

doi: 10.3788/gzxb20164511.1106003

液晶填充碲酸盐光子晶体光纤偏振旋转器

刘兆伦, 安静, 韩颖, 毕卫红

(燕山大学 信息科学与工程学院 河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要:提出一种液晶填充碲酸盐玻璃的柚子型光子晶体光纤偏振旋转器, 利用全矢量有限元法, 对液晶填充碲酸盐玻璃的柚子型光子晶体光纤的偏振旋转特性进行数值模拟, 并分析了光纤结构参数、环境温度、工作波长等对光纤偏振旋转特性的影响. 研究表明: 此种偏振旋转器具有较高的旋转效率、较低的工作串扰和较短的旋转长度, 在工作波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 、偏振角度为 45° 时, 其值分别达到 99.947% 、 -32.84 dB 和 $197 \mu\text{m}$; 另外, 随着光纤薄壁厚度的增加, 旋转长度随之升高, 随着工作波长的变大, 旋转长度随之降低, 随着温度的增加, 旋转长度随之升高. 这种新型的光子晶体光纤为偏振旋转器的研发提供了参考.

关键词: 光纤光学; 光子晶体光纤; 偏振旋转器; 液晶; 碲酸盐玻璃

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)11-1106003-6

Liquid Crystal Infiltrated Tellurite Photonic Crystal Fiber Polarization Rotator

LIU Zhao-lun, AN Jing, HANG Ying, BI Wei-hong

(The Key Laboratory for Special Optical Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract: By employing the liquid crystal refractive index changes induced by an applied electric field, a polarization rotator was proposed based on liquid crystal infiltrated tellurite photonic crystal fiber. The mode field distribution of the fiber fundamental mode and the influence on polarization rotation of some parameters were simulated by using full vector finite element method. The results show that, this polarization rotator has a high work efficiency, low crosstalk and short conversion length. With the wavelength of $1.55 \mu\text{m}$ and the polarization angle of 45° , the values are 99.95% , -32.84 dB and $197 \mu\text{m}$, respectively. The conversion length of the fiber becomes longer, when the thin wall thickness of grapefruit photonic crystal fiber is increasing or the temperature is decreasing. While the working wavelength is increasing, the conversion length of the fiber becomes shorter. The liquid crystal infiltrated tellurite photonic crystal fiber has a good polarization rotation performance, offering a reference for the design of polarization rotator, which is useful for making compact and diverse polarization rotation devices.

Key words: Fiber optics; Photonic crystal fiber; Polarization rotator; Liquid crystal; Tellurite glass

OCIS Codes: 060.2310; 060.5295; 230.5298; 230.5440

0 引言

光子晶体光纤是近二十年来发展迅速的前沿研究热点之一, 在光纤激光器、宽带光源与波长变换器件、光纤传感材料等领域有潜在的应用价值和广阔的发展前景^[1-4]. 光纤偏振旋转器是将入射光束的偏振状态旋

转一定角度的光学器件, 由于其结构简单、易于实现, 且随着外部温度或电场的变化具有很高的可调性, 在光通信和光学测量等方面具有重要的研究意义.

碲酸盐玻璃由于具有较宽的红外透过范围、较低的声音能量和较高的折射率等特点而备受关注, 国内外一些光纤材料研究单位纷纷将碲酸盐玻璃为基质的

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61307110, 61405172, 61405173)资助

第一作者: 刘兆伦(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为特种光纤及其功能器件. Email: liuzhaolun@ysu.edu.cn

通讯作者: 毕卫红(1960-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤传感、光纤通信、光电检测. Email: whbi@ysu.edu.cn

收稿日期: 2016-06-08; 录用日期: 2016-08-31

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

光纤作为研究重点^[5-8]. 液晶的介电常数、折射率是各向异性, 对外界条件的变化很敏感, 例如温度、电场、磁场等. 利用液晶的光学性质将其填充到具有空气孔结构的光子晶体光纤中, 可以研制一些新型的可调谐光纤功能器件^[9-10]. HAMEED M 等^[11-13] 研究了基于液晶填充石英光子晶体光纤的偏振旋转器和液晶填充软玻璃 SF57 材料的光纤偏振旋转器, 这些液晶填充光子晶体光纤偏振旋转器具有较好的偏振旋转特性. 硝酸盐玻璃光子晶体光纤填充液晶可以实现高双折射、低限制损耗和高非线性系数^[14], 将其应用于光纤偏振旋转器可获得很好的偏振旋转特性^[15]. 由于硝酸盐玻璃折射率数值大, 与基于液晶填充石英光子晶体光纤和液晶填充软玻璃 SF57 材料光子晶体光纤的光纤偏振旋转器相比, 液晶填充硝酸盐玻璃光子晶体光纤偏振旋转器在模式约束方面能力强, 也可获得较高的旋转效率, 并便于调整旋转长度.

