

文章编号:1007-2780(2018)02-0116-07

液晶及其不同填充结构对光子晶体 光纤传输特性的影响

杜木青¹, 张伶俐², 刘永军^{1*}

(1. 哈尔滨工程大学 纤维集成光学教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学 物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 本文研究了各向异性材料对光子晶体光纤光传输特性的影响。由于靠近纤芯的空气孔对光子晶体光纤的影响最大, 所以本文分别对靠近纤芯的2个空气孔、3个空气孔和6个空气孔进行填充。对填充各向异性材料的光子晶体光纤的色散、限制损耗和有效模场面积进行了模拟, 并对其传输特性进行了详细的分析和讨论。同时进行了各向异性液晶材料填充光子晶体光纤的实验研究。结果表明在通讯波段, 填充液晶的光子晶体光纤与相应的有效折射率仿真结果基本一致。该填充光子晶体光纤有较低的限制损耗, 在1550 nm达到 10^{-9} 。较小的有效模场面积和明显的色散零点, 因而在通讯领域有较高的潜力和应用。

关键词: 光子晶体光纤; 各向异性; 液晶; 传输特性

中图分类号: O753+.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20183302.0116

Effect of liquid crystal and its different filling structure on the transmission properties of photonic crystal fiber

DU Mu-qing¹, ZHANG Ling-li², LIU Yong-jun^{1*}(1. Key Lab of In-fiber Integrated Optics, Ministry Education of China,
Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: This paper studies the effect of anisotropic materials on transmission characteristics for photonic crystal fiber. The influence of the air holes near the core on the photonic crystal fiber are most, so the air holes near the fiber core are respectively proceeding two holes, three holes and six holes filling. The dispersion, confinement loss and effective mode field area of photonic crystal fibers filled with anisotropic materials were simulated, and its transmission characteristics were analyzed and dis-

收稿日期: 2017-10-09; **修订日期:** 2017-11-11.

基金项目: 国家自然科学基金(No.U1531102, 61107059); 高等学校学科创新引智计划(No.B13015); 中国科学院天文光学技术重点实验室开放课题基金(No.CAS-KLAOT-KF201403)

Supported by Foundation of National Natural Science (No. U1531102, No. 61107059); Higher school subject innovation engineering plan(No.B13015); Open topic fund of the Key Laboratory of Astronomical Optics and optical technology of the Chinese Academy of Sciences(No.CAS-KLAOT-KF201403)

* 通信联系人, E-mail: liuyj@hrbeu.edu.cn

cussed in detail. At the same time, the experimental study of the filled photonic crystal fiber with anisotropic liquid crystal materials was carried out. The results show that, in the telecom band, the experimental results of the filled liquid crystal photonic crystal fiber are basically consistent with simulation results of corresponding effective refractive index. The filled photonic crystal fiber has lower confinement loss, it is 10^{-9} at 1 550 nm, smaller effective mode field area and obvious zero dispersion, so it has a higher potential and application in the fields of communication.

Key words: photonic crystal fiber; anisotropy; liquid crystal; transmission characteristics

1 引言

光子晶体光纤(photonic crystal fiber, PCF)通常由单一材料(如未经掺杂的石英或聚合物)构成,在光纤横截面的二维方向上有周期性分布微米量级的空气孔。因此它又叫做微结构光纤(micro-structured fiber)或多孔光纤(holey fiber)^[1-2]。光子晶体光纤具有无截止单模、低损耗以及可进行微结构设计改造等特性^[3],近年来备受关注^[4-5]。根据不同的传导机理可将 PCF 分为两类:一类是折射率传导型(Index-Guiding),即纤芯的折射率大于包层的有效折射率,与传统光纤的全内反射导光机理相似;另一类是光子带隙型(Photonic-Bandgap),即纤芯的折射率小于包层的有效折射率,但由于包层的折射率具有规则的周期排布,使得出现的光子带隙效应将频率处于带隙内的光束束缚在纤芯中,进而达到光传导的目的^[6]。但是 PCF 一旦被拉制完成,其传输特性就不再发生变化,这在很大程度上限制了其应用范围。因而有了将液体材料填入 PCF 包层的空气孔中^[7],来通过改变外部环境进而实现 PCF 对传输光谱的灵活控制^[8]。

