

doi:10.3788/gzxb20154402.0206003

# 基于碲酸盐的新型单芯光子晶体光纤偏振分束器

曹晔, 赵舜, 童峥嵘

(天津理工大学 薄膜电子与通信器件重点实验室, 天津 300384)

**摘 要:**提出了一种基于 ZnTe 碲酸盐玻璃的单芯光子晶体光纤偏振分束器. 在外侧包层纤芯对称位置引入缺陷孔, 使缺陷模和纤芯基模发生耦合以实现光束分离. 采用全矢量有限元法对所提出的单芯光子晶体光纤偏振分束器的特性进行研究, 结果表明: 该分束器可以实现  $1.3\ \mu\text{m}$  和  $1.55\ \mu\text{m}$  波长光的分离, 并使光束沿 X 和 Y 偏振方向同时传播; 当光纤长度为 15 mm 时,  $1.3\ \mu\text{m}$  和  $1.55\ \mu\text{m}$  处的串扰值分别低至  $-45.1\ \text{dB}$  和  $-40.2\ \text{dB}$ , 小于  $-20\ \text{dB}$  的带宽分别为  $44.2\ \text{nm}$  和  $67.1\ \text{nm}$ ; 在传输波长  $1.3\ \mu\text{m}$  和  $1.55\ \mu\text{m}$  处的损耗值为  $0.063\ \text{dB}$  和  $0.048\ \text{dB}$ ; 偏振分束器在具有低串扰值的同时, 具有较低的限制损耗.

**关键词:** 光纤光学; 光子晶体光纤; 偏振分束器; 有限元法; 限制损耗; 串扰

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)02-0206003-5

## Single-core PCF Splitter Based on ZnTe Tellurite Glass

CAO Ye, ZHAO Shun, TONG Zheng-rong

(Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** A kind of single-core PCF splitter based on tellurite glass was proposed, defected holes were arranged in the outer cladding, they can bring about strong coupling effect between defected mode and the fundamental mode. FEM was used to analysis its characteristics. The simulation results show that this kind of splitter can split light in the bands of  $1.3$  and  $1.55\ \mu\text{m}$ , propagate along the orthogonal polarized directions. For a propagation distance of 15 mm, the  $-20\ \text{dB}$  bandwidth of crosstalk in  $1.3$  and  $1.55\ \mu\text{m}$  bands, reach  $44.2$  and  $67.1\ \text{nm}$ . The confinement loss at the wavelength are  $0.063\ \text{dB}$  and  $0.048\ \text{dB}$ . The proposed splitter has low crosstalk and low confinement loss.

**Key words:** Fiber optics; Photonic crystal fiber (PCF); Polarization splitter; Finite element method (FEM); Confinement Loss; Crosstalk

**OCIS Codes:** 060.2280; 060.2310; 060.2420; 060.5295

## 0 引言

光子晶体光纤 (Photonic Crystal Fiber, PCF) 是一种截面为周期性排列空气孔的光纤, 又被称为多孔光纤或微结构光纤. 自 1996 年问世以来<sup>[1]</sup>, 其独特的性质, 如: 无截止单模特性<sup>[2]</sup>、高双折射特性<sup>[3-5]</sup>、可控色散<sup>[6-7]</sup>、高非线性<sup>[8-9]</sup>等, 使得光子晶体光纤在光纤通信、非线性光学、光纤传感等领域具有广泛的应用前景, 引起人们的深入研究.

光纤偏振分束器 (Fiber Polarization Splitter) 能将

一束光分为两个处于正交偏振态的光束, 并沿不同方向传输, 在激光器制作和光纤滤波器实现等方面具有较大的应用前景. 近年来, 光子晶体光纤的出现为设计和制作新结构偏振分束器提供了新思路.

偏振分束器分两类: 1) 通过构造结构的不对称性, 引入高双折射, 利用正交方向耦合长度的不同来达到分束的目的, 所需光纤长度较短但消光比较低. 2011 年, 南开大学张伟刚课题组<sup>[10]</sup>设计了一种基于矩形晶格的双芯 PCF 偏振分束器, 在两个纤芯附近引入大小不同的空气孔, 使得  $1.3\ \mu\text{m}$  和  $1.55\ \mu\text{m}$  波长的模式分

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (No. 2013AA014200)、国家自然科学基金 (No. 61107052)、天津市自然科学基金 (No. 14JCYBJC16500) 和天津市高等学校科技发展基金 (2012) 资助

