

doi: 10.3788/gzxb20164510.1023002

全固三芯光子晶体光纤偏振分束器

刘兆伦¹, 杜海丽¹, 汪明²

(1 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)

(2 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:设计分析了一种基于碲酸盐玻璃的全固态三芯光子晶体光纤偏振分束器. 利用三芯光纤中存在的谐振耦合现象, 调整光纤结构参量, 使某一偏振光无限接近谐振耦合条件产生强耦合, 而另一偏振光因远离谐振耦合而耦合程度较弱, 实现不同偏振光的分离. 该偏振分束器长度短、超宽带、消光比高. 在波长 1 550 nm 处, 偏振分束器长度仅为 1.14 mm, 消光比高达 -101.27 dB; 消光比小于 -20 dB 的带宽达到 100 nm; 消光比小于 -10 dB 的带宽覆盖了 E+S+C+L+U 波段, 高达 350 nm. 此全固光子晶体光纤偏振分束器不仅性能优越, 结构简单, 且全固态的设计结构可有效避免光纤拉制过程中的空气孔坍塌, 为设计更优性能的偏振分束器提供了思路.

关键词: 光纤光学; 三芯光子晶体光纤; 全固偏振分束器; 全固光纤; 碲酸盐玻璃

中图分类号: TN25; TN818

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)10-1023002-5

All-solid Three-core Photonic Crystal Fiber Polarization Splitter

LIU Zhao-lun¹, DU Hai-li¹, WANG Ming²

(1 *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)

(2 *School of Electrical Engineering, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)*

Abstract: An all-solid three-core Photonic Crystal Fibers (PCFs) polarization splitter based on tellurite glass was researched. When one polarization state of light is close unlimitedly to resonance coupling conditions, the other polarization state is far from the resonance coupling conditions resulting in the weak coupling degree. Based on the resonance coupling phenomenon in the three-core PCFs, different polarization states can be separated. The simulation shows that the polarization beam splitter possesses the characteristics of short-length, ultra-band-width and high-extinction ratio at the wavelength of 1 550 nm. The length of this splitter is only 1.14 mm and its extinction ratio can reach -101.27 dB. The bandwidth of extinction ratio less than -20 dB reaches 100 nm, and the bandwidth of extinction ratio less than -10 dB reaches up 350 nm which covers E+S+C+L+U wave bands. This all-solid photonic crystal fiber polarization splitter not only has superior performance, simple structure, its all-solid structural design also can effectively avoid the circumstance of air-holes collapse during the fabrication of photonic crystal fibers, which provides an effective way for better performance polarization splitter.

Key words: Fiber optics; Three-core photonic crystal fibers; All-solid polarization splitter; All-solid fibers; Tellurite glass

OCIS Codes: 230.5440; 060.2310; 060.5295; 230.5298

0 引言

随着光子晶体光纤的诞生及发展, 光纤通信网正

逐步向全光网络^[1]推进. 全光网络的实施, 对各种器件的性能提出了更高要求. 作为集成光学中的一个重要器件, 偏振分束器经历了由传统单模光纤^[2-4]到光子晶

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61307110)资助

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

收稿日期: 2016-04-08; 录用日期: 2016-06-02

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

体光纤^[5]的蜕变.

近些年,国内外学者对空气孔包层的光子晶体光纤偏振分束器进行了深入研究,并取得了显著成果.曹晔^[6]等设计的单芯光纤偏振分束器,长度为15 mm,在1 550 nm波长处,小于-20 dB的带宽为67.1 nm;文科^[7]等设计的偏振分束器,长度为1.039 mm,在1 550 nm波长处,消光比为36.98 dB,小于11 dB的带宽为24 nm;Sheng Zhufeng^[8]等设计的偏振分束器,长度为0.775 μm ,工作波长处的消光比为50 dB,高于20 dB的带宽为32 nm;韩博琳^[9]等设计的超带宽双芯光子晶体光纤偏振分束器的长度为7.362 mm,消光比高于20 dB的带宽为600 nm;郭士亮^[10]等设计的偏振分束器的长度为139 μm ,消光比达-53.46 dB,消光比小于-20 dB的带宽为120 nm.

