

doi: 10.3788/gzxb20154401.0106001

碲玻璃双芯光子晶体光纤耦合特性研究

郭士亮, 胡春海, 黄惠, 沙晓鹏, 李志全

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要:以碲玻璃为基质材料, 设计了八边形双芯光子晶体光纤. 应用全矢量有限元法和模式耦合基本理论分析了八边形双芯光子晶体光纤中结构参数对耦合长度特性的影响. 计算结果表明: 在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处, 减小孔间距可明显减小耦合长度, 但只略微改变相对耦合长度; 增大空气孔及椭圆率可略微增大耦合长度, 但可明显增大相对耦合长度. 当相对耦合长度为 1 时, 设计的偏振分束器性能较理想. 在此基础上, 通过调节结构参数, 设计了一种较短传输长度、高带宽、高消光比的偏振分束器, 当光纤长度为 $139 \mu\text{m}$ 时, X、Y 方向偏振光即可实现分离, 消光比达到最小值 -53.46 dB , 且在波长 $1.49 \mu\text{m} \sim 1.61 \mu\text{m}$, 即带宽为 120 nm 范围内, 消光比小于 -20 dB , 与同类型的高消光比和极短长度双芯偏振分束器相比, 其综合性能比较突出.

关键词: 光纤光学; 双芯光子晶体光纤; 全矢量有限元法; 偏振分束器; 耦合长度; 消光比; 碲玻璃

中图分类号: TN25; TN818

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)01-0106001-5

Analysis of Coupling Characteristics of Dual-core Photonic Crystal Fibers Based on Tellurite Glass

GUO Shi-liang, HU Chun-hai, HUANG Hui, SHA Xiao-peng, LI Zhi-quan

(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract: A novel octagonal dual-core photonic crystal fiber based on tellurite glass was proposed. Using the Full-vector finite Element Method (FEM) and coupled-mode theory, impacts of structural parameters on characteristics of the coupling was analyzed. The results show that the coupling length decreases significantly as the value of hole-pitch decreases, but the relative coupling length changes slightly as the value of hole-pitch decreases; the coupling length increases slightly as the value of air hole diameter increases, the relative coupling length increases significantly as the value of air hole diameter increases; the coupling length increases slightly as the value of ellipticity increases, the relative coupling length increases significantly as the value of ellipticity increases. The performance of the design polarization splitters was desired when the relative coupling length is 1. Then a kind of polarization splitters based on the proposed dual-core PCF was obtained. The two polarized lights are separated entirely with $139 \mu\text{m}$ fiber, simultaneously the polarized light extinction ratio is -53.46 dB at the wavelength of $1.55 \mu\text{m}$. Besides, the bandwidth is over 120 nm when the extinction ratio is less than -20 dB , which exhibited high performance of splitting one light into two orthogonal polarization states comparing to the other dual-core polarization splitter with highly extinction ratio and short length.

Key words: Fiber optics; Dual-core photonic crystal fibers; Full-vector finite element method; Polarization splitter; Coupling length; Polarization extinction; Tellurite glass

OCIS Codes: 060.2310; 060.5295; 260.5430; 230.1360

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61107039, 61172044)和河北省自然科学基金(No. F2012203204)资助

第一作者: 郭士亮(1984-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光子晶体光纤及应用. Email: guosl0112@163.com

导 师: 胡春海(1966-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为图像处理及光电检测. Email: fred-hu@ysu.edu.cn

收稿日期: 2014-03-10; 录用日期: 2014-07-03

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

0 引言

根据光纤中导光机制的不同,光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)可分为光子带隙型光纤和折射率引导型光纤.光子带隙型光纤是利用周期性结构产生的光子带隙效应,使光能在低折射率的纤芯中传输;折射率引导型光纤是以全内反射的方式使光在纤芯和包层间传输^[1].折射率引导型光纤又称为多孔光纤,具有无截止单模、奇异色散、高非线性及高双折射等特性^[2-7].双芯光纤是光纤系统中常用的耦合器件,但传统的双芯光纤制作复杂,光子晶体光纤的出现为双芯光纤的制备提供了一种新方法^[8].因此,对双芯光子晶体光纤的特性分析及应用的研究已成为研究者理论与实验工作的热点.傅博等研究了双芯光子晶体光纤的双折射、耦合长度及色散特性随光纤结构参数的变化规律^[8].汪徐德等数值计算了双芯光子晶体光纤的结构参数对耦合特性的影响,并基于此结构设计了波分复用器件^[9].耿开胜等研究了矩形晶格双芯光子晶体光纤的耦合特性,并在此基础上设计了一种偏振分束器^[10].