第一作者: 曹晔 (1976—), 男, 副教授, 硕士, 主要研究方向为光纤通信与光纤传感等. Email: cynever@163.com

通讯作者: 赵舜 (1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤通信. Email: zgodwill101@163.com

收稿日期: 2014-06-27; 录用日期: 2014-08-27

<http://www.photon.ac.cn>

别在两个纤芯中传播,通过对参量的优化,获得较低的串扰.2)利用三芯 PCF 的共振效应,使得偏振发生在一个方向,使光束分离.目前,碲酸盐玻璃由于其较高的非线性折射率以及较宽的传输光谱等特点,也逐渐被应用于偏振分束器的设计中.2012年,燕山大学李曙光课题组<sup>[11]</sup>设计了基于 ZnTe 碲酸盐玻璃的三芯 PCF 偏振分束器,并对基于碲酸盐玻璃的双芯 PCF 偏振分束器的特性进行了分析.2012年,南开大学张伟刚课题组<sup>[12]</sup>提出了一种正交单芯偏振分束器,在最内层包层引入两个较大的圆孔气孔,在外侧包层引入两个小圆空气孔来使其周围区域出现缺陷模,达到分束的目的,为设计新的单芯偏振分束器提供了思路.

本文采用 ZnTe 碲酸盐玻璃作为基底材料,设计了单芯光子晶体光纤偏振分束器.在包层外侧纤芯对称位置上各构造一个缺陷孔,使得光通过光纤传播时在缺陷孔周围形成缺陷模,并与纤芯模发生耦合,达到分束的目的.由于双芯偏振分束器两个输出纤芯之间距离小,因此与普通单模光纤熔接困难;本文所设计的偏振分束器的输出纤芯即为该光纤的纤芯,与单模光纤熔接起来更加方便.双芯软玻璃 PCF 偏振分束器的光纤长度需要根据设计的耦合长度做精确的切割,会对实验过程中的切割准确度造成困难,为解决此问题,本文所设计的偏振分束器的光纤采用了单芯结构,利于实际切割,不会因切割不精确而导致光束无法完全分开.

## 1 结构与理论分析

### 1.1 光纤结构

单芯 PCF 偏振分束器的结构见图 1,包层为正六边形排列的圆形空气孔,直径为  $d$ ,孔间距为  $\Lambda$ ,将包层最内侧的圆空气孔分别替换为两个相切的直径为  $d_1$  的圆孔.在较靠外的包层关于纤芯对称的位置引入两个很小的空气孔,直径分别为  $d_3, d_4$ .直径为  $d_2$  的圆空气孔起到了类似桥梁的作用,可以调节纤芯极化模与缺陷模的耦合程度.所设计的光子晶体光纤偏振分束

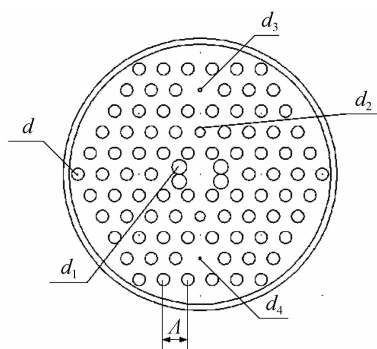


图 1 光纤横截面

Fig. 1 Cross section of the proposed PCF

器的光纤长度为  $L$ .

该单芯 PCF 偏振分束器采用的背景材料为 ZnTe 碲酸盐,其有效折射率可以通过三阶 Sellmeier 方程得到<sup>[13]</sup>

$$n(\lambda) = \sqrt{A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - C} + \frac{D\lambda^2}{\lambda^2 - E}} \quad (1)$$

式中,  $A=2.4843245, B=1.6174321,$

$C=0.053715551, D=2.4765135, E=225.$

### 1.2 理论分析

全矢量有限元法 (Full Vector Finite Element Method)<sup>[10]</sup>在分析较为复杂的结构(例如:孔径不完全一样、光纤结构不对称、存在椭圆空气孔)时更有优势,本文采用全矢量有限元法的同时,结合完美匹配层 (Perfect Matched Layer, PML)对该偏振分束器的传播特性和耦合特性进行分析.

