

# 基于填充式多孔光纤的太赫兹偏振分离器

李珊珊 常胜江 张 昊 刘伟伟

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

**摘要** 提出了一种基于填充式多孔光纤的宽带太赫兹偏振分离器。结构设计采用折射率反转匹配耦合方法,数值模拟采用有限元法,光纤基底选择聚合物材料 TOPAS。研究了普通三角晶格多孔光纤填充前和填充后的色散和双折射特性,发现通过隔行填充匹配材料,多孔光纤的模式双折射提高了一个数量级,由  $10^{-3}$  提高至  $10^{-2}$ 。利用两根纤芯微结构具有正交关系的填充式多孔光纤实现偏振分离功能。模拟结果表明,该偏振分离器在 0.8~2.5 THz 频率范围内都能够实现偏振分离。在 1 THz,分离长度为 0.77 cm; $x,y$  两偏振奇模和偶模的实际吸收损耗均小于 0.2 dB;消光比分别为 -12.73 dB 和 -13.70 dB。与以往双芯光子晶体光纤偏振分离器设计相比,该设计具有结构简单、易于实现、可调谐、宽带和低损耗等优点。

**关键词** 光纤光学;偏振分离器;太赫兹;填充;多孔光纤

**中图分类号** O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0723003

## Terahertz Polarization Splitter Based on Filled Porous Fiber

Li Shanshan Chang Shengjiang Zhang Hao Liu Weiwei

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract** A broadband terahertz polarization splitter based on filled porous fiber is proposed. The fiber structure is designed by using index converse matching coupling method. The numerical simulation is completed by employing full vector finite element method. The background material is TOPAS. The properties of dispersion and birefringence for before and after filling a common porous fiber are analyzed in detail. It can be found that after interlacing filling to the porous fiber, the mode birefringence of the fiber improves an order of magnitude that changes from  $10^{-3}$  to  $10^{-2}$ . Then we analyze the properties of terahertz polarization splitter based on filled porous fibers. The numerical simulation shows that the splitting operation can be realized in a broad frequency ranging from 0.8 THz to 2.5 THz. At 1 THz, the splitting length is only 0.77 cm, and the practical material absorption losses for  $x$ - and  $y$ - polarization are less than 0.20 dB, respectively. The extinction ratios for  $x$ - and  $y$ - polarization are -12.73 dB and -13.70 dB, respectively. Compared with other designs of dual-core-PCF based polarization splitter, porous fiber is simpler in design, easier in fabrication, and more feasible in experiment. Moreover, this structure has advantages of tunable, low loss and broadband.

**Key words** fiber optics; polarization splitter; terahertz; filled; porous fiber

**OCIS codes** 230.1360; 230.2285; 230.5440

## 1 引言

偏振分离器是一种能够把传输中的光信号分离成两个正交偏振态的基本光学元件,在光学系统中有着大量重要应用<sup>[1-10]</sup>。基于塑料光纤的太赫兹

偏振分离器以其低损耗、高耦合效率而引起了广泛关注。然而,以往的研究主要集中于双芯或三芯光子晶体光纤(PCF)的设计,通过对光纤横截面结构参数的精确调整,来实现偏振分离功能<sup>[1,2,5,9]</sup>。这

**收稿日期**: 2014-01-15; **收到修改稿日期**: 2014-03-11

**基金项目**: 国家 973 计划(2014CB339800)、国家 863 计划(2011AA010205, 2013AA014201)、国家自然科学基金(61171027, 11274182, 11004110)、天津市科技计划项目(13RCFGX01127)、天津市高等学校科技发展基金计划项目(20120706)