近年来,采用不同材料制备的光子晶体光纤引起了研究者的极大关注,特别是采用碲玻璃制备的光子晶体光纤.Kumar等研究了使用碲玻璃制备的光子晶体光纤,并验证了其波导特性^[11].Xian等研究了使用碲玻璃制备的具有较小模式面积的光子晶体光纤,并研究了对此光纤的应用^[12].Liao等研究了在碲玻璃光子晶体光纤中生产超连续谱^[13].刘硕等研究了基于碲玻璃的三芯光子晶体光纤偏振分束器^[14].曹晔等研究的基于碲玻璃的双芯光子晶体光纤偏振分束器,并与石英玻璃制备的光子晶体光纤偏振分束器进行了特性对比^[15].

本文结合碲玻璃材料和八边形结构,设计了一种新型的双芯光子晶体光纤,利用全矢量有限元法和模式耦合理论对双芯光子晶体光纤进行耦合特性分析,通过调节结构参数,获得一种微型、高带宽、高消光比的偏振分束器.

1 光纤结构及理论分析

图1是设计的双芯光子晶体光纤偏振分束器的横截面示意图,其中空气孔以八边形晶格形状排列,X轴方向的孔间距为 Δx ,Y方向的孔间距为 Δy .包层中的空气孔直径取为 d ,两纤芯间的空气孔为椭圆,椭圆的长轴为 a ,短轴为 b ,椭圆率为 $\eta=a/b$ 整个光纤的基质为碲玻璃,其折射率可以由以下sellmeier公式得出,即

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

式中, $A = 2.484\ 324\ 5$, $B = 1.617\ 432\ 1$, $C =$

$0.053\ 715\ 551$, $D = 2.476\ 513\ 5$, $E = 225.0$ 且 λ 的单位为微米^[16].由式(1)可得,当工作波长为 $1.55\ \mu\text{m}$ 时,碲玻璃的折射率为 2.03 .

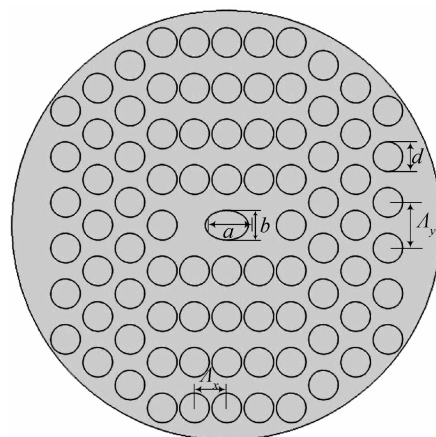


图1 双芯光子晶体光纤截面图
Fig. 1 Cross section of the dual-core PCF

在双芯光子晶体光纤中,每个纤芯中的模式通过消散场的相互作用形成一对超模,即偶模(对称)和奇模(非对称).这对超模的传输常数 β 与每个纤芯中模式的传输常数略有不同,偶模与奇模之间的传输常数也略有不同.两纤芯间的耦合效应的强度决定了 β 的变化量,因此, β 变化量可以用来表示耦合系数.当一束光射入双芯光纤的一个纤芯中时,奇模和偶模将同时出现.奇模和偶模在传输过程中引起的相位变化造成光能在两个纤芯中振荡传输^[17].耦合长度 L_c 是光能从一个纤芯完全转移到另一个纤芯时所经过的光纤长度,即

$$L_c^{x,y} = \frac{\pi}{\beta_c^{x,y} - \beta_o^{x,y}} = \frac{\lambda}{2(n_e^{x,y} - n_o^{x,y})} \quad (2)$$

式中 $L_c^{x,y}$ 为X偏振方向和Y偏振方向的耦合长度, $\beta_c^{x,y}$ 为X偏振方向和Y偏振方向的偶模传播常数, $\beta_o^{x,y}$ 为X偏振方向和Y偏振方向的奇模传播常数,X耦合长度 λ 为工作波长, $n_e^{x,y}$ 为X偏振方向和Y偏振方向的偶模有效折射率, $n_o^{x,y}$ 为X偏振方向和Y偏振方向的奇模有效折射率.耦合长度随两纤芯间耦合效应强度的变化而变化;当耦合效应增强时,耦合长度变短;当耦合效应减弱时,耦合长度变长;当不存在耦合效应时,耦合长度无限长.