在 2007 年,Limin Xiao 等人将高折射率材料填充的实心 PCF 的空气孔中来改变 PCF 的特性,并对其进行了仿真分析^[9]。在 2012 年,Francis H. Bennet 等人将液体填充到 PCF 纤芯周围的空气孔中,研究光在空气孔中的传输特性并对其进行了仿真研究^[10]。在 2014 年,Tingting Han 等人将一种高折射率且折射率可调的液体填入 PCF 的空气孔中,研究其折射率可调谐特性并对其进行了仿真分析^[11]。以上的研究填充材料的折射率都是各向同性,并没有对填充折射率各向异性材料的 PCF 进行较为详细的研究,而填充各向异性材料的 PCF 在双折射上有较大优势,并

有可能带来新的发展前景。本文对填充不同折射率各向异性 PCF 以及不同填充结构 PCF 的传输特性进行理论分析和研究,对其进行仿真分析,同时开展了液晶填充实验的研究。

2 理论分析

本文所使用光子晶体光纤仿真结构图如图 1(a)所示,是实心 PCF,其材质为二氧化硅(折射率 $n=1.4457$),包层直径为 $125\text{ }\mu\text{m}$,纤芯直径是 $7\text{ }\mu\text{m}$,空气孔直径为 $d=2.5\text{ }\mu\text{m}$ 且成正六边形周期排布,空气孔间距是 $\Lambda=5\text{ }\mu\text{m}$ 。图 1(b)中空气孔为蓝色的部分是填充折射率各向异性材料的地方,其余的空气孔中都充满了空气(折射率 $n=1$)。

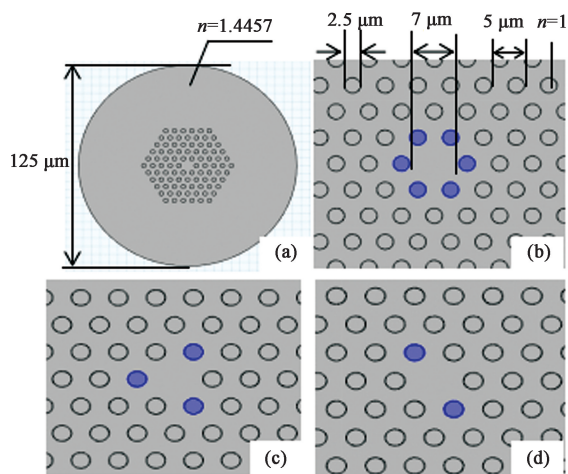


图 1 PCF 仿真结构图。(a)仿真结构图;(b)最内圈填充;(c)三孔填充;(d)两孔填充

Fig.1 Simulation diagram of the PCF;(a)simulation structure diagram;(b)the first lap filling;(c)three hole filling;(d)two hole filling

为了准确地分析研究该填充 PCF,我们使用全矢量有限元法(FEM)。PCF 的群速度色散 D_w 可以描述为^[12]:

$$D_w = \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2}, \quad (1)$$

其中: λ 是波长(单位是 μm), c 是真空中光速($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$), n_{eff} 是与波长相关的有效折射率, 在这里我们忽略材料色散。其限制损耗 L_c 可表示为^[13]:

$$L_c = \frac{2\pi}{\ln 10} \frac{I_m(n_{\text{eff}})}{\lambda} \times 10^6 \text{ (dB/m)}, \quad (2)$$

$I_m(n_{\text{eff}})$ 是有效折射率的虚部。它的有效模场面积 A_{eff} 的计算公式为^[14]:

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left(\iint_S |E_t|^2 dx dy \right)^2}{\iint_S |E_t|^4 dx dy} = \pi \omega^2, \quad (3)$$