**作者简介**: 李珊珊(1980—),女,博士研究生,主要从事太赫兹光纤器件方面的研究。E-mail: 61140255@qq.com

**导师简介**: 常胜江(1965—),男,博士,教授,主要从事太赫兹功能器件方面的研究。E-mail: sjchang@nankai.edu.cn (通信联系人)(中国光学学会会员号: s042011575s)

种方法通常需要对光纤横截面结构做非常复杂的设计,且结构的尺寸要足够精确才能够实现特定波段光信号的偏振分离,而对光纤拉制的难度和实验的可行性考虑较少。

如何采用结构简单的光纤,通过后处理和可调谐的方式实现偏振分离功能对实际应用有重要意义。多孔光纤由 Hassani 等<sup>[11-13]</sup>于 2008 年同时提出,一经提出就引起了研究者的极大兴趣。这主要是因为它的多孔结构能够有效地降低基底材料的吸收损耗,从而实现太赫兹波的低损耗传输。同时,由于这种光纤是以空气为包层,基于全内反射原理而非带隙原理传导,因此对纤芯微结构的周期性和形变都没有严格要求,从而降低了拉制的难度。近年来,很多不同结构的多孔光纤被不断提出<sup>[14-18]</sup>,它在光纤传感和通讯领域有着很大的应用潜力。

本文应用普通的三角晶格多孔光纤实现偏振分离功能。与以往设计不同,本文采用隔行填充匹配材料的方式,通过调整填充材料的折射率来实现单偏振耦合,从而构建宽带的太赫兹偏振分离器。由于该方法采用对普通多孔光纤后填充的方法实现模式匹配,因此对光纤本身结构参数的精确性要求不高。本文结构参数的确定采用折射率反转匹配耦合(ICMC)法<sup>[19]</sup>;数值计算采用全矢量有限元(FEM)法;材料选择在太赫兹波段折射率相对恒定的聚合物材料 TOPAS<sup>[20-22]</sup>,并采用近期测定宽带实验数据<sup>[23]</sup>。对亚波长三角晶格多孔光纤填充前和填充后的色散以及双折射特性进行了研究,发现通过隔行填充匹配材料,多孔光纤的模式双折射提高了一个数量级,即由  $10^{-3}$  提高至  $10^{-2}$ ,从而实现了  $x, y$  两个偏振模式的分裂,为进一步构造偏振分离器提供了基础。应用 ICMC 法,利用两根纤芯填充不同的匹配材料,且微结构具有正交关系的多孔光纤实现偏振分离功能。通过有限元法进行数值模拟,发现该偏振分离器在 0.8~2.5 THz 频率范围内都能够实现偏振分离。在 1 THz,分离长度仅为 0.77 cm;  $x, y$  两偏振奇模和偶模的实际吸收损耗均小于 0.20 dB;两偏振的消光比分别为 -12.73 dB 和 -13.70 dB。与以往双芯光子晶体光纤偏振分离器设计相比,该设计具有结构简单、易于实现、可调谐、宽带和低损耗等优点。

## 2 原理方法简介

ICMC 法是一种构建宽带的单偏振耦合器的方法。它通过具有正交关系的结构来实现色散曲线的

反转和重合,从而允许一个偏振模式在很宽的工作频段发生耦合,而另一个偏振态的耦合被有效抑制<sup>[19]</sup>。分离长度等于匹配偏振模式的一个耦合长度。这样就在理论上为有效减小器件的尺寸提供了可能,从而保证了低传输损耗。

本文的数值模拟采用 FEM 法。FEM 是一种被广泛应用于物理建模和模拟的数值方法。它在光纤设计领域的有效性已经被大量研究证明<sup>[1-19]</sup>。网格划分采用自由剖分的三角网格,数量为 20000~40000。这个数量能够保证足够的精确性,且具有较高的计算效率。边界采用散射边界条件和完美匹配层。

## 3 器件设计和特性分析

为应用 ICMC 方法实现偏振分离,首先需要光纤具有高双折射特性,也就是说要实现  $x, y$  两个偏振模式的分裂。因此,采用对普通三角晶格多孔光纤隔行填充的方式实现高双折射。实现分离操作,需要两根多孔光纤纤芯的微结构具有正交关系。实际上,只需把另一根完全相同的多孔光纤旋转  $90^\circ$  即可,再通过调整匹配液的有效折射率来实现  $x$  或  $y$  偏振模式的匹配。