为便于表示X、Y偏振方向的耦合长度的差异,定义相对耦合长度表示X和Y偏振方向的耦合长度差相对于X偏振方向的耦合长度的大小^[18],即

$$\Delta L_c = \frac{L_c^y - L_c^x}{L_c^x} \quad (3)$$

式中 L_c^y 为Y偏振方向的耦合长度, L_c^x 为X偏振方向的耦合长度.

光能在对称双芯光子晶体光纤中传输过程时,光能将周期的从一个纤芯全部转移到另一个纤芯中.当

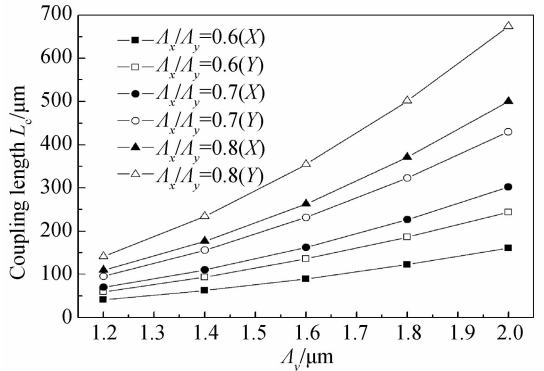
光能从一个纤芯中入射进光纤中,经过在光纤中的传输,光能在输出端的输出功率为

$$P_{\text{out}}^{x,y} = P_{\text{in}}^{x,y} \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{L}{L_c^{x,y}} \right) \quad (4)$$

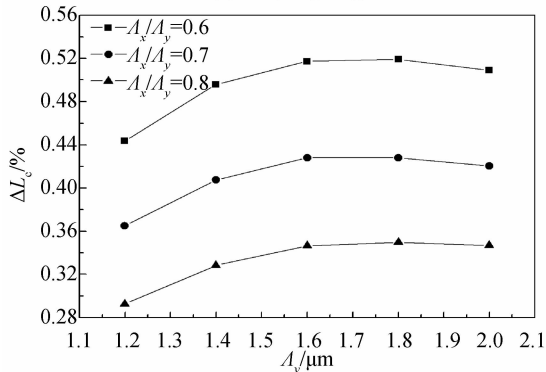
式中 $P_{\text{in}}^{x,y}$ 为光能的输入功率, L 为光纤长度.

2 耦合特性分析

图 2(a) 为 $d/\Lambda_y = 0.5, b = d, \eta = 1$ 保持不变, Λ_x/Λ_y 由 0.6 增加到 0.8 时, 在 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处各偏振方向上耦合长度随孔间距 Λ_y 的变化曲线. 由图可知, 对于确定的 Λ_x/Λ_y , 耦合长度随着孔间距 Λ_y 的增大而增大. 这主要是因为孔间距 Λ_y 的增加, 两纤芯中模场面积间的距离增大, 引起纤芯间的耦合效应减弱, 造成光纤的耦合长度增大. 在确定孔间距 Λ_y 处, 耦合长度随着 Λ_x/Λ_y 的增大而增大, 这主要是因为随着 Λ_x/Λ_y 的增加, 纤芯间的距离增大, 导致模场间的距离增大. 此时, 耦合效应减弱, 耦合长度增加.



(a) Coupling length



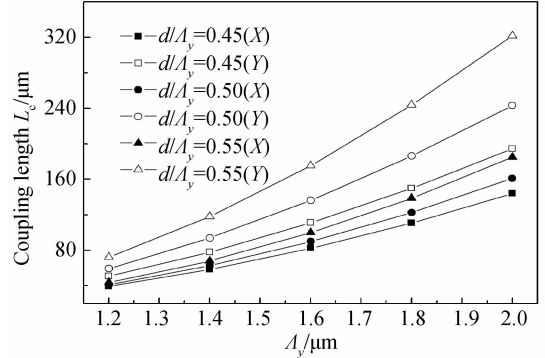
(b) Relative coupling length

图 2 $d/\Lambda_y = 0.5, b = d, \eta = 1$ 时, Λ_x/Λ_y 从 0.6 变化到 0.8, 耦合长度和相对耦合长度随 Λ_y 的变化