本文以硝酸盐玻璃作为基质材料, 采用柚子型光子晶体光纤结构, 通过液晶填充来实现光纤偏振旋转器功能. 柚子型结构光子晶体光纤相比于三角形空气孔阵列排列的光子晶体光纤可实现大包层空气孔占空比, 液晶填充效果越显著. 运用全矢量有限元法对液晶填充硝酸盐光子晶体光纤偏振旋转器的旋转效率、旋转长度、工作串扰进行数值模拟, 并分析其与温度、工作波长和光纤结构参数之间的关系. 该液晶填充硝酸盐柚子型光子晶体光纤偏振旋转器与已有的光纤偏振旋转器相比结构新颖简单, 偏振旋转器的功能容易实现.

1 光纤的结构与理论研究

图 1 为本文设计的柚子型光子晶体光纤偏振旋转器的截面图, 光子晶体光纤的包层结构为 6 个大的柚子形空气孔, 为提高 x 和 y 两偏振方向的不对称性, 在

空气孔中填充了各向异性的液晶材料, 致使两偏振方向的旋转长度出现明显的差异, 这样可以使两混合模式较容易旋转, 达到偏振旋转的效果. 在该结构中, 包层空气孔线度为 d_1 , 外壁厚度为 d_2 , 空气孔间的薄壁厚度为 d_3 .

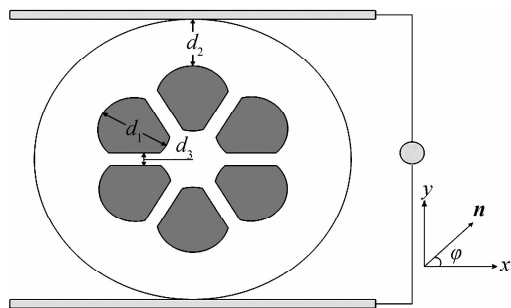


图 1 柚子型光子晶体光纤偏振旋转器截面图

Fig. 1 The cross section of the grapefruit-type photonic crystal fiber

基质材料硝酸盐玻璃的有效折射率由 Sellmeier 公式^[16] 求出, 即

$$n_i^2 = 1 + \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - L_i^2} \quad (1)$$

式中 A_i, L_i 为常数, 取值分别为 $A_1 = 1.67189, A_2 = 1.34862, A_3 = 0.62186, L_1^2 = 0.00046656, L_2^2 = 0.057460884, L_3^2 = 46.72542736$.

为获得偏振旋转特性, 在柚子型硝酸盐光子晶体光纤空气孔中填充 E7 液晶材料. 由于 E7 液晶材料具有各向异性, 在不同方位的介电常数是不同的, 从而不同方位的折射率也不同, 即包括寻常光 n_o 和非寻常光 n_e , 其折射率分别由 Cauchy 公式^[17] 求出, 即

$$n_e = A_e + (B_e/\lambda^2) + (C_e/\lambda^4) \quad (2)$$

$$n_o = A_o + (B_o/\lambda^2) + (C_o/\lambda^4) \quad (3)$$

式中各个温度下对应的参数见表 1.

表 1 各个温度下的参数

Table 1 Fitting parameters under different temperatures

Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	n_e			n_o		
	A_e	$B_e/\mu\text{m}^2$	$C_e/\mu\text{m}^4$	A_o	$B_o/\mu\text{m}^2$	$C_o/\mu\text{m}^4$
15	1.705 5	0.008 7	0.002 8	1.500 6	0.006 5	0.000 4
20	1.699 3	0.008 5	0.002 7	1.499 8	0.006 7	0.000 4
25	1.693 3	0.007 8	0.002 8	1.499 4	0.007 0	0.000 4
30	1.684 6	0.009 0	0.002 5	1.498 9	0.007 2	0.000 4
35	1.676 1	0.009 1	0.002 5	1.498 7	0.007 1	0.000 4
40	1.666 2	0.009 1	0.002 4	1.503 3	0.004 9	0.000 8
45	1.656 5	0.008 3	0.002 4	1.501 8	0.006 8	0.000 6
50	1.639 5	0.009 5	0.002 0	1.506 2	0.006 3	0.000 6

图 2 为不同温度下折射率随波长的变化. 从图中可以看出, 不同温度下, 液晶材料 E7 的非寻常光折射率 n_e 高于寻常光折射率 n_o , 且非寻常光折射率 n_e 随温

度升高有所下降. 由图可知硝酸盐玻璃折射率高于液晶折射率, 光纤的导光机制为折射率引导型.