本文设计的隔行填充式多孔光纤偏振分离器结构如图 1 所示。多孔光纤的基底材料采用聚合物材料 TOPAS,这种材料在太赫兹波段具有相对恒定的折射率,且具有较低的损耗。光纤 A 的半径为  $R=125 \mu\text{m}$ ,纤芯空气孔的直径  $d=15 \mu\text{m}$ ,孔间距  $\Lambda=20 \mu\text{m}$ , 占空比  $d/\Lambda=0.75$ , 多孔度  $P=\frac{\pi r^2 \times 114}{\pi R^2} \approx 41.04\%$ ; 光纤 A 中填充材料的有效折射率  $n_A=1.53$ ;为实现两光纤  $y$  偏振模式的耦合,

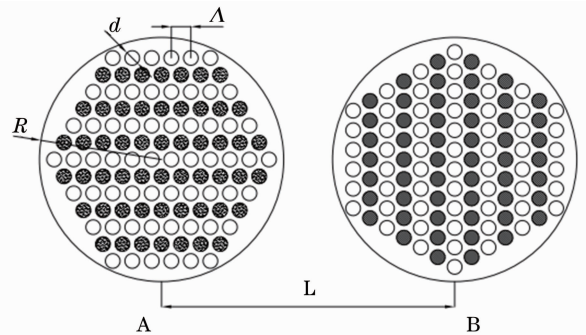


图 1 由光纤 A 和光纤 B 组成的基于隔行填充的多孔光纤偏振分离器横截面

Fig. 1 Cross section of the interlacing filled porous-fiber-based polarization splitter which is consisting of two porous fibers specified by A and B

调整光纤 B 填充材料的有效折射率  $n_B = 1.637$ ; 两光纤间距  $L = 300 \mu\text{m}$ 。

图 2 给出了多孔光纤 A 填充前和填充后的有效折射率和模式双折射曲线。可以看出, 多孔光纤 A 填充前模式双折射较小, 在  $10^{-3}$  量级; 采用隔行填充的方式, 把折射率为 1.53 的材料填充到纤芯的微空气中, 将有效破坏纤芯的对称性。填充后多孔光纤  $x, y$  两个偏振模式有效折射率的差值显著增大, 模式双折射比填充前提高一个数量级, 达到  $10^{-2}$  量级。这为下一步实现偏振分离提供了基础。

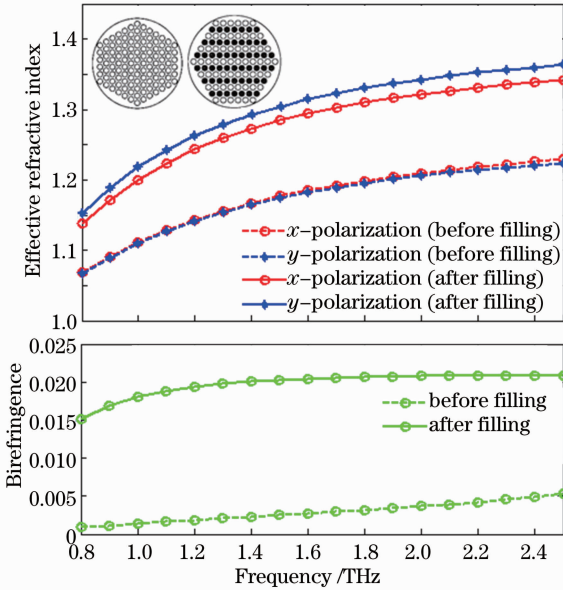


图 2 多孔光纤 A 填充前和填充后的有效折射率曲线和模式双折射

Fig. 2 Effective refractive index curves and modal birefringence curves of the porous fiber A in the cases of before and after filling