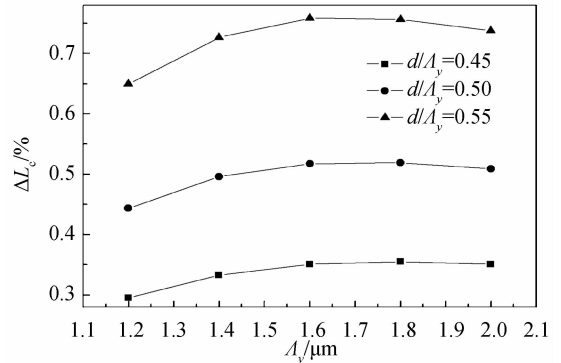
Fig. 2 Coupling length and relative coupling length as a function of hole-pitch Λ_y under different Λ_x/Λ_y

图 2(b) 为 $d/\Lambda_y = 0.5, b = d, \eta = 1$ 保持不变, Λ_x/Λ_y 由 0.6 增加到 0.8 时, 在 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处各偏振方向上相对耦合长度随孔间距 Λ_y 的变化曲线. 在确定 Λ_x/Λ_y 处, 相对耦合长度随着 Λ_y 的增加而先逐渐增大后逐渐减小. 在确定孔间距 Λ_y 处, 相对耦合长度随着 Λ_x/Λ_y 的增大而明显减小.

图 3(a) 为 $\Lambda_x/\Lambda_y = 0.6, b = d, \eta = 1$ 保持不变, d/Λ_y 由 0.45 增加到 0.55 时, 在 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处各偏振方向上耦合长度随孔间距 Λ_y 的变化曲线. 由图可知, 在确定孔间距 Λ_y 处, 耦合长度随着 d/Λ_y 的增大而逐渐增大. 这主要是因为随着 d/Λ_y 的增加, 包层对光场的限制增强, 导致光场更加集中于纤芯. 此时, 耦合效应减弱, 耦合长度增加.



(a) Coupling length



(b) Relative coupling length

图 3 $\Lambda_x/\Lambda_y = 0.6, b = d, \eta = 1$ 时, d/Λ_y 从 0.45 变化到 0.55, 耦合长度和相对耦合长度随 Λ_y 的变化

Fig. 3 Coupling length and relative coupling length as a function of hole-pitch Λ_y under different d/Λ_y

图 3(b) 为 $\Lambda_x/\Lambda_y = 0.6, b = d, \eta = 1$ 保持不变, d/Λ_y 由 0.45 增加到 0.55 时, 在 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处各偏振方向上相对耦合长度随孔间距 Λ_y 的变化曲线. 由图可知, 在确定孔间距 Λ_y 处, 相对耦合长度随着 Λ_x/Λ_y 的增大而显著增大.

图 4(a) 为 $\Lambda_x/\Lambda_y = 0.6, d/\Lambda_y = 0.5, b = d$ 保持不变, η 由 1 增加到 1.5 时, 在 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处各偏振方向上耦合长度随孔间距 Λ_y 的变化曲线. 由图可知, 在确定孔间距 Λ_y 处, 耦合长度随着 η 的增大而逐渐增大. 这主要是因为随着 η 的增加, 纤芯模场面积减小, 光场从一个纤芯传耦合到另一个纤芯能力减弱, 耦合长度增加.

图 4(b) 为 $\Lambda_x/\Lambda_y = 0.6, d/\Lambda_y = 0.5, b = d$ 保持不变, η 由 1 增加到 1.5 时, 在 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处各偏振方向上相对耦合长度随孔间距 Λ_y 的变化曲线. 由图可知, 在确定孔间距 Λ_y 处, 相对耦合长度随着 η 的增大而显著增大.