通过合理设置空气孔  $d_2 - d_4$  的参量值,使得  $d_3$  和  $d_4$  周围缺陷模的有效折射率分别与纤芯基模的有效折射率在通信窗口  $1.3 \mu\text{m}$  和  $1.55 \mu\text{m}$  带宽处匹配.由于引入的缺陷孔与纤芯的间距达到  $7 \mu\text{m}$ ,相对于本光纤的直径,距离相当大,因而在  $1.3 \mu\text{m}$  和  $1.55 \mu\text{m}$  波段处串扰较低.

## 2 仿真结果与数据分析

选取结构参量为  $\Lambda = 2 \mu\text{m}, d = 1 \mu\text{m}, d_1 = 1.2 \mu\text{m}, d_2 = 0.8 \mu\text{m}, d_3 = 0.282 \mu\text{m}, d_4 = 0.189 \mu\text{m}, L = 15 \text{mm}.$

### 2.1 传播模式

图 2 为光在纤芯传播时的模场分布图,通过结构参量的合理设置,使得输入波长不处于通信波段  $1.3 \mu\text{m}$  和  $1.55 \mu\text{m}$  处时,光场能够被很好地限制在纤芯中传播,不会向包层扩散或与缺陷模发生耦合,限制损耗较小.图 3 为通过引入小空气孔  $d_3$  和  $d_4$  所制造的缺陷区域的模场分布图,由于其损耗大于包层孔的损耗,光不会在其中传播.

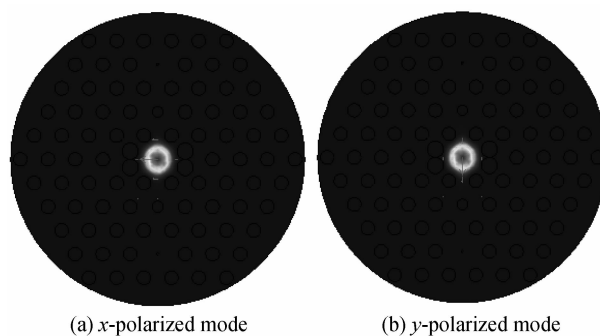


图 2 纤芯的模场分布

Fig. 2 Mode distribution of core region

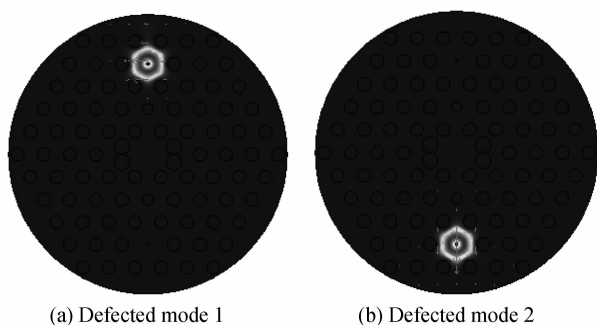


图3 缺陷模的模场分布

Fig. 3 Mode distribution of defected mode

## 2.2 有效折射率匹配情况

分别计算纤芯模和缺陷模的有效折射率,根据二

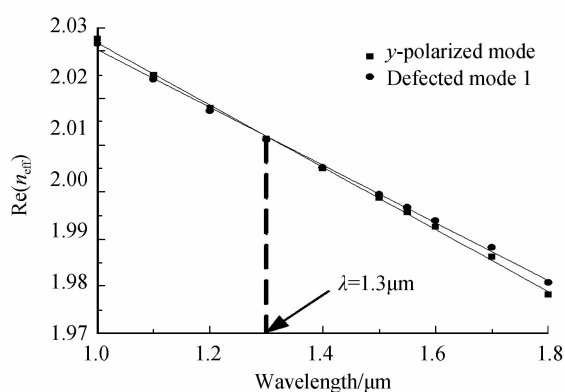
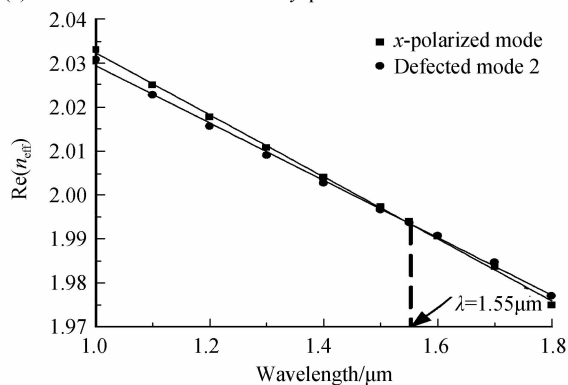
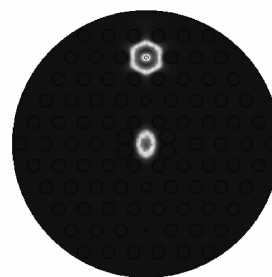
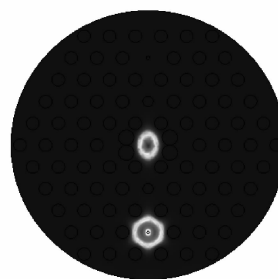
(a) Effective refractive indices of *y*-polarized mode and defected mode 1 (b) Coupling of defect 1 mode and *y*-polarized mode(c) Effective refractive indices of *x*-polarized mode and defected mode 2 (d) Coupling of defect 2 mode and *x*-polarized mode