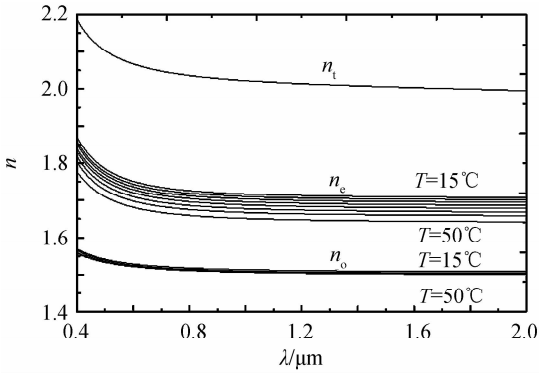


图2 在不同温度下折射率与波长之间的关系

Fig. 2 Relationship between the refractive index and wavelength under different temperatures

当对图1光纤端面图施加一个可调电场时,液晶分子取向将位于 x - y 平面内,假设与 x 轴成一个角度 φ ,有 $n^2 = \epsilon/\epsilon_0$,其中 ϵ_0 是真空中电容率,用 $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ 代入可得^[18]

$$\mathbf{n}_r = \begin{bmatrix} n_{xx} & n_{xy} & 0 \\ n_{yx} & n_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中

$$\begin{cases} n_{xx}(r) = [n_e^2(r) \cos^2 \varphi + n_o^2(r) \sin^2 \varphi]^{1/2} \\ n_{xy}(r) = n_{yx}(r) = [n_e^2(r) \cos \varphi \sin \varphi - n_o^2(r) \cos \varphi \sin \varphi]^{1/2} \\ n_{yy}(r) = [n_o^2(r) \cos^2 \varphi + n_e^2(r) \sin^2 \varphi]^{1/2} \\ n_{zz}(r) = n_o(r) \end{cases} \quad (5)$$

φ 为液晶受外部电场影响的偏振旋转角度.在不同偏振旋转角度下均存在两个束缚模式,它们的有效折射率分别为 n_{TE} 、 n_{TM} ,其值可通过求解传播常数得出.

采用全矢量有限元法对图1所示的液晶填充硝酸盐玻璃柚子型光子晶体光纤进行模拟,用相对介电常数 ϵ_r 和磁导率 μ_r 的复张量表示介质,有^[19]

$$\nabla \times (\overline{\epsilon_r} \nabla \times \overline{h}) - k_0^2 \overline{\mu_r} \overline{h} = 0 \quad (6)$$

式中, \overline{h} 为磁场, k_0 为空间波矢量,而 $k_0 = 2\pi/\lambda$, λ 是波长, $\overline{h} = \overline{H} e^{-\gamma z}$,其中 \overline{H} 是横截面的场分量, $\gamma = \alpha + jk_0 n_{\text{eff}}$, α 为衰减常数, n_{eff} 是有效折射率.将式(6)转换成代数问题,即

$$\left([\mathbf{A}] - \left(\frac{\gamma}{k_0} \right)^2 [\mathbf{B}] \right) \{H\} = 0 \quad (7)$$

式中 $\{H\}$ 是模离散磁场矢量分布,通过高阶代数求解器获得一个有效解,矩阵 $[\mathbf{A}]$ 、 $[\mathbf{B}]$ 采用稀疏对称矩阵.

2 数值结果与分析

图3为当工作波长为 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 时,柚子型硝酸盐光子晶体光纤的结构参数 $d_1 = 6.4 \mu\text{m}$ 、 $d_2 = 4 \mu\text{m}$,空气孔薄壁厚度分别为 $d_3 = 1 \mu\text{m}$ 与 $d_3 = 0.8 \mu\text{m}$ 时基模模场分布.从图中可以看出,光纤具有单模特性,模

场能量基本被完全约束在纤芯中,且空气孔薄壁厚度较小时模场能量受约束较好.硝酸盐玻璃光子晶体光纤光纤的导光机制为折射率引导型,故具有较强的模式约束能力,模式能量大部分被集中在光纤纤芯,由于硝酸盐玻璃基质材料的折射率高于包层液晶折射率的缘故.