图 3 给出了填充后光纤 A 和光纤 B 的有效折射率曲线。从图中可以看出, 由于填充光纤 A 和 B 都是高双折射光纤, 纤芯微结构具有非对称性, 因此  $x$  偏振和  $y$  偏振是非简并的。对于光纤 A,  $n_{Ax} < n_{Ay}$ ; 而对于光纤 B, 由于它相当于光纤 A 的纤芯做了  $90^\circ$  的旋转, 所以  $n_x$  和  $n_y$  两条有效折射率曲线发生了反转, 也就是说, 在每一个工作频率, 有  $n_{Bx} > n_{By}$ 。由于光纤 A 和 B 的有效折射率很容易随着填充材料折射率的变化而变化, 因此可以通过调整光纤 B 填充材料的折射率从而实现两光纤  $y$  偏振模式的匹配。通过数值模拟, 发现当光纤 B 中填充材料的折射率  $n_B = 1.637$  时, 两根光纤的有效折射率满足:  $n_{Ax} < n_{Ay} = n_{By} < n_{Bx}$  (如图 5 所示)。这样, 在一个很宽的工作频率范围内,  $y$  偏振模将会在两个

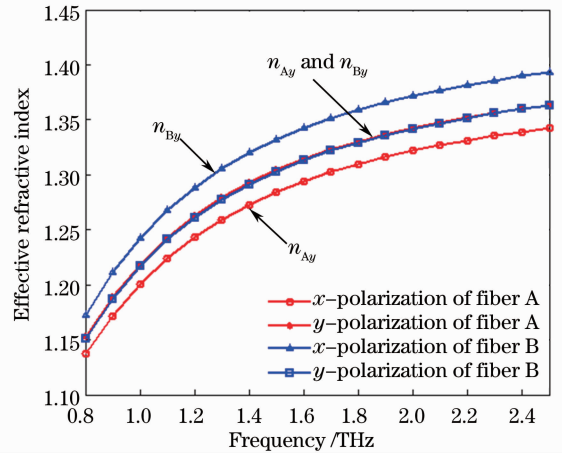


图 3 填充后光纤 A 和光纤 B 的有效折射率曲线  
Fig. 3 Effective refractive index curves of fibers A and B after filling

纤芯间强烈耦合, 同时, 由于两个纤芯  $x$  偏振有效折射率有较大的差值, 导致模式不匹配而不会发生耦合。

图 4 给出了工作频率为 1、1.5、2、2.5 THz 时,  $x, y$  偏振奇模和偶模稳态的模场分布。可以看到, 由于模式匹配, 在很宽的工作频率范围内,  $y$  偏振在两芯之间始终发生耦合 (稳态模场同时存在于两根光纤中); 而对于  $x$  偏振, 由于两个纤芯之间的有效折射率存在较大的差值, 因此模式不匹配, 始终不发生耦合 (稳态模场仅能同时存在于一根光纤)。

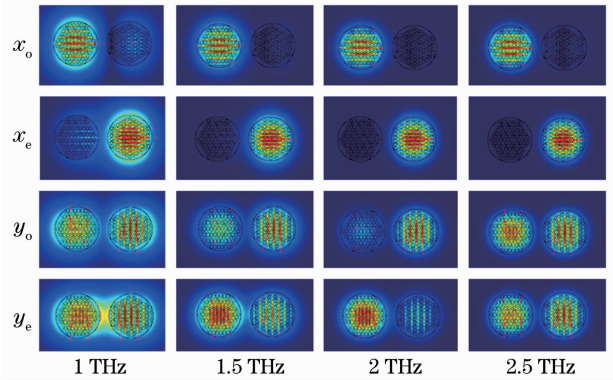


图 4  $x, y$  两偏振奇模和偶模在不同工作频率时稳态的模场分布

Fig. 4 Modal distributions in steady state of even and odd modes for  $x$ - and  $y$ -polarization modes at different frequencies

图 5 给出了器件的分离长度。分离长度可表示为<sup>[5,9]</sup>

$$L_c = \lambda / (2 |n_{ye} - n_{yo}|),$$

式中  $n_{ye}$  和  $n_{yo}$  分别是  $y$  偏振偶模和奇模的有效折射率,  $\lambda$  是入射波长。如图 5 所示, 随着频率的增大,