图4 极化模与缺陷模的耦合

Fig. 4 Coupling of polarized modes and defected modes

## 2.3 限制损耗

限制损耗是衡量 PCF 特性的重要的性能参量,表示为<sup>[14]</sup>

$$CL = \frac{20}{\ln 10} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \times 10^6 \quad (2)$$

单芯 PCF 偏振分束器的原理为利用引入小圆空气孔所构造的缺陷,形成缺陷模,使其在 1.3 μm 和 1.55 μm 波长处分别与纤芯 *y* 和 *x* 极化模发生强烈耦合,当输入波长不等于 1.3 μm 或 1.55 μm 时,缺陷区域的损耗远大于包层其他区域的损耗,光被限制在纤芯中传播.

者的曲线相交情况,可以判断纤芯模和缺陷模的耦合情况.通过结构参数  $d_2 - d_4$  的调节,使得纤芯 *y* 极化模 *x* 极化模的有效折射率分别与缺陷模 1 和 2 的有效折射率曲线相交于 1.3 μm 和 1.55 μm 处.

从图 4(a)可以看出,当输入波长逐渐增大至 1.3 μm 时,*y* 极化模与缺陷模 1 的有效折射率曲线逐渐靠近,当波长为 1.3 μm 时,二者的折射率曲线相交,所对应的模场分布图如(b),可以看到,模场同时分布于纤芯和缺陷处,说明 *y* 极化模与缺陷模 1 发生了强烈的耦合.图 4(c)为纤芯的 *x* 极化模与缺陷模 2 的有效折射率匹配情况,当波长等于 1.55 μm 时,二者的有效折射率曲线相交,其对应的模场分布如图 4(d).

图 5 为限制损耗与传输波长的关系,在图 5(a)中,曲线原本处于较平缓的状态,从 1.15 μm 处开始迅速上升,在 1.3 μm 处达到峰值 0.063 dB,之后随着传输波长的增加,损耗值也逐渐降低,在 1.45 μm 处之后,保持一个较低的值.曲线形成的原因是由于随着波长的逐渐增大,*y* 极化模与缺陷模的耦合逐渐变强烈,在 1.3 μm 处耦合达到最大,对应的模场分布为图 4(b),纤芯 *y* 极化模与缺陷模 1 发生耦合,导致能量的损耗急剧变大,远高于光在 PCF 中正常传播时的限制损耗.而达到峰值后,耦合又逐渐减小,损耗降低.在图 5(b)中,当传输波长达到 1.46 μm 处时,损耗开始加速

上升,在  $1.55 \mu\text{m}$  处时达到最大值  $0.048 \text{ dB}$ ,随后逐渐降低. 峰值为纤芯  $x$  极化模与缺陷模 2 发生耦合时的损耗值,即图 4(d)中的模场分布.