其中: E_t 是横向电场矢量, S 表示为全光纤截面, ω 是高斯分布的模场半径。

3 仿真与讨论

利用 COMSOL Multiphysics 软件仿真, 对 PCF 几何结构进行设计、给定 PCF 包层和纤芯的材料参数(如图 1)、选择所需要的物理场并进行设置、对网格具体的划分参数进行设置并对其进行网格划分、设置其入射频率与模式数、对其折射率及对应的场分布模式进行求解、最后对输出结果进行后处理。本文所涉及到的波长范围是通讯波段, 波长范围为 $1.45 \sim 1.65 \mu\text{m}$ 。分别向 PCF 填充不同折射率各向异性的材料并改变其填充结构, 并通过色散、限制损耗以及有效模场面积来研究和分析该填充 PCF 的传输特性。由于填充材料是双折射材料即有两个折射率(如 $1.55 \sim 1.5$; $1.6 \sim 1.5$ 等), 且都是正性材料, 所以本文为了方便描述填充材料折射率都用双折射的非寻常光折射率(即大的折射率)来表示^[15], 寻常光折射率均取 1.5。

3.1 色散

图 2 给出了不同折射率填充 PCF 最内圈的色散曲线图。从该图中可以明显发现当对 PCF 填充不同折射率的材料时, 它的色散曲线变化将特别剧烈。波长在 $1.45 \sim 1.65 \mu\text{m}$ 范围内里, 填充液体折射率是 1.6 和 1.65 时, 其相应的填充 PCF 色散有色散零点。

图 3 是 3 种填充结构 PCF 且填充折射率为 1.65 时的色散曲线图, 从该图中可以发现填充内两孔和最内圈 PCF 的色散基本上是递减的, 在该

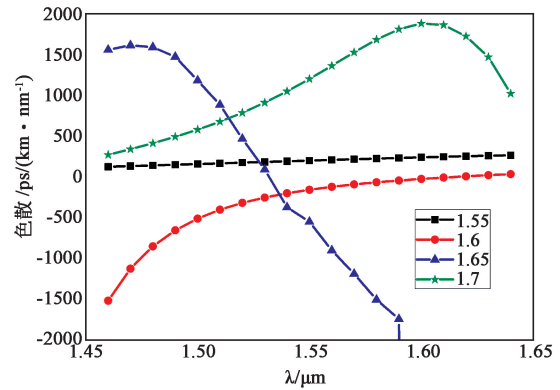


图 2 不同折射率材料填充 PCF 最内圈的色散曲线图

Fig.2 Dispersion curves of the PCF first lap filled with different refractive index materials

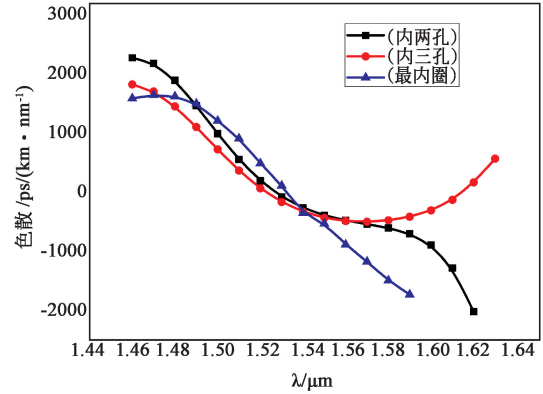


图 3 三种填充结构 PCF 的色散曲线图

Fig.3 Dispersion curves of three filling structure of the PCF

波段只有一个色散零点, 而填充内三孔 PCF 的色散曲线在该波段前半部分($1.45 \sim 1.56 \mu\text{m}$)与其它两种填充结构一样, 也是递减的, 但在后半波段上($1.57 \sim 1.65 \mu\text{m}$)发生明显的变化, 其色散开始上升并再次经过色散零点, 所以该填充结构有两个色散零点。