上述研究成果为本文奠定了基础,但普遍存在两个问题:1) 所设计的偏振分束器未能同时满足尺寸小、消光比高、带宽宽的性能要求. 2) 包层均为空气孔. 针对上述问题,基于硝酸盐玻璃和负折射率^[11]材料的光子晶体光纤偏振分束器为解决该问题提供了可能. 该偏振分束器包层柱为固体材料,其折射率为1.1^[12]. 理论上可以将折射率为负的“左手材料”与常见的折射率大于1的“右手材料”合理掺杂,得到所需要的折射率值. 美国加州大学的Shelby R A^[13]等已成功合成了负折射率材料,且负折射率材料应用于光子晶体光纤已见报道^[14-16].

本文利用全矢量有限元法和模式耦合理论对此全固态光子晶体光纤偏振分束器的性能进行了研究分析,通过合理调整结构参量,实现了偏振分束器小尺寸,超高消光比、宽带的性能要求.

1 光纤结构与理论基础

1.1 光纤结构

图1为本文设计的光纤偏振分束器截面图,空气孔的排布为正六边形晶格结构,通过纤芯周围引入椭

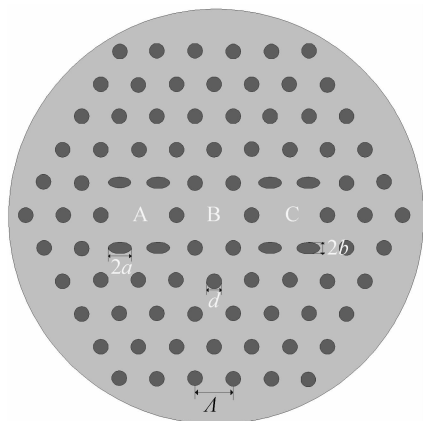


图1 偏振分束器截面图

Fig. 1 Cross section of polarization splitter

圆柱来破坏结构的对称性. 图中小圆孔直径 $d = 0.8 \mu\text{m}$, 孔间距 $\Lambda = 2 \mu\text{m}$, 椭圆的长半轴 $a = 0.64 \mu\text{m}$, 短半轴 $b = 0.287 \mu\text{m}$. 包层柱折射率 $n_c = 1.1$, 将光纤包层水平方向的三个包层柱去除, 并以光纤基底材料代替, 用字母 A、B、C 表示, 作为纤芯.

三个纤芯可视为三个独立的并行波导, 此处设 A 纤芯为输入波导, C 纤芯为输出波导, B 纤芯为谐振通道. 基底材料为硝酸盐玻璃, 其有效折射率 n 的 Sellmeier 色散方程为

$$n^2 = 2.4843245 + \frac{1.6174321\lambda^2}{\lambda^2 - 0.053715551} + \frac{2.4765135\lambda^2}{\lambda^2 - 225} \quad (1)$$

式中, λ 为工作波长, 单位为 μm .

1.2 理论基础

基于谐振耦合现象设计的三芯光子晶体光纤偏振分束器中, 存在六种有效模式, 如图2.

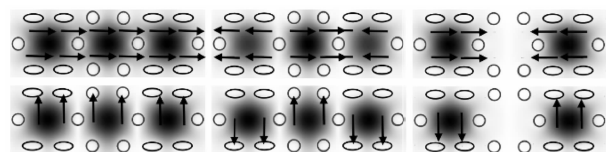


图2 三芯 PCF 中的六种有效模式

Fig. 2 Six effective modes in three-core PCFs

将这六种有效模式的折射率分别记为 $n_{\text{eff},1}^x, n_{\text{eff},2}^x, n_{\text{eff},3}^x, n_{\text{eff},1}^y, n_{\text{eff},2}^y, n_{\text{eff},3}^y$. 若某一方向偏振光的有效模式折射率满足

$$n_{\text{eff},1}^i - n_{\text{eff},3}^i = n_{\text{eff},3}^i - n_{\text{eff},2}^i \quad (i=x, y) \quad (2)$$

即

$$2n_{\text{eff},3}^i - n_{\text{eff},2}^i - n_{\text{eff},1}^i = 0 \quad (i=x, y) \quad (3)$$

那么该方向的偏振光产生谐振, 其能量将在纤芯 A 和 C 中周期性交换, 交换周期即为该偏振光的耦合长度, 即

$$L_c^i = \frac{\lambda}{2(n_{\text{eff},1}^i - n_{\text{eff},3}^i)} \quad (i=x, y) \quad (4)$$