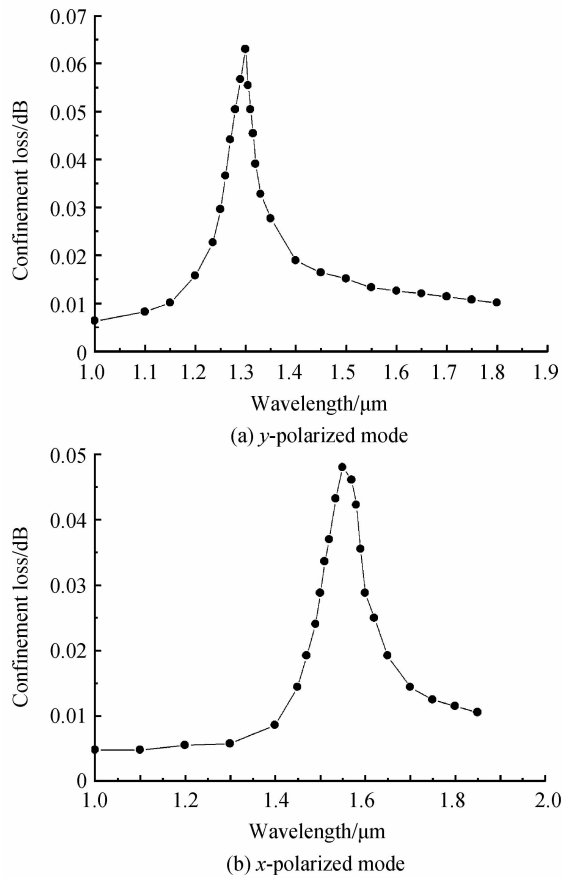


图 5  $y$  和  $x$  方向的限制损耗  
Fig. 5 Confinement loss of the splitter

## 2.4 串扰

对于本文所提出的单芯偏振分束器而言,串扰是最重要的性能参量. 对于相同的极化方向,  $1.3 \mu\text{m}$  处和  $1.55 \mu\text{m}$  处的串扰值,将直接影响到光纤的传输性能. 串扰由式(3)计算得到<sup>[15]</sup>.

$$\text{CT} = 10 \log_{10} [P(\lambda_u) / P(\lambda_d)] \quad (3)$$

$P(\lambda_u)$  为非期望波长的信号能量,  $P(\lambda_d)$  为期望波长的信号能量.

计算期望波长分别为  $1.3 \mu\text{m}$  和  $1.55 \mu\text{m}$  的串扰与传输波长的关系,如图 6. 图 6(a) 是  $\lambda_d = 1.55 \mu\text{m}$  时的串扰,偏振方向为  $y$  方向,图 6(b) 是  $\lambda_d = 1.3 \mu\text{m}$  时的串扰,偏振方向为  $x$  方向. 在实际应用中,仅仅考虑串扰低于  $-20 \text{ dB}$  的部分,来定义串扰的带宽. 图 6(a) 中,串扰在  $1.3 \mu\text{m}$  处最低,达到  $-45.1 \text{ dB}$ ,小于  $-20 \text{ dB}$  的带宽为  $44.2 \text{ nm}$ . 图 6(b) 中,串扰在  $1.55 \mu\text{m}$  处最低,达到  $-40.2 \text{ dB}$ ,小于  $-20 \text{ dB}$  的带宽为  $67.1 \text{ nm}$ . 对比两图可以发现,  $y$  方向的串扰更小,带宽较窄,  $x$  方向的串扰略大,但带宽较宽.