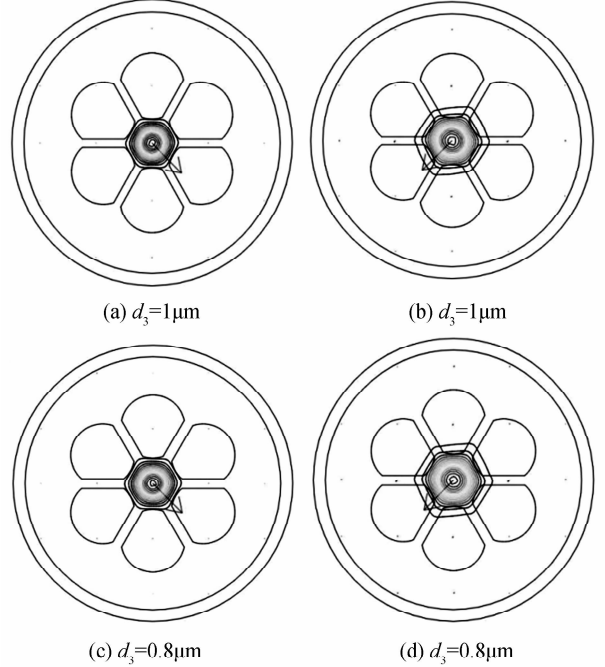


图3 基模模场分布

Fig. 3 Field distribution of the fundamental mode

2.1 模式混合值 H 与旋转长度 L_π

模式混合值 H 与旋转长度 L_π 是衡量偏振旋转器偏振旋转特性的重要参数,模式混合值它会受到外部电场旋转角变化的影响,当为 TE 模时, $H = h_y/h_x$, 当为 TM 模时, $H = h_x/h_y$, 其中 h_x 与 h_y 是模场分量振幅的最大值.旋转长度是指偏振旋转器达到最大旋转效率时的光纤长度,它与传输光波长、两模式的有效折射率差有关,其表达式为

$$L_\pi = \frac{\lambda}{2(n_{TE} - n_{TM})} \quad (8)$$

式中 λ 为工作波长.由式(8)可得出在不同偏振旋转角度下的光纤的旋转长度.图4为不同偏振旋转角度下的模式混合度与旋转长度.从图中可以看出,当偏振旋转角 φ 从 0° 增大到 45° 时,模式混合值随之增大,在 $\varphi = 45^\circ$ 时达到最大值 0.99947,当 φ 继续增大时,模式混合值从最大值降低.当 $\varphi = 45^\circ$ 时,TE 模的模式混合值与 TM 模的模式混合值近似相等且接近于 1,偏振旋转器效果达到最好. φ 的变化对旋转长度也有影响,当 φ 从 0° 增大到 45° 时,旋转长度随之减小;当 φ 从 45° 增大到 90° 时,旋转长度随之升高.光纤结构虽不具备圆对称结构,但在未填充液晶时,光纤模式应为近似简并,其双折射可以忽略.故填充液晶后,当两个偏振旋

转角为互余角时,其模式混合值和旋转长度近似相等,当偏振旋转角为 45° 时模式混合值和两个偏振模式的有效折射率差最大,而旋转长度最小.

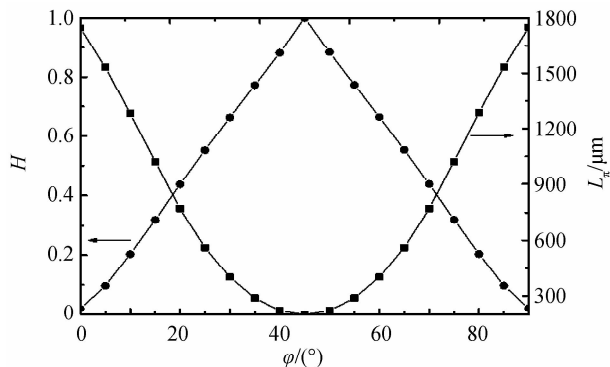


图4 模式混合值 H 与旋转长度 L_π 随角度 φ 的变化
Fig. 4 Relationship between H and φ ; Relationship between L_π and φ