改变光纤偏振分束器的结构参量来改变有效模式的折射率, 当折射率同时满足

$$n_{\text{eff},1}^x - n_{\text{eff},3}^x \approx n_{\text{eff},3}^x - n_{\text{eff},2}^x \quad (5)$$

$$n_{\text{eff},1}^y - n_{\text{eff},3}^y \gg n_{\text{eff},3}^y - n_{\text{eff},2}^y \quad (6)$$

时, 大部分 x 偏振光在输入波导 A 和输出波导 C 中发生周期性的转移, 而 y 偏振光则被束缚在纤芯 A 中. 此时将 x 偏振光的耦合长度作为该光子晶体光纤偏振分束器的长度, 记为 L

$$L = \frac{\lambda}{2(n_{\text{eff},1}^x - n_{\text{eff},3}^x)} \quad (7)$$

在纤芯的输出端口, 输出光功率与传输距离 z 和偏振分束器长度 L 的关系式为

$$P_{\text{out},A} = P_{\text{in}} \cos^2\left(\frac{\pi z}{2L}\right) \quad (8)$$

$$P_{\text{out},C} = P_{\text{in}} \sin^2\left(\frac{\pi z}{2L}\right) \quad (9)$$

消光比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.它是衡量偏振分束器性能优劣的重要指标,消光比绝对值越大,分光效果越理想,定义式为

$$ER = 10 \log \left(\frac{P_{out}^x}{P_{out}^y} \right) \quad (10)$$

2 仿真结果及分析

2.1 包层柱低折射率的选择

由于负折射率材料和零折射率材料具有某些特殊的性质,且研究相对不够成熟,本文选择基于负折射率材料合成的折射率大于1的“右手材料”.

为了能够合理设定包层柱的折射率,以便进行后续的研究工作,本文改变包层柱折射率来分析模式变化.包层柱折射率在1.8到1.1的变化过程中,纤芯束缚光的能力逐渐增强,漏光现象明显减弱,图3为包层柱折射率分别为1.8、1.1时的光纤模式图,此时椭圆短半轴长度 b 为初步设定值 $0.4 \mu\text{m}$.

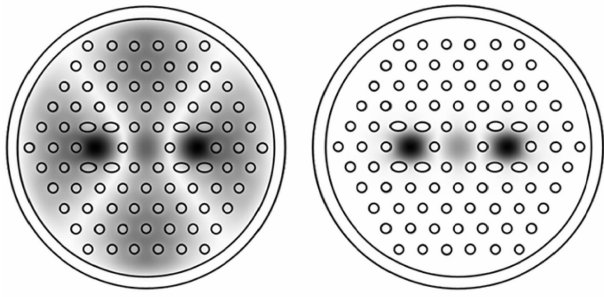


图3 包层柱折射率为1.8、1.1时的模式图

Fig. 3 Cross section of cladding refractive index is 1.8、1.1

通过对图3的分析,将包层柱折射率锁定在1.4至1.1之间,并给出 $|2n_{\text{eff},3}^x - n_{\text{eff},2}^x - n_{\text{eff},1}^x|$ 随包层柱折射率 n_c 的变化曲线,如图4.

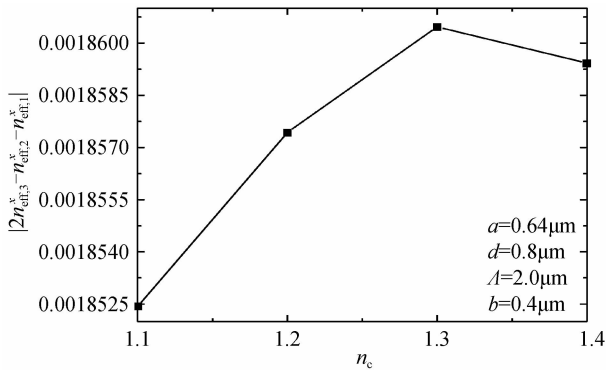


图4 $|2n_{\text{eff},3}^x - n_{\text{eff},2}^x - n_{\text{eff},1}^x|$ 随包层柱折射率 n_c 的变化曲线

Fig. 4 Curve of $|2n_{\text{eff},3}^x - n_{\text{eff},2}^x - n_{\text{eff},1}^x|$ varies with cladding refractive index n_c

从图4可以看出,包层柱折射率由1.3减小到1.1时, $|2n_{\text{eff},3}^x - n_{\text{eff},2}^x - n_{\text{eff},1}^x|$ 逐渐减小,在 $n_c = 1.1$ 处达到最小,近似值为 1.85×10^{-3} .因此选定包层柱折射率为1.1.

