在填充因子固定的情况下,包层等效折射率并

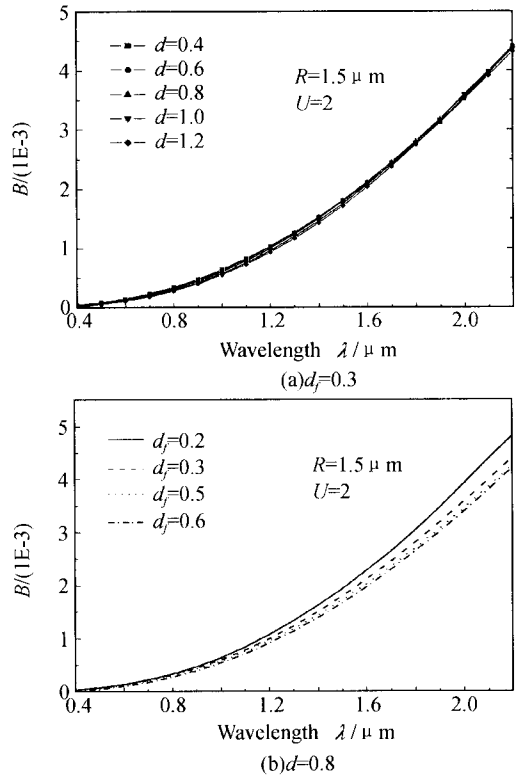


图 7 椭圆形高折射率芯 Bragg 光纤的模式双折射随结构参量的变化

Fig. 7 Birefringence versus wavelength for elliptical high-index-core Bragg fiber at different structural parameters

不随包层周期 Λ 而变化,因此,包层周期 Λ 的影响几乎可以忽略,这一结果也从另一个侧面验证了数值方法的准确度.从以上分析也可以看出,包层填充因子 d_f 将对包层等效折射率产生影响,并进而影响到模式双折射的大小,这一点可在图 7(b)中得到验证: d_f 的增加导致模式双折射降低,但幅度较小.原因在于,随着 d_f 的增加,将导致包层中的等效折射率降低,致使整个结构的有效折射率降低,进而引起模式双折射随之减小.

图 8 描述了椭圆率 U 以及低折射率材料的折

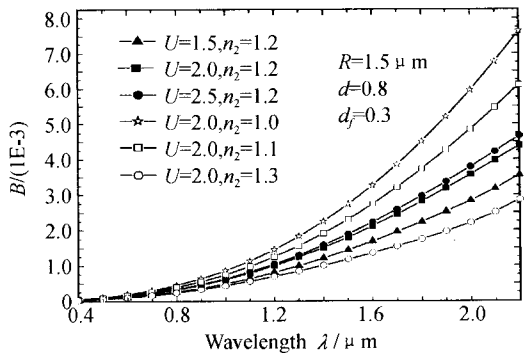


图 8 高折射率芯椭圆形 Bragg 光纤在不同的椭圆率 U 和 n_2 时对应的模式双折射

Fig. 8 Birefringence versus wavelength for elliptical high-index-core Bragg fiber at different ellipticity U and lower refractive index n_2

射率 n_2 对模式双折射的影响,显然,椭圆率的增大将导致更大的双折射,这是一个很自然的结论.同时,低折射率材料的折射率 n_2 越低,即两种材料的折射率比越高,模式双折射越大.

从各图中可以看出,在短波长区域,模式双折射满足标量近似,从而使双折射消失,这与传统椭圆芯光纤中的结果相同.而随着波长的增加,矢量项的影响将不可忽略,模式双折射效应也开始显露出来;此外电场能量已不像短波长那样有效地限制在芯区,有更多的能量扩展到包层区域,而由于包层也是椭圆形结构,存在较强的双折射,所以随着波长的增加,模式双折射也单调递增.

5 色散特性

光纤的色散可分为材料色散 D_m 和波导色散 D_w 两部分,其中二氧化硅的材料色散可由 Sellmeier 公式^[16]计算得到,波导色散可表述为

$$D_w = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2} \quad (5)$$

式中 c 为真空中的光速, λ 为波长, n_{eff} 为不考虑材料色散时的有效折射率. 考察结构参量为 $U=2$, $R=1.5 \mu\text{m}$, $d=0.8$, $d_f=0.3$ 的椭圆形高折射率芯 Bragg 光纤,分别计算其两个偏振模式的色散曲线如图 9. 从图中可以看出,在短波长区域,双折射效应很弱,两个偏振模式的色散曲线几乎重合,而随着波长的增加,双折射效应开始显现,两个偏振模式的色散曲线开始发生分离,对应同一个波长, x 偏振模的色散要比 y 偏振模的色散略大一些. 同时,与圆形高折射率芯 Bragg 光纤(对应 $U=1$)相比,色散性能并未发生大的改变.

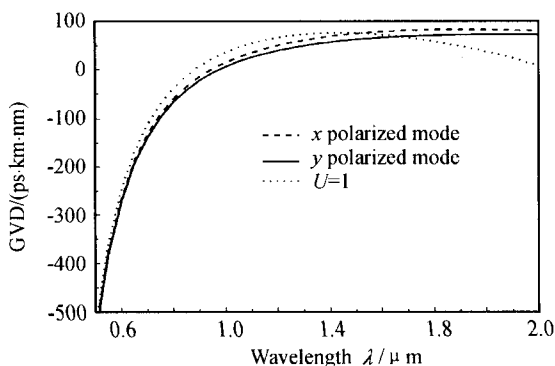


图 9 椭圆形高折射率芯 Bragg 光纤两个偏振模的色散曲线以及高折射率芯 Bragg 光纤($U=1$)的色散曲线

Fig. 9 Dispersion of the x and y polarized mode of elliptical high-index-core Bragg fiber and that of the high-index-core Bragg fiber