综上所述, 可以通过改变填充材料的折射率以及填充结构来改变 PCF 的色散零点的位置和数量, 这对产生和改进零色散波长的 PCF 有明显的促进作用, 在提高传输通讯质量方面有较大潜力。

3.2 限制损耗

从图 4 中可以发现填充材料折射率是 1.6 时, 其填充 PCF 的限制损耗最小, 填充材料折射率是 1.65 时, 其填充 PCF 的限制损耗最大。因

为填充材料折射率是 1.65 时有带隙现象,而限制损耗在带隙波段附近会比较大,所以填充材料折射率为 1.65 的 PCF 才会有这么大的限制损耗。

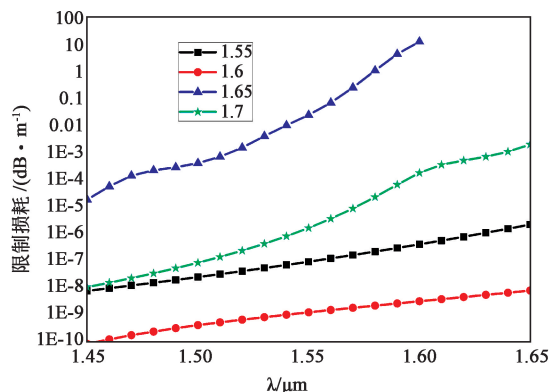


图4 不同折射率材料填充 PCF 最内圈的限制损耗曲线图

Fig.4 Limiting loss of the PCF first lap filled with different refractive index materials

从图 5 中可以发现填充材料折射率为 1.65 时 3 种填充结构的限制损耗规律都是随波长的增大而增加。填充最内圈 PCF 的限制损耗最大,而从内两孔填充与内三孔填充限制损耗曲线的对比中发现:在波段 1.45~1.52 μm 范围内,内两孔填充结构 PCF 的限制损耗要小于内三孔填充结构;在波段 1.53~1.65 μm 范围中,情况正好相反,内三孔填充结构 PCF 的限制损耗要小于内两孔填充结构。

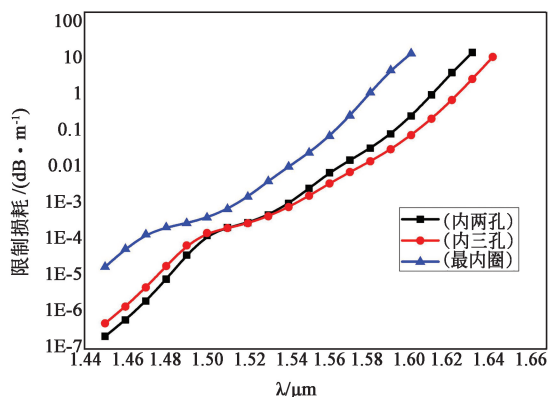


图5 三种填充结构 PCF 的限制损耗曲线图

Fig.5 Limiting loss curve of the three kinds of filling structure the PCF

总体看来,随填充材料折射率的增加,它的限制损耗也不断地增加。在这里可以通过改变填充

PCF 中填充材料的折射率以及改变 PCF 的填充结构,进而来调节填充 PCF 的限制损耗并选择出损耗最小的填充模式。

3.3 有效模场面积

有效模场面积是研究其模态特性的重要参数,它与非线性、约束损失、弯曲损耗、限制损耗和数值孔径有关。

图 6 显示了不同的填充 PCF 最内圈的归一化有效模场面积。折射率为 1.65 时,其有效模场面积随波长的增加而不断变大,表示该填充 PCF 束缚光的能力越差,入射光有可能不在纤芯传输。而其它三个填充 PCF 的有效模场面积就很好,尤其是填充折射率是 1.55 时,其相对应的填充 PCF 的有效模场面积数值很小且很稳定,具有较高的应用价值。