2.2 有效模式折射率

为了更好地满足式(5)、(6),在包层柱折射率为1.1的情况下,改变椭圆短半轴 b ,进一步降低 $2n_{\text{eff},3}^x - n_{\text{eff},2}^x - n_{\text{eff},1}^x$ 的数量级,同时观察 y 偏振光的有效折射率变化.在 1550 nm 波长处, x 偏振光有效模式折射率随椭圆短半轴 b 的变化曲线如图5.

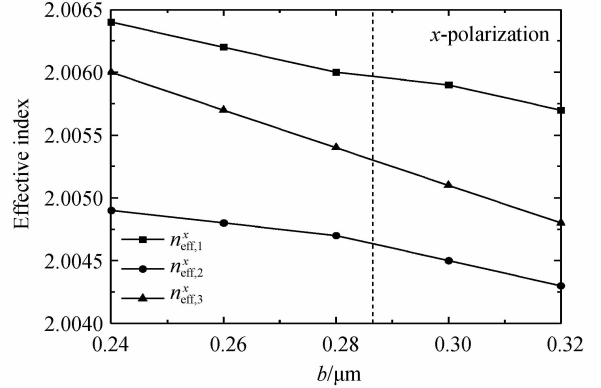


图5 x 偏振光有效折射率随短半轴 b 的变化关系

Fig. 5 Effective refractive index of x -polarized light varies with the elliptical minor semi-axis b

从图5可以看出,椭圆短半轴在 $0.24 \mu\text{m} \sim 0.34 \mu\text{m}$ 逐渐增大的过程中, x 偏振光的有效折射率逐渐减小.当 $b = 0.287 \mu\text{m}$ 时,有 $n_{\text{eff},1}^x \approx 2.005966986$, $n_{\text{eff},2}^x \approx 2.004620948$, $n_{\text{eff},3}^x \approx 2.005287814$.

为进一步观察,给出 $2n_{\text{eff},3}^x - n_{\text{eff},2}^x - n_{\text{eff},1}^x$ 随椭圆短半轴的变化曲线,如图6.很明显, x 偏振光折射率差值随着椭圆短半轴的增加而下降.该曲线与直线的交点处 $b = 0.287 \mu\text{m}$,此时 $2n_{\text{eff},3}^x - n_{\text{eff},2}^x - n_{\text{eff},1}^x = -1.2306 \times 10^{-5} \approx 0$,满足公式 $n_{\text{eff},1}^x - n_{\text{eff},3}^x \approx n_{\text{eff},3}^x - n_{\text{eff},2}^x$,但数量级达到了 10^{-5} .

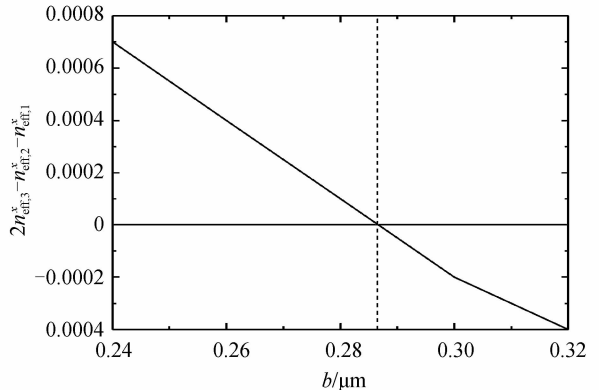


图6 $2n_{\text{eff},3}^x - n_{\text{eff},2}^x - n_{\text{eff},1}^x$ 随椭圆 b 的变化关系

Fig. 6 $2n_{\text{eff},3}^x - n_{\text{eff},2}^x - n_{\text{eff},1}^x$ varies with the elliptical minor semi-axis b

与此同时, y 偏振光需远离谐振条件,进一步观察 y 偏振光的有效模式折射率及其差值随 b 的变化情况,见图7、8.