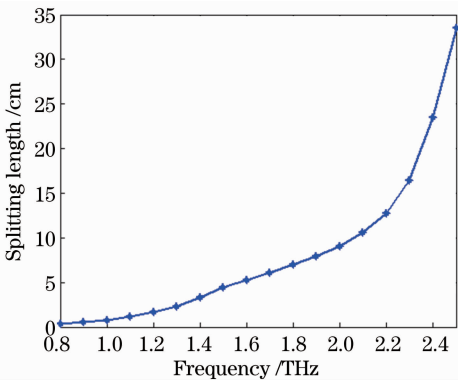


图 5 分离长度随频率的变化曲线

Fig. 5 Frequency versus splitting length

分离长度也增大。对于文献[19]提出的双芯 PCF 偏振分离器,在 0.4~0.7 THz,分离长度由 1.83 cm 变为 25 cm;而本文提出的填充式多孔光纤偏振分离器,在 0.8~2.5 THz,分离长度由 0.4 cm 变为 33.56 cm,工作频率更宽,在 2.2 THz 以下频率范围,分离长度更短,且变化更为平缓。在 1 THz,分离长度仅为 0.77 cm。

图 6 给出了填充式多孔光纤偏振分离器的损耗特性。其中,图 6(a)为器件的归一化吸收损耗;可以看出,  $x, y$  偏振奇模和偶模的归一化损耗都随着频率的增大而增大,但趋势越来越平缓。图 6(b)为

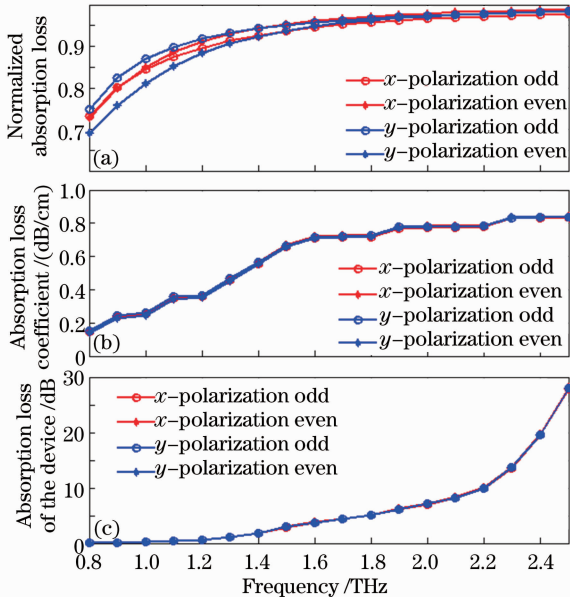


图 6 基于填充式多孔光纤的偏振分离器的损耗特性。

(a) 器件的归一化吸收损耗; (b) 器件的吸收损耗系数; (c) 器件的实际损耗

Fig. 6 Absorption loss characteristics of the interlacing filled porous-fiber-based polarization splitter. (a) Normalized absorption loss; (b) absorption loss coefficient; (c) absorption loss of the device

器件的吸收损耗系数;该参数可表示为<sup>[11]</sup>

$$\alpha_{\text{eff}} = \frac{\int_{A_{\text{background}}} n(r)\alpha_m(r) |E|^2 dA}{\text{Re} \left| \int_{A_{\infty}} E \times H^* dA \right|},$$

式中  $\alpha_m(r)$  是光纤基底材料的体吸收系数,该数据来自于文献[23]测得的 TOPAS 宽带实验数据;“ $A_{\text{background}}$ ”和“ $A_{\infty}$ ”分别表示光纤横截面区域和整个平面的面积;  $n(r)$  是基底材料的有效折射率。如图 6(b)所示,光纤 A 的有效材料吸收损耗系数随着频率的增大而不断增大。在 1 THz 处,对于  $x, y$  两个偏振,归一化损耗都小于 0.87,器件的吸收损耗系数都小于 0.27 dB/cm。图 6(c)给出了器件的实际损耗。该参数由公式  $M_{\text{loss}} = L_c \times \alpha_{\text{eff}}$  给出。其中  $L_c$  是器件的分离长度;  $\alpha_{\text{eff}}$  是前文所述的器件吸收损耗系数。器件的实际损耗随频率的增大而增大。在 1 THz 频率处,  $x, y$  两个偏振奇模和偶模的实际吸收损耗均小于 0.20 dB。在 0.8~1.5 THz 范围内,两偏振的实际吸收损耗都小于 3 dB。