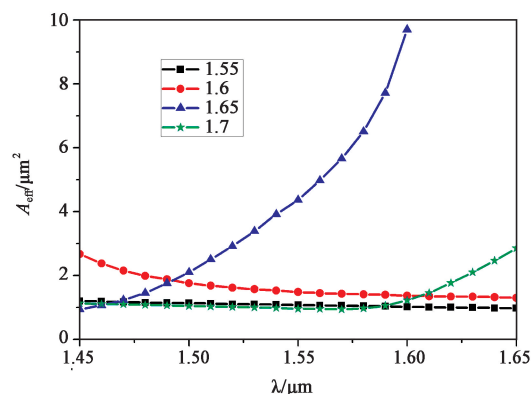


图6 不同折射率材料填充 PCF 最内圈的有效模场面积曲线图

Fig.6 Effective mode field area of the PCF first lap filled with different refractive index materials

从图 7 中可以看到,在填充折射率为 1.65 时,PCF 内两孔填充与内三孔填充结构的有效模场面积在波长 1.45~1.65 μm 范围内变化规律基本一样:在 1.45~1.50 μm 波段内它们的有效模场面积曲线将进行小幅度的上升;在 1.51~1.65 μm 范围内它们的有效模场面积曲线基本平缓,变化幅度不大。而最内圈填充 PCF 的情况就大不相同,其有效模场面积曲线在整个仿真波段内都一直上升。因为非线性与有效模场面积成反比,所以如果想使 PCF 具有较小的非线性,那就可以选择最内圈填充 PCF 结构,反之就可以选择其它两种填充结构。

图 8 为不同折射率材料填充最内圈 PCF 的

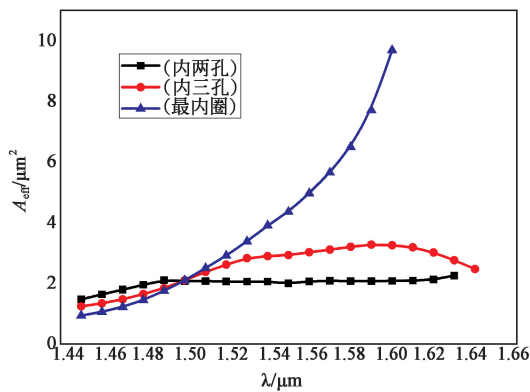


图 7 三种填充结构 PCF 的有效模场面积曲线图

Fig. 7 Effective mode field area curves of three filling structures of the PCF

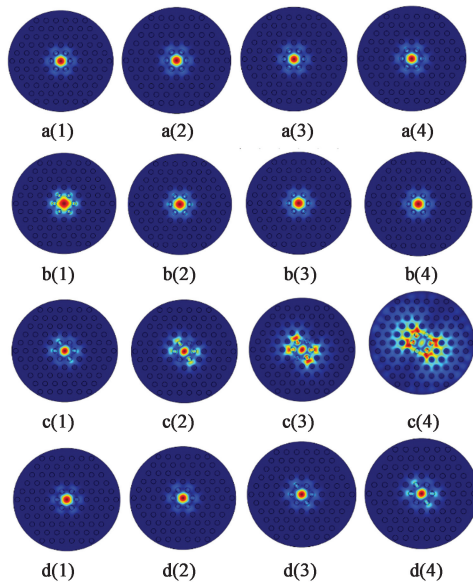


图 8 不同折射率材料填充 PCF 最内圈的模式强度分布图

Fig. 8 Mode intensity of the PCF inner ring filled with different refractive index materials

模式强度分布图,其中图 a(1、2、3、4)、b(1、2、3、4)、c(1、2、3、4)和 d(1、2、3、4)是分别在波长1 450 nm、1 500 nm、1 550 nm、1 600 nm 下填充材料折射率为 1.55、1.6、1.65 和 1.7 情况下的 PCF 模式强度分布图。从图 8 中可以看出,它们的归一化的有效模场面积在相对较高折射率填充下随波长增加而增加(如 1.65 和 1.7),在相对较低折射率填充下随波长增加而减小(如 1.6)。其有效模场面积越小,就代表它的输出光强就越集中在纤芯。从图 c(即折射率为 1.65)的模式强度分布可以发