2.2 旋转效率 P_x

旋转效率是衡量偏振旋转器工作的重要参数,其值大小表明 TE 模到 TM 模旋转时 TM 模比例高低,与传输距离、旋转长度、模式混合值均有关.图 5 为不同偏振旋转角度下传输距离对旋转效率的影响.从图中可以看出在一定的偏振旋转角度下,旋转效率呈现周期性变化,开始时随着传输距离的增加,旋转效率随之增大,当达到该偏振角度下的旋转长度时,旋转效率达到最大值,随着传输距离继续增大,旋转效率随之变小,在两倍旋转长度时达到最小值后而复始.不同的偏振角度下旋转效率的最大值也不同,由于旋转效率与旋转长度有关,各个角度下达到最大旋转效率时的传输长度有所不同,使得旋转效率最高点发生偏移.从图 5 还可以看出,当 $\varphi=0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ 时,旋转效率 P_x 的值分别与 $\varphi=90^\circ, 80^\circ, 70^\circ, 60^\circ, 50^\circ$ 时的值完全相等,这一点与各个角度下模式混合值 H 相同,这种现象也是由于液晶折射率的性质决定的.

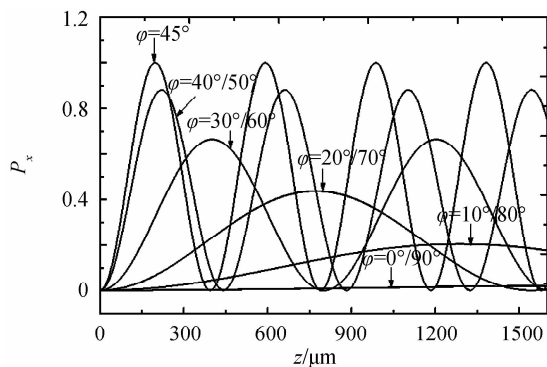


图5 当角度 φ 取不同值时旋转效率 P_x 随传输距离 z 的变化
Fig. 5 Relationship between P_x and z under different values of φ

2.3 工作串扰 CT

图 6 为不同偏振旋转角度下的串扰值.从图中可以看出,当 φ 从 0° 增大到 45° 时,串扰值随着角度的增加而随之下降,其中从 40° 到 45° ,串扰值急剧下降,然后当 φ 从 45° 增大到 90° 时,串扰值随着角度的增加而随之升高,其中从 45° 到 50° ,串扰值急剧上升.所以当 $\varphi=45^\circ$ 时,串扰值达到最低值.在偏振旋转角度为 45° 时,模式混合值最大,故此时串扰值最小,且在此时偏振旋转角度改变时,串扰值变化明显.

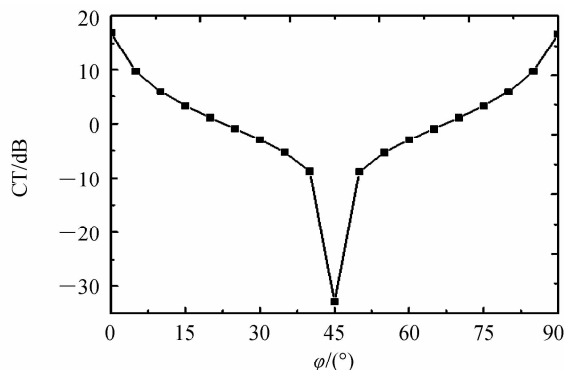


图6 工作串扰 CT 随角度 φ 的变化
Fig. 6 Relationship between CT and φ

2.4 改变结构参数

图 7 为改变空气孔薄壁厚度下,传输距离对旋转效率的影响.其中 $d_3=1 \mu\text{m}, 0.8 \mu\text{m}, 0.6 \mu\text{m}$,此时保持 $\varphi=45^\circ, \lambda=1.55 \mu\text{m}, T=25^\circ\text{C}$.从图中可以看出,在不同薄壁厚度下,随着传输距离的增加,旋转效率呈现相同的变化趋势,最大值近似相等,但随着柚子型光子晶体光纤薄壁厚度的降低,旋转长度随之变小.因为当光纤薄壁值越小时,空气孔越密集,对光能量的束缚能力越强,液晶的特性进一步体现,两个偏振模式的有效折射率差会有所变大,从而使得该厚度下的旋转长度降低.