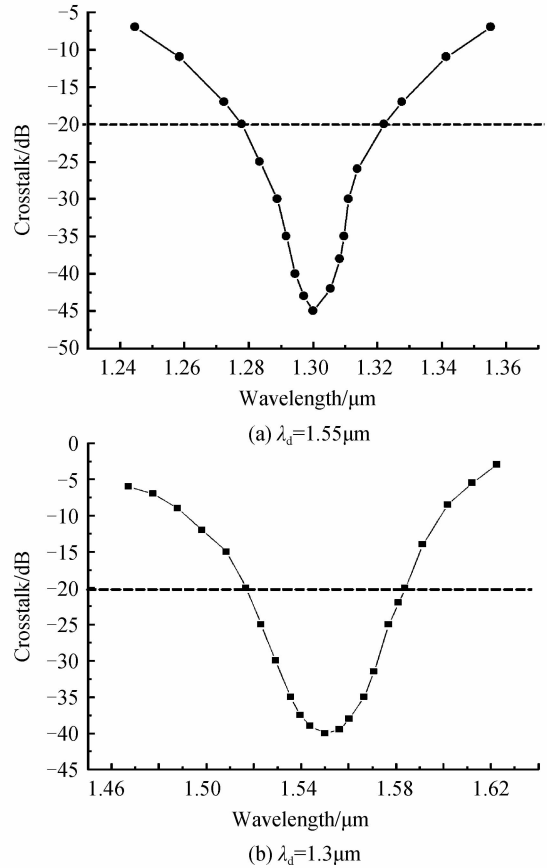


图 6 期望波长处的串扰  
Fig. 6 Crosstalk of the wanted wavelength

## 3 结论

本文提出了一种新型的基于  $\text{ZnTe}$  硝酸盐的光子晶体单芯偏振分束器,通过合理的设置结构参量,将波长为  $1.3 \mu\text{m}$  和  $1.55 \mu\text{m}$  的光沿正交方向分离. 当耦合最强烈时,限制损耗达到峰值,分别为  $0.063 \text{ dB}$  和  $0.048 \text{ dB}$ . 在期望波长为  $1.3 \mu\text{m}$  时,串扰最低值为  $-45.1 \text{ dB}$ ,低于  $-20 \text{ dB}$  的带宽为  $44.2 \text{ nm}$ ;期望波长为  $1.55 \mu\text{m}$  时,串扰最低为  $-40.2 \text{ dB}$ ,低于  $-20 \text{ dB}$  的带宽为  $67.1 \text{ nm}$ . 这使得偏振分束器不再拘泥于双芯或多芯光子晶体光纤,为设计新的偏振分束器提供了一种思路.

### 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 [J]. *Optics Letters*, 1996, **21**(19): 1547-1549.
- [2] RAZDOBREEV I, HAMZAOUI H E, BIGOT L, *et al.* Optical properties of Bismuth-doped silica core photonic crystal fiber [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(19): 19479-19484.
- [3] CAO Y, LI R M, TONG Z R. Highly birefringent photonic crystal fibers with flattened dispersion and low confinement loss [J]. *Optoelectronics Letters*, 2013, **9**(1): 45-48.
- [4] LI Wei, CHEN Hui, CHEN Ming. High symmetry of the mode field distribution photonic crystal fiber with high birefringence [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(2): 0205002.

- 黎薇,陈辉,陈明. 高对称性模场分布的高双折射光子晶体光纤[J]. 中国激光, 2012, **39**(2):0205002.
- [5] LI De-yue, ZHOU Gui-yao, XIA Chang-ming, *et al.* Theoretical investigation of photonic crystal fiber with highly nonlinear and birefringent [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(11): 1105003.  
李德月,周桂耀,夏长明,等. 高非线性高双折射光子晶体光纤特性的理论研究[J]. 中国激光, 2012, **39**(11):1105003.
- [6] NIELSEN M D, JACOBSEN C, MORTENSEN N A, *et al.* Low-loss photonic crystal fibers for transmission system and their dispersion properties[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(7): 1372-1376.
- [7] WANG Dan, ZHENG Yi. Numerical simulation and analysis of double cladding photonic crystal fiber with flattened dispersion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0806010.  
王丹,郑义. 双包层色散平坦光子晶体光纤的数值模拟与分析[J]. 光学学报, 2011, **31**(8): 0806010.
- [8] CAO Y, CUI D N, TONG Z R. Coupling characteristics of the high-polarization dual-core photonic crystal fiber with mixing air holes[J]. *Optoelectronics Letters*, 2013, **9**(2): 127-131.
- [9] WANG Y M, ZHANG X, REN X M, *et al.* Design and analysis of a dispersion flattened and highly nonlinear photonic crystal fiber with ultralow confinement loss [J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(3): 292-1297.
- [10] ZHANG S S, ZHANG W G, GENG P C, *et al.* Design of single-polarization wavelength splitter based on photonic crystal fiber[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(36): 6576-6582.
- [11] LIU S, LI S G, YIN G B, *et al.* A novel polarization splitter in ZnTe tellurite glass three-core photonic crystal fiber[J]. *Optics Communications*, 2012, **285**(6): 1097-1102.
- [12] GENG P C, ZHANG W G, GAO S C, *et al.* Orthogonal single-polarization single-core photonic crystal fiber for wavelength splitting [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(15): 1304-1306.
- [13] WANG Xiao-yan, LI Shu-guang, LIU Shuo, *et al.* Midinfrared As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> chalcogenide glass broadband normal dispersion photonic crystal fiber with high birefringence and high nonlinearity[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(6): 367-372.  
王晓琰,李曙光,刘硕,等. 中红外高双折射高非线性宽带正常色散 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 光子晶体光纤[J]. 物理学报, 2011, **60**(6): 367-372.
- [14] FUJISAWA T, KOSHIBA M. Finite element characterization of chromatic dispersion in nonlinear holey fibers[J]. *Optics Express*, 2003, **11**(13): 1481-1489.
- [15] SAITOH K, KOSHIBA M, Chromatic dispersion control in photonic crystal fibers: Application to ultra-flattened dispersion[J]. *Optics Express*, 2003, **11**(8): 843-852.