6 结论

应用全矢量有限元方法,分析了椭圆形高折射

率芯 Bragg 光纤的偏振和色散特性,详细讨论了光纤各种结构参量(椭圆率,芯径,包层周期,包层填充率,折射率比)对模式双折射的影响.由于材料之间存在较高的折射率比,以及包层高低折射率材料特殊的间插分布,使这种光纤呈现出与传统椭圆芯保偏光纤不同的特性.椭圆形高折射率芯 Bragg 光纤的制作可采取类似于高折射率芯 Bragg 光纤的工艺.结果表明:这种光纤的模式双折射在 10^{-3} 量级,且随着波长单调递增;包层周期 Λ 对模式双折射的影响几乎可以忽略,而包层填充率 d_f 的增加将导致模式双折射降低.此外,提高椭圆率或材料间的折射率比,可显著增强模式双折射.与圆形高折射率芯 Bragg 光纤相比,椭圆形高折射率芯 Bragg 光纤的色散性能并未发生很大的改变.以上研究结果将有助于设计一维微结构的高性能保偏光纤,为高速光纤通信器件拓展新的领域.

参考文献

- 1 Knight J C, Birks T A, Russell P St J, *et al.* All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding. *Optics Letters*, 1996, **21**(10): 1547~1549
- 2 Birks T A, Knight J C, Russell P St J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber. *Optics Letters*, 1997, **22**(8): 961~963
- 3 贾俊明,陈阳明,向阳,等.光子晶体光纤的纤芯等效半径分析. *光子学报*, 2005, **34**(1): 102~105
Jia J M, Chen Y M, Xiang Y, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1): 102~105
- 4 Yeh R P, Yariv A, Marom E. Theory of Bragg fiber. *J Opt Soc A m*, 1978, **68**(9): 1196~1201
- 5 Monsoriu J A, Silvestre E, Ferrando A, *et al.* High-index-core Bragg fibers: dispersion properties. *Opt Express*, 2003, **11**(12): 1400~1405
- 6 任国斌,王智,娄淑琴,等.高折射率芯 Bragg 光纤的色散特性研究. *物理学报*, 2004, **53**(6): 1862~1867
Ren G B, Wang Z, Lou S Q, *et al.* *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(6): 1862~1867
- 7 Feng X, Monro T M, Petropoulos P, *et al.* Single-mode high-index-core one-dimensional microstructured fiber with high nonlinearity. Proc OFC 2005: OThA5
- 8 Ortigosa-Blanch A, Knight J C, Wadsworth W J, *et al.* Highly birefringent photonic crystal fibers. *Optics Letters*, 2000, **25**(9): 1325~1327
- 9 娄淑琴,王智,任国斌,等.折射率导模高双折射光子晶体光纤. *光学学报*, 2004, **24**(10): 1310~1315
Lou S Q, Wang Z, Ren G B, *et al.* *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1310~1315
- 10 阮双琛,于永芹,程超,等. OPA 泵浦保偏光子晶体光纤产生超连续谱和非线性特性的研究. *光子学报*, 2004, **33**(7): 789~792

- Ruan S C, Yu Y Q, Cheng C, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7):789~792
- 11 Yu Yongqin, Ruan Shuangchen, Cheng Chao, *et al.* Supercontinuum generation at 1.6 μm region using a polarization-maintaining photonic crystal fiber. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11):1301~1303
- 12 Koshiha M, Tsuji Y. Curvilinear hybrid edge/nodal elements with triangular shape for guided-wave problems. *J Lightwave Technol*, 2000, **18**(5):737~743
- 13 Cucinotta A, Selleri S, Vincetti L, *et al.* Perturbation analysis of dispersion properties in photonic crystal fibers through the finite element method. *J Lightwave Technol*, 2002, **20**(8):1433~1442
- 14 Joannopoulos J D, Meade R D, Winn J N. *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*. Princeton New Jersey, USA, 1995. 3~21
- 15 Argyros A, Bassett I M, Eijkelenberg M A, *et al.* Ring structures in microstructured polymer optical fibres. *Opt Express*, 2001, **9**(13):813~820
- 16 Agrawal G. *Nonlinear Fiber Optics*. San Diego, CA: Academic Press, 1995. 7~11

Polarization and Dispersive Properties of Elliptical High-Index-Core Bragg Fibers

Liu Xiaoyi, Zhang Fangdi, Zhang Min, Yu Chongxiu, Zhang Lei, Lü Zhaobiao, Ye Peida
*Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies, Ministry of Education,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876*

Received date: 2005-07-06

Abstract In this paper, it is investigated the polarization and the dispersive properties of the elliptical high-index-core Bragg fibers via a powerful full-vector finite element method. The simulation results show that the modal birefringence of the elliptical high-index-core Bragg fibers is on the magnitude of 10^{-3} , about one order magnitude larger than that of conventional polarization maintaining fibers. The dependence of the modal birefringence on the fiber structural parameters has been fully investigated. The modal birefringence decreases with the filling ratio of the low-refractive-index material and changes little with the variation of the period of the cladding layers. Larger ellipticity or higher index-contrast will result in enhanced modal birefringence. These results will be helpful to the design of high performance one-dimensional microstructured polarization maintaining fibers.

Keywords Guided wave and fiber optics; Bragg fibers; Finite element; Polarization; Dispersion



Liu Xiaoyi was born in Jiangxi province, China, in February of 1981. He received his B. Sc. degree in optoelectronic technology from Nanjing University of Posts and Telecommunications in 2002. He is currently pursuing his Ph. D. degree in the Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications. His research interests include photonic crystal, optical waveguide, optical packet switching, *et al.*