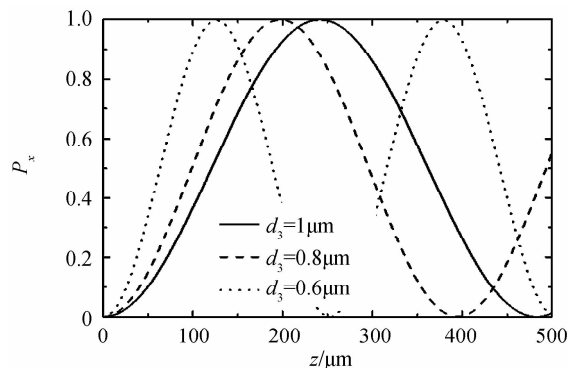


图7 当薄壁厚度 d_3 取不同值时旋转效率 P_x 随传输距离 z 的变化
Fig. 7 Relationship between P_x and z under different values of d_3

图 8(a)为当 $\varphi=45^\circ, d_3=0.8 \mu\text{m}, T=25^\circ\text{C}$ 时, 旋转长度 L_π 随波长 λ 的变化情况. 从图中可以看出随着波长的增加, 旋转长度 L_π 随之降低. 图 8(b) 为当 $\varphi=45^\circ, d_3=0.8 \mu\text{m}, \lambda=1.55 \mu\text{m}$ 时, 传输距离分别取 $z=197 \mu\text{m}$ 和 $z=L_\pi$, 工作串扰 CT 与旋转效率 P_x 随波长 λ 的变化情况. 从图中可以看出随着波长的变化, 在 $z=L_\pi$ 时, 各个波长下的旋转效率 P_x 近似相等, 而串扰 CT 有所变化; 在 $z=197 \mu\text{m}$ 时, 旋转效率 P_x 、串扰 CT 变化幅度均比较大. 在 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 时, $z=L_\pi=197 \mu\text{m}$, 此时旋转效率 P_x 、串扰 CT 的各自两条线对应的数值相等. 当波长变化范围较小时, 由于硝酸盐玻璃和液晶的折射率变化均不大, 故旋转效率和串扰比较稳定.

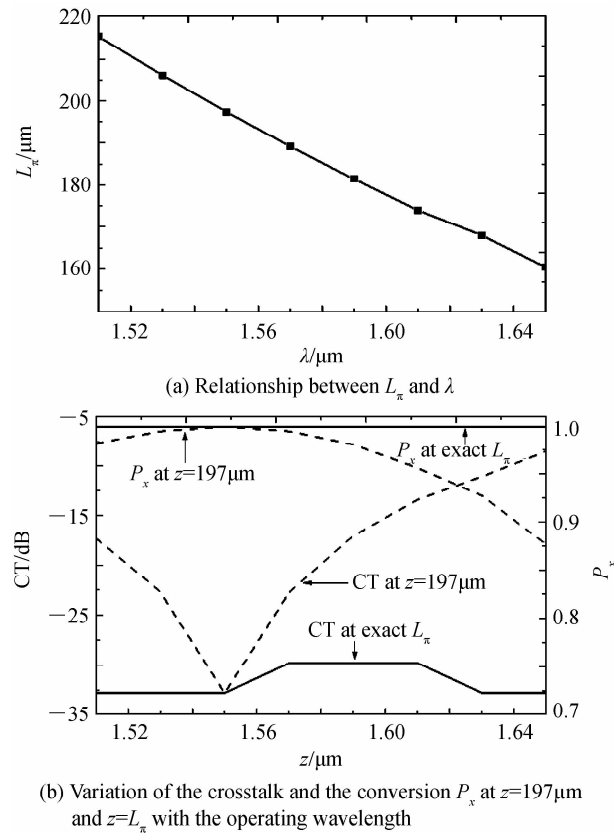


图 8 旋转长度 L_π 、工作串扰 CT、旋转效率 P_x 随波长 λ 的变化

Fig. 8 Variation of the L_π , CT and P_x with the operating wavelength λ

2.5 温度对偏振旋转特性的影响

图 9(a)为当 $\varphi=45^\circ, d_3=0.8 \mu\text{m}, \lambda=1.55 \mu\text{m}$ 时, 旋转长度 L_π 随温度 T 的变化情况. 从图中可以看出随着温度的增加, 旋转长度 L_π 随之升高. 图 9(b) 为当 $\varphi=45^\circ, d_3=0.8 \mu\text{m}, \lambda=1.55 \mu\text{m}$ 时, 传输距离分别取 $z=197 \mu\text{m}$ 和 $z=L_\pi$, 工作串扰 CT 与旋转效率 P_x 随温度 T 的变化情况. 从图中可以看出随着温度的升高, 在 $z=L_\pi$ 时, 各个温度下的旋转效率 P_x 近似相等, 而串扰 CT 有所变化; 在 $z=197 \mu\text{m}$ 时, 旋转效率 P_x 、串扰