现该填充 PCF 有明显的偏振特性,且随波长的增加,它的纤芯模式强度虽然不断减小,但其相应的偏振特性也不断地增强。从图 c 和 d 中可以发现,填充 PCF 的偏振特性都随波长的增加而增强。所以通过调节填充材料的折射率来改变填充 PCF 的有效模场面积,同时还可以控制其偏振特性。

4 实验

在这里做了液晶填充 PCF 的实验^[16-17],在显微镜下操作,利用固化胶,将光子晶体光纤的一端不需要填充液晶的孔封住,待胶固化后,将此端置入液晶中,利用毛细现象将液晶注入到需要的孔中,待其注入到合适的长度取出,将此端利用光纤切割刀切平。图 9 是最内圈填充折射率为 1.65 时

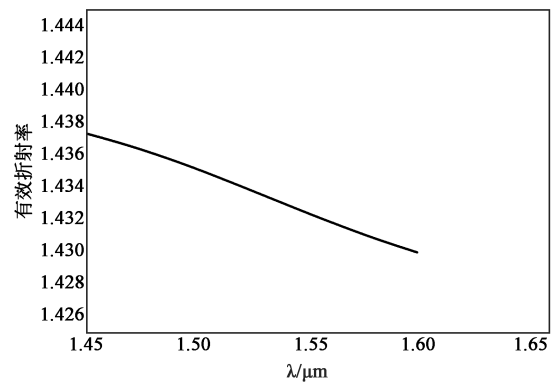


图 9 最内圈填充有效折射率为 1.65 的 PCF 有效折射率曲线图

Fig. 9 Effective refractive index curves of the PCF first lap filled with an effective refractive index of 1.65

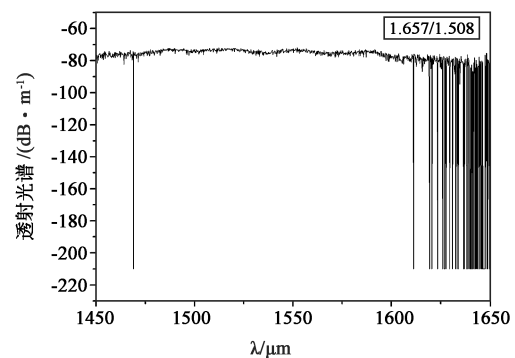


图 10 PLCF 透射光谱图

Fig. 10 Transmission spectra of the PLCF

的 PCF 有效折射率仿真曲线图,而图 10 是最内圈填充液晶的 PCF 实验透射光谱图。该实验中填充液晶的非寻常光与寻常光的折射率分别为 1.657 和 1.508,与图 9 中填充双折射率材料 PCF 的仿真模拟相对应。

从图 10 中可以看到,在该通讯波段下,其相应的液晶光子晶体光纤(PLCF)没有带隙现象,与上述相应填充 PCF 的有效折射率仿真结果基本符合,都是在波段为 1 450~1 600 nm 处连续导通无截止,而波段在 1 600~1 650 nm 则出现带隙。

5 结 论

本文对不同折射率双折射材料填充以及不同填充结构的 PCF 进行了详细的研究与分析。通过仿真模拟得到了填充 PCF 的色散、限制损耗和有效模场面积与波长关系。发现了填充双折射材料的 PCF 有许多性能优势和应用潜力,如可调节色散零点的位置与数量、获得较小的限制损耗和可控的有效模场面积,这在通讯传输、滤波器和传感器方面的有着广阔的应用前景。

参 考 文 献:

- [1] HSU J M, HORNG J S, HSU C L, *et al.* Fiber-optic Michelson interferometer with high sensitivity based on a liquid-filled photonic crystal fiber[J]. *Optics Communications*, 2014, 331: 348-352.
- [2] 马依拉木·木斯得克,姚建铨,陆颖,等.1.55 μm 高非线性高双折射光子晶体光纤[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(3): 588-596.
MAYILAMU M S D K, YAO J Q, LU Y, *et al.* Highly nonlinear and birefringent photonic crystal fiber at 1.55 μm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(3): 588-596. (in Chinese)
- [3] 王家璐,杜木清,张伶俐,等.基于不同液晶填充光子晶体光纤传输特性的研究[J]. *物理学报*, 2015, 64(12): 120702.
WANG J L, DU M Q, ZHANG L L, *et al.* Transmission characteristics of photonic crystal fibers based on filling different kinds of liquid crystals [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(12): 120702. (in Chinese)
- [4] QIAN W W, ZHAO C L, WANG Y P, *et al.* Partially liquid-filled hollow-core photonic crystal fiber polarizer [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3296-3298.
- [5] LIN W, SONG B B, MIAO Y P, *et al.* Liquid-filled photonic-crystal-fiber-based multimodal interferometer for simultaneous measurement of temperature and force [J]. *Applied Optic*, 2015, 54(6): 1309-1313.
- [6] CUBILLAS A M, UNTERKOFER S, EUSER T G, *et al.* Photonic crystal fibres for chemical sensing and photochemistry [J]. *Chemical Society Reviews*, 2013, 42(22): 8629-8648.
- [7] ZHAO Y, CAI L, LI X G. High sensitive modal interferometer for temperature and refractive index measurement [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(12): 1341-1344.
- [8] LIU C, WANG F M, LV J W, *et al.* A highly temperature-sensitive photonic crystal fiber based on surface plasmon resonance [J]. *Optics Communications*, 2016, 359: 378-382.
- [9] XIAO L M, JIN W, DEMOKAN M S. Photonic crystal fibers confining light by both index-guiding and bandgap-guiding: hybrid PCFs [J]. *Optics Express*, 2007, 15(24): 15637-15647.
- [10] BENNET F H, MOLINA M I. Nonlinear light localization around the core of a holey fiber [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2012, 29(8): 2161-2165.
- [11] HAN T T, LIUY G, WANG Z, *et al.* Control and design of fiber birefringence characteristics based on selective-filled hybrid photonic crystal fibers [J]. *Optics Express*, 2014, 22(12): 15002-15016.
- [12] SAITOH K, KOSHIBA M. Leakage loss and group velocity dispersion in air-core photonic bandgap fibers [J]. *Optics Express*, 2003, 11(23): 3100-3109.
- [13] YIN A H, XIONG L. Novel single-mode and polarization maintaining photonic crystal fiber[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 67: 148-154.
- [14] HUSSEIN R A, HAMEED M F O, OBAYYA S S A. Ultrahigh soliton pulse compression through liquid crystal photonic crystal fiber[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, 22(2): 4900908.
- [15] 张智勇,刘可庆,戴志群,等.高双折射液晶化合物的研究进展[J]. *液晶与显示*, 2014, 29(6): 873-880.

- ZHANGZ Y, LIU K Q, DAI Z Q, *et al.* Research progress of high birefringence liquid crystal compounds [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(6): 873-880. (in Chinese)
- [16] LIU X Q, LIU Y J, SUN W M, *et al.* The propagation characters of two-core selective filling photonic liquid crystal fibres [J]. *Liquid Crystals*, 2013, 40(2): 249-255.
- [17] LIU X Q, LIU Y J, SUN W M, *et al.* The propagation characters of selective-filled photonic crystal fibres [J]. *Liquid Crystals*, 2013, 40(5): 565-569.

作者简介:刘永军(1977—),男,辽宁本溪人,副教授,2006年毕业于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,获得博士学位,主要从事液晶光学器件应用研究。E-mail: liuyj@hrbeu.edu.cn

杜木青(1989—),男,辽宁丹东人,2014年进入哈尔滨工程大学理学院攻读硕士学位,主要从事液晶光子晶体光纤光传输特性研究。E-mail: 1416053095@qq.com