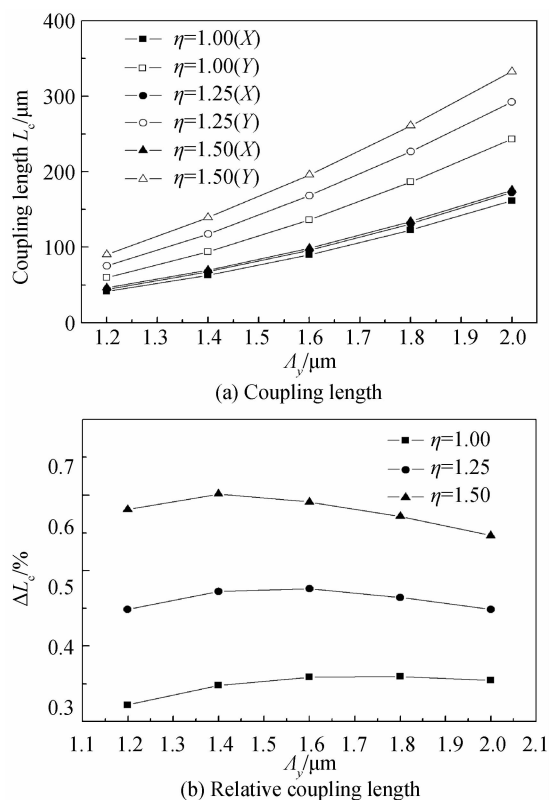


图 4 $\Delta_x/\Delta_y=0.6, d/\Delta_y=0.5, b=d$ 时, η 从 0.45 变化到 0.55, 耦合长度和相对耦合长度随 Δ_y 的变化
Fig. 4 Coupling length and relative coupling length as a function of hole-pitch Δ_y under different η

3 偏振分束器设计

在双芯光子晶体光纤中, 依据两偏振方向耦合长度的不同, 双芯光子晶体光纤可以制成偏振分束器, 此时传输长度满足 $L = mL_c^x = nL_c^y$, m, n 是奇偶性相反的整数. 当相对耦合长度 $\Delta L_c = 1$, 即 $L = 2L_c^x = L_c^y$ 时, 所设计的偏振分束器性能较为理想. 本文通过优化光纤的结构参数, 设计了一种基于该光纤的新型偏振分束器, 其中 $\Delta_y = 1.4 \mu\text{m}, \Delta_x/\Delta_y = 0.6, d/\Delta_y = 0.5, b = d, \eta = 1.5$.

图 5 为偏振分束器中耦合长度随传输波长的变化

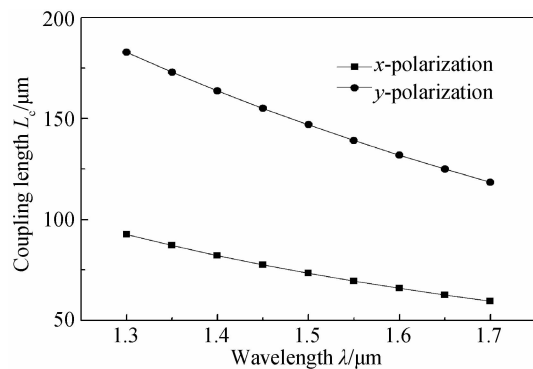


图 5 x 偏振光和 y 偏振光的耦合长度

Fig. 5 Coupling length of x polarization and y polarization

曲线. 由图可知, 在波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 时, X 偏振方向和 Y 偏振方向的耦合长度分别为 $L_c^x = 69.5 \mu\text{m}, L_c^y = 139.1 \mu\text{m}$, 这远小于文献[19-20]中的耦合长度.

图 6 是在波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处, X 偏振方向和 Y 偏振方向上的纤芯的归一化功率随传输距离的曲线图. 当光束从一个纤芯 A 入射到光纤中时, 纤芯 A 中两偏振方向的能量分布将随着光束在光纤中的传输而发生变化. 对于每个确定的偏振方向, 能量将在纤芯 A 和 B 中进行周期性的转移. 由图可知, 当光束在光纤中传输通过 $L = 139 \mu\text{m}$ 长度的光纤时, 两偏振光可以实现完全分离, 即将波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 的光作为输入光从纤芯 A 入射到光纤中, 在长度为 $139 \mu\text{m}$ 的双芯光子晶体光纤的输出端, Y 偏振光完全转移到另一个纤芯 B 中, 而 X 偏振光仍留在纤芯 A 中. 本文通过优化孔间距、空气孔直径、椭圆率等结构参数, 使得所设计的偏振分束器的传输长度比文献[19]中的传输长度小一个数量级, 这为设计较短传输长度的偏振分束器提供了一种可能.