图 7 给出了该偏振分离器的偏振消光比随频率的变化曲线。消光比通常被定义为检偏器的最小透过光强与最大透过光强之比。对应到偏振分离器,  $x$  偏振的消光比为在  $x$  偏振输出端口处  $y$  偏振与  $x$  偏振的光强之比;  $y$  偏振的消光比为  $y$  偏振输出端口处  $x$  偏振与  $y$  偏振的光强之比。从图 7 可以看出,两个偏振消光比的变化具有同样的趋势。随着频率的增大,消光比越来越好。这是因为随着频率的增大,光纤对能量的限制更好,因此偏振分离更彻底,在 1 THz,  $x, y$  两个偏振模的消光比分别为 -12.73 dB 和 -13.70 dB。

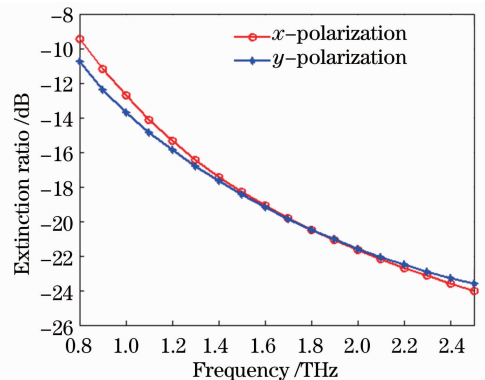


图 7  $x, y$  两偏振的消光比

Fig. 7 Extinction ratios for  $x$ - and  $y$ -polarization modes



## 4 结 论

提出了一种采用普通三角晶格多孔光纤,通过隔行填充破坏其对称性,再利用两根微结构具有正交关系的多孔光纤实现偏振分离的方法。由于该方法采用后填充的方式控制色散曲线,因此对已经成型的多孔光纤结构参数的精确性要求不高。和以往双芯光子晶体光纤偏振分离器相比,该设计具有宽带、低损耗、可调谐、易于实现等优点,对太赫兹波段相关器件的应用具有重要意义。

## 参 考 文 献

- 1 K Saitoh, Y Sato, M Koshiba. Coupling characteristics of dual-core photonic crystal fiber couplers [J]. *Opt Express*, 2003, 11(24): 3188–3195.
- 2 Cao Ye, Cui Danning, Tong Zhengrong, *et al.*. Dual-core photonic crystal fiber polarization splitter based on tellurite glass [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0605007.  
曹 晔, 崔丹宁, 童峥嵘, 等. 基于碲酸盐玻璃的新型双芯光子晶体光纤偏振分束器 [J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0605007.
- 3 Zhou Fei, Fei Hongming, Chen Zhihui, *et al.*. A high efficiency photonic crystal polarization beam splitter [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(6): 062304.  
周 飞, 费宏明, 陈智辉, 等. 一种高效光子晶体偏振光分束器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(6): 062304.
- 4 Y J Chang, W L Li. Directional-coupler-based polarization splitting in asymmetric metal/multi-insulator configuration for optical nanocircuitry [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24(6): 458–460.
- 5 Zhang Bin, Tan Xiaoling, Xue Ruiqiu, *et al.*. Polarization splitter based on double rectangular-core photonic crystal fibers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 745–749.  
张 斌, 谭晓玲, 薛睿秋, 等. 双矩形纤芯光子晶体光纤偏振分束器 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(3): 745–749.
- 6 Guo Chucai, Ye Weimin, Yuan Xiaodong, *et al.*. Research on subwavelength grating polarizing beam splitter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2690–2695.  
郭楚才, 叶卫民, 袁晓东, 等. 亚波长光栅偏振分束器的研究 [J]. *光学学报*, 2010, 30(9): 2690–2695.
- 7 Wang Jianwei, Dai Daoxin, Shi Yaocheng, *et al.*. Design of compact TE/TM polarization beam splitter based on silicon-on-insulator ridge nanowire directional coupler [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(5): 051301.  
王剑威, 戴道铤, 时尧成, 等. 基于绝缘体上硅脊型纳米线光波导方向耦合器的 TE/TM 偏振分束器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(5): 051301.
- 8 Zhang Jinlong, Liu Xu, Li Yiyu, *et al.*. Polarization beam splitters based on one-dimensional metal-dielectric structure [J].