CT 变化幅度均比较大. 在 $T=25^\circ\text{C}$ 时, $z=L_\pi=197 \mu\text{m}$, 此时旋转效率 P_x 、串扰 CT 的各自两条线所对应的数值相等. 温度对液晶填充硝酸盐光子晶体光纤偏振旋转器偏振旋转特性的影响缘于液晶的折射率受温度的影响, 尤其是非寻常光折射率 n_e 随温度升高而变小, 使得温度增加时, 有效折射率差变小, 而旋转长度变大.

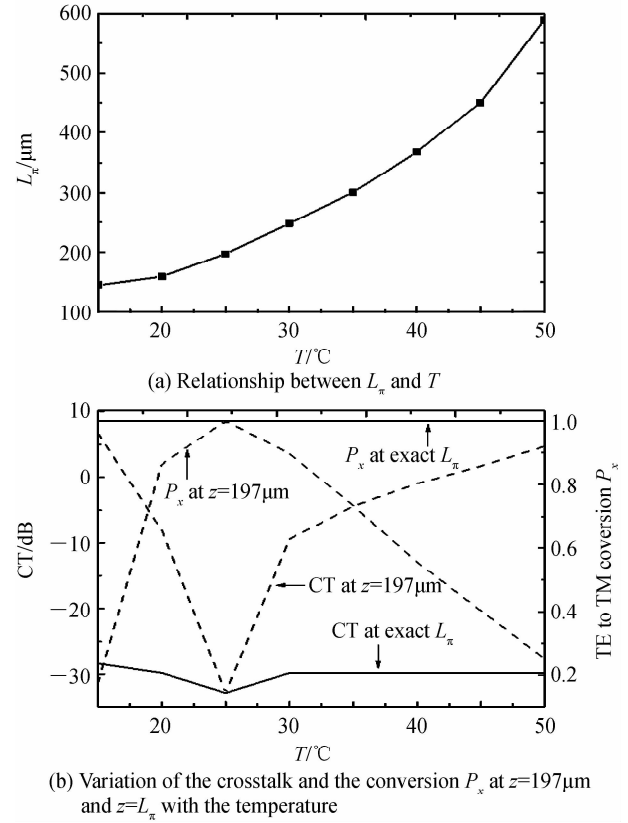


图 9 旋转长度 L_π 、工作串扰 CT、旋转效率 P_x 随温度 T 的变化

Fig. 9 Variation of the L_π , CT and P_x with the temperature T

3 结论

本文设计了一种基于液晶填充硝酸盐玻璃的柚子型光子晶体光纤偏振旋转器, 并对这种光纤偏振束束器的特性进行了模拟分析. 研究表明, 液晶填充硝酸盐玻璃柚子型光子晶体光纤偏振旋转器有着优良的特性, 在 $\lambda=1.55 \mu\text{m}, T=25^\circ\text{C}, \varphi=45^\circ, d_3=0.8 \mu\text{m}$ 时, 这种光纤偏振旋转器有较高的旋转效率, 达到 99.95%, 且其工作串扰极低, 仅为 -32.84 dB. 该研究成果为光子晶体光纤功能器件的研发提供了理论支撑, 且对全光通信的实现有着重要意义.

参考文献

[1] LIU Xiao-min, JESPER L, DMITRY T. Highly-stable monolithic femtosecond Yb-fiber laser system based on photonic crystal fibers[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(15): 15475-15483.