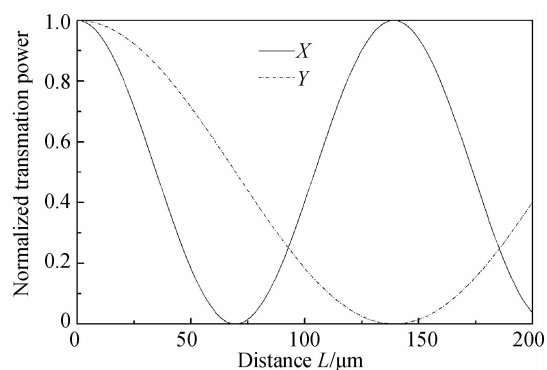


图 6 纤芯 A 中 X、Y 偏振光的归一化功率随传输距离的变化曲线

Fig. 6 Normalized power in core A versus the propagation distance

消光比 (polarization extinction, ER), 表示在纤芯的输出端, 两偏振态光场的输出功率之间的比值, 即

$$ER = 10 \log_{10} \frac{P_{out}^y}{P_{out}^x} \quad (5)$$

消光比是衡量偏振分束器性能优劣的一个重要参数指标: 消光比绝对值越大, 分光效果越理想.

图 7 为在传输长度为 $139 \mu\text{m}$ 的偏振分束器中, 其消光比随传输波长的变化曲线. 由图可知, 在波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 时, 消光比可取得最小值, 即 $ER = -53.46 \text{ dB}$, 并且在入射光波长为 $1.49 \mu\text{m} \sim 1.61 \mu\text{m}$ 时, 其消光比均小于 -20 dB . 由此可知, 按照上述参数设计的偏振分束器, 在波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 附近, 消光比小于 -20 dB 的波长范围为 120 nm , 不仅高于同种材料的分束器^[14-15], 也高于石英分束器^[19-20].

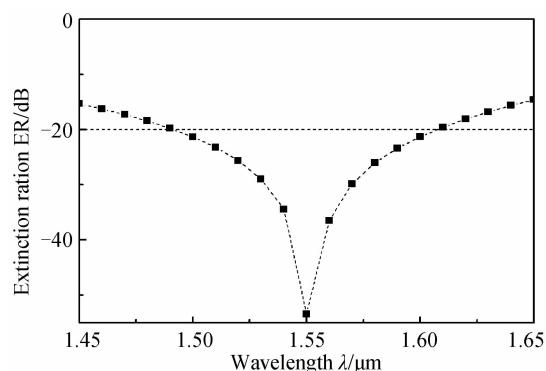


图7 双芯光子晶体光纤偏振分束器的消光比随波长的变化曲线

Fig.7 Dependence of the extinction ratio with wavelength in PCF polarization splitter

4 结论

本文设计了一种以碲玻璃为基质材料的八边形双芯光子晶体光纤.采用全矢量有限元法数值模拟了结构参数对双芯光纤的耦合特性的影响:孔间距 Λ_y 增大时,耦合长度会逐渐增大,相对耦合长度则先增大后减小;孔间距 Λ_x 增大时,耦合长度逐渐增大,相对耦合长度逐渐减小;空气孔增大时,耦合长度逐渐增大,相对耦合长度显著增加;椭圆率 η 增大时,耦合长度逐渐增大,相对耦合长度显著增加.当相对耦合长度 $\Delta L_c = 1$ 时,基于此结构设计的偏振分束器性能较理想.根据上述结论,优化结构参数设计了一个传输长度为 $139 \mu\text{m}$ 的偏振分束器.数值分析表明,在波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处,消光比达到最小值 -53.46 dB ,且在波长 $1.49 \mu\text{m} \sim 1.61 \mu\text{m}$,即带宽为 120 nm 范围内,消光比小于 -20 dB ,与同类型的高消光比和极短长度双芯偏振分束器相比,其综合性能比较突出.