- Acta Optica Sinica*, 2008, 28(9): 1788–1792.  
张锦龙, 刘 旭, 厉以宇, 等. 基于一维金属-介质周期结构的偏振分束 [J]. *光学学报*, 2008, 28(9): 1788–1792.
- 9 Lou Shuqin, Ren Guobin, Yan Fengping, *et al.*. Dispersion and polarization properties of near-rectangle core photonic crystal fibers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(3): 1229–1234.  
娄淑琴, 任国斌, 延凤平, 等. 类矩形芯光子晶体光纤的色散与偏振特性 [J]. *物理学报*, 2005, 54(3): 1229–1234.
  - 10 J Saulnier, C Ramus, F Huet, *et al.*. Optical polarization-diversity receiver integrated on titanium-diffused lithium niobate [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1991, 3(10): 926–928.
  - 11 A Hassani, A Dupuis, M Skorobogatiy. Low loss porous terahertz fibers containing multiple subwavelength holes [J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 92(7): 071101.
  - 12 A Hassani, A Dupuis, M Skorobogatiy. Porous polymer fibers for low-loss terahertz guiding [J]. *Opt Express*, 2008, 16(9): 6340–6351.
  - 13 S Atakaramians, S Afshar Vahid, B M Fischer, *et al.*. Porous fibers; a novel approach to low loss THz waveguides [J]. *Opt Express*, 2008, 16(12): 8845–8854.
  - 14 J Bai, J Li, H Zhang, *et al.*. A porous terahertz fiber with randomly distributed air holes [J]. *Appl Phys B*, 2011, 103(2): 381–386.
  - 15 N Chen, J Liang, L Ren. High-birefringence, low-loss porous fiber for single-mode terahertz-wave guidance [J]. *Appl Opt*, 2013, 52(21): 5297–5302.
  - 16 A Dupuis, J Allard, D Morris, *et al.*. Fabrication and THz loss measurements of porous subwavelength fibers using a directional coupler method [J]. *Opt Express*, 2009, 17(10): 8012–8028.
  - 17 A Dupuis, A Mazhorova, F Desevedavy, *et al.*. Propagation loss measurements of porous THz subwavelength fibers [C]. Rome: 2010 35th International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2010. 1-2.
  - 18 D Wang, L Wang. Design of TOPAS microstructured fiber with ultra-flattened chromatic dispersion and high birefringence [J]. *Opt Commun*, 2011, 284(24): 5568–5571.
  - 19 S Li, H Zhang, Y Hou, *et al.*. Terahertz polarization splitter based on orthogonal microstructure dual-core photonic crystal fiber [J]. *Appl Opt*, 2013, 52(14): 3305–3310.
  - 20 A Argyros. Microstructured polymer optical fibers [J]. *J Lightwave Technol*, 2009, 27(11): 1571–1579.
  - 21 G Emiliyanov, J B Jensen, O Bang, *et al.*. Localized biosensing with TOPAS microstructured polymer optical fiber [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(5): 460–462.
  - 22 K Nielsen, H K Rasmussen, A J Adam, *et al.*. Bendable, low-loss TOPAS fibers for the terahertz frequency range [J]. *Opt Express*, 2009, 17(10): 8592–8601.
  - 23 P D Cunningham, N N Valdes, F A Vallejo, *et al.*. Broadband terahertz characterization of the refractive index and absorption of some important polymeric and organic electro-optic materials [J]. *J Appl Phys*, 2011, 109(4): 043505.

栏目编辑: 王晓琰