- [2] XI Xiao-ming, CHEN Zi-lun, SUN Gui-lin, *et al.* Dual-wavelength pumped supercontinuum generation in tapered photonic crystal fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **31**(2): 0206001.
奚小明, 陈子伦, 孙桂林, 等. 双波长抽运拉锥光子晶体光纤产生超连续谱研究[J]. 光学学报, 2013, **31**(2): 0206001.
- [3] ZHAO Xing-tao, LIU Xiao-xu, WANG Shu-tao, *et al.* Phase-matching characteristic of photonic crystal fiber with three zero-dispersion wavelengths[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(9): 0906007.
赵兴涛, 刘晓旭, 王书涛, 等. 三个零色散波长光子晶体光纤及相位匹配特性[J]. 光学学报, 2015, **35**(9): 0906007.
- [4] FU Xing-hu, XIE Hai-yang, ZHU Hong-bin, *et al.* Experimental research of curvature sensor based on tapered photonic crystal fiber mach-zehnder interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(5): 0506002.
付兴虎, 谢海洋, 朱洪彬, 等. 基于锥形光子晶体光纤马赫-曾德尔干涉的曲率传感器实验研究[J]. 光学学报, 2015, **35**(5): 0506002.
- [5] KUMAR V, GEORGE A, RUSSELL P, *et al.* Tellurite photonic crystal fiber [J]. *Optics Express*, 2003, **11**(20): 2641-2645.
- [6] LOUSTEAU J, SCARPIGNATO G, ATHANASIOU G, *et al.* Photonic bandgap confinement in an all-solid tellurite-glass photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(23): 4922-4924.
- [7] SCHMIDT M, GRANZOW N, DA N, *et al.* All-solid bandgap guiding in tellurite-filled silica photonic crystal fibers [J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(13): 1946-1948.
- [8] CAO Ye, ZHAO Shun, TONG Zheng-rong. Single-core PCF splitter based on ZnTe Tellurite glass [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(2): 0206003.
曹晔, 赵舜, 童峥嵘. 基于碲酸盐的新型单芯光子晶体光纤偏振分束器[J]. 光子学报, 2015, **44**(2): 0206003.
- [9] HAMEED M, HEIKAL A, YOUNIS B, *et al.* Ultra-high tunable liquid crystal-plasmonic photonic crystal fiber polarization filter[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(6): 7007-7020.
- [10] QIAN Xiang-zhong. Effect of temperature on transmission properties in photonic crystal fibers infiltrated with liquid crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 988-991.
钱祥忠. 温度对液晶填充光子晶体光纤传输特性的影响[J]. 光学学报, 2008, **28**(5): 988-991.
- [11] HAMEED M, OBAYYA S. Analysis of polarization rotator based on nematic liquid crystal photonic crystal fiber[J]. *Journal of Light Wave Technology*, 2010, **28**(5): 806-815.
- [12] HAMEED M, OBAYYA S. Polarization rotator based on soft glass photonic crystal fiber with liquid crystal core[J]. *Journal of Light Wave Technology*, 2011, **29**(18): 2725-2731.
- [13] HAMEED M, OBAYYA S. Ultrashort silica liquid crystal photonic crystal fiber polarization rotator [J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(4): 1077-1080.
- [14] LIU Zhao-lun, AN Jing, LIU Hai-long, *et al.* Properties analysis of tellurite photonic crystal fiber filled with nematic liquid crystal[J]. *Optik*, 2016, **127**(1): 15-20.
- [15] LIU Zhao-lun, AN Jing, XING Jing-wei, *et al.* Polarization rotator based on liquid crystal infiltrated tellurite photonic crystal fiber[J]. *Optik*, 2016, **127**(10): 4391-4395.
- [16] CHENG Tong-lei, Rim C, LIAO Mei-song, *et al.* Stimulated Brillouin scattering of higher-order acoustic modes in four-core tellurite microstructured optical fiber[J]. *Applied Physics Express*, 2012, **5**(10): 102501.
- [17] LI Jun, WU S, STEFANO B, *et al.* Infrared refractive indices of liquid crystals [J]. *Journal Applied Physics*, 2005, **97**(7): 073501.
- [18] REN Guo-bin, SHUM P, YU Xia, *et al.* Polarization dependent guiding in liquid crystal filled photonic crystal fibers [J]. *Optical Communication*, 2008, **281**(6): 1598-1606.
- [19] XIA Chang-ming, ZHOU Gui-yao, HAN Ying, *et al.* Investigation of V-type photonic crystal fiber with high birefringence[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **60**(9): 094213.
夏长明, 周桂耀, 韩颖, 等. V形高双折射光子晶体光纤特性研究[J]. 物理学报, 2011, **60**(9): 094213.