参考文献

- [1] SAITOH K, SATO Y, KOSHIBA M. Coupling characteristics of dual-core photonic crystal fiber couplers [J]. *Optics Express*, 2003, **11**(24): 3188-3195.
- [2] LIMPET J, SCHMIDT O, ROTHHARDT J, et al. Extended single-mode photonic crystal fiber lasers [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(7): 2715-2720.
- [3] JUAN H D J, SHUM P P, LU C, et al. Dispersion-flattened polarization-maintaining photonic crystal fiber for nonlinear applications [J]. *Optics Communications*, 2009, **282**(20): 4072-4076.
- [4] GUAN Shou-hua, YU Qing-xu, ZHENG Jian-zhou. Study on the extreme characteristics of dispersion of photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(8): 0806001. 关寿华, 于清旭, 郑建洲. 光子晶体光纤色散极值特性的研究 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(8): 0806001.
- [5] LIU Yong-xing, ZHANG Pei-qing, XU Yin-sheng, et al. Dispersion properties of $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ chalcogenide glass photonic crystal fiber for mid-IR region [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(5): 516. 刘永兴, 张培晴, 许银生, 等. $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 碲系玻璃光子晶体光纤的中红外色散特性 [J]. *光子学报*, 2012, **41**(5): 516.
- [6] LIU Xu-an, WU Gen-zhu, CHEN Da-ru, et al. Novel highly birefringent photonic crystal fiber based on an elliptical hole fiber cladding and a fiber core of double-micro-hole units [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **40**(11): 1728-1732. 刘旭安, 吴根柱, 陈达如, 等. 基于椭圆孔包层和微型双孔纤芯的新型高双折射光子晶体光纤 [J]. *光子学报*, 2012, **40**(11): 1728-1732.
- [7] HE Zhong-jiao. Rectangular-hole photonic crystal fibers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(4): 583-586. 何忠蛟. 矩形孔光子晶体光纤 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(4): 583-586.
- [8] FU Bo, LI Shu-guang, YAO Yan-yan, et al. Coupling characteristics of dual-core high birefringence photonic crystal fibers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(11): 7708-7715. 付博, 李曙光, 姚艳艳, 等. 双芯高双折射光子晶体光纤耦合特性研究 [J]. *物理学报*, 2009, **58**(11): 7708-7715.
- [9] WANG Xu-de, ZHOU Zheng, LUO Ai-ping, et al. Design of twin core photonic crystal fiber coupler using WDM [J]. *Laser & Infrared*, 2011, **41**(8): 975-979. 汪徐德, 周正, 罗爱平, 等. 波分复用双芯光子晶体光纤耦合器的设计 [J]. *激光与红外*, 2011, **41**(8): 975-979.
- [10] GENG Kai-sheng, GUAN Jian-fei. Coupling characteristics of dual-core photonic crystal fiber with rectangular lattice [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(3): 0305007. 耿开胜, 关建飞. 矩形晶格双芯光子晶体光纤的耦合特性 [J]. *中国激光*, 2013, **40**(3): 0305007.
- [11] KUMAR V V, GEORGE A, KNIGHT J, et al. Tellurite photonic crystal fiber [J]. *Optics Express*, 2003, **11**(20): 2641-2645.
- [12] FENG X, LOH W H, FLANAGAN J C, et al. Single-mode tellurite glass holey fiber with extremely large mode area for infrared nonlinear applications [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(18): 13651-13656.
- [13] LIAO M, CHAUDHARI C, QIN G, et al. Fabrication and characterization of a chalcogenide-tellurite composite microstructure fiber with high nonlinearity [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(24): 21608-21614.
- [14] 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.
- [15] CAO Ye, CUI Dan-ning, TONG Zheng-rong, et al. Dual-core photonic crystal fiber polarization splitter based on tellurite glass [J]. *Chinese Journal of 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.
- [16] SHUO L, SHU-GUANG L, YING D. Analysis of the characteristics of the polarization splitter based on tellurite glass dual-core photonic crystal fiber [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, **44**(6): 1813-1817.
- [17] WANG Z, TARU T, BIRKS T A, et al. Coupling in dual-core photonic bandgap fibers; theory and experiment [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(8): 4795-4803.
- [18] 陈明阳. 新型光子晶体晶体光纤数值模拟 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2004: 62-75.
- [19] ZHANG Bin, TAN Xiao-ling, XUE Rui-qiu, 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.
- [20] LI Min-rong, CAO Ye, TONG Zheng-rong. Short length polarization splitter based on dual elliptical-core photonic crystal fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(10): 1005004. 李敏荣, 曹晔, 童峥嵘. 短长度的双椭圆纤芯光子晶体光纤偏振分束器 [J]. *中国激光*, 2012, **39**(10): 1005004.