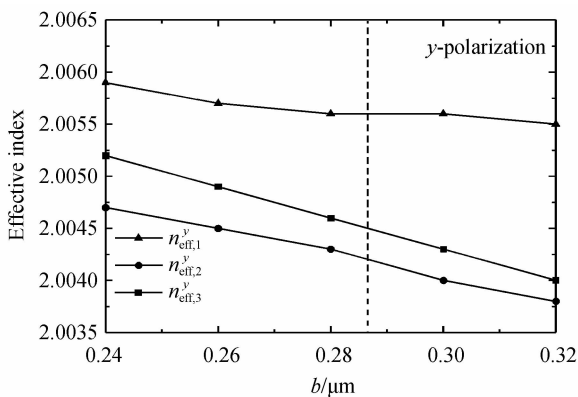


图7 y偏振光有效模式折射率随椭圆短半轴b的变化关系
Fig. 7 Effective refractive index of y-polarized light varies with the elliptical minor semi-axis b

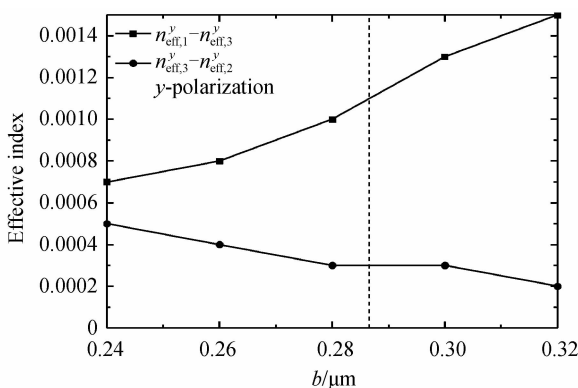


图8 随椭圆短半轴长度b的变化关系

Fig. 8 Varies with the elliptical minor semi-axis b

从图7可以看出,y偏振光有效折射率逐渐减小.三条曲线与竖直线的交点处b为0.287 μm,其折射率依次为 $n_{\text{eff},1}^y \approx 2.005620877$, $n_{\text{eff},2}^y \approx 2.004200034$, $n_{\text{eff},3}^y \approx 2.004515278$.

从图8可以看出,当 $b = 0.287 \mu\text{m}$ 时,y偏振光的有效模式折射率差值 $n_{\text{eff},1}^y - n_{\text{eff},3}^y$ 为 1.105599×10^{-3} , $n_{\text{eff},3}^y - n_{\text{eff},2}^y$ 为 3.15244×10^{-4} , 满足 $n_{\text{eff},1}^y - n_{\text{eff},3}^y \gg n_{\text{eff},3}^y - n_{\text{eff},2}^y$, 因此选定椭圆的短半轴长度为 $0.287 \mu\text{m}$.

2.3 归一化功率

为了观察不同偏振光在传输过程中的能量变化,分析归一化功率随传输距离的变化关系.假设光从A波导中输入,工作波长为 1550 nm ,在传输过程中,不同偏振态的光在A、C纤芯中的归一化功率随传输距离的变化分别如图9和图10.

图9中,A纤芯中的x偏振光能量随着传输距离的增加逐渐减少,y偏振光能量受传输距离的影响较小,基本保持不变.当传输长度为 1.14 mm 时,x偏振光能量最小,几乎为零.

图10中趋势与图9相反,表明随着传输距离的增加,大部分x偏振光由输入波导A转移到输出波导C中,y偏振光的能量大部分被束缚在A波导中.

当传输距离 $z = L = 1.14 \text{ mm}$ 时,可以在A的输出

端口检测到大部分的y偏振光,在C的输出端口检测到大部分的x偏振光,实现了不同偏振光的分离.

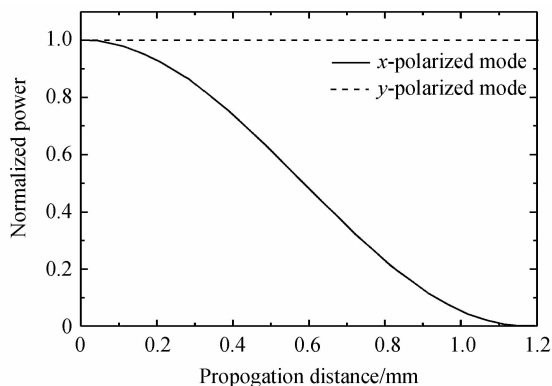


图9 A纤芯归一化功率随传输距离的变化

Fig. 9 Normalized power varies with the propagation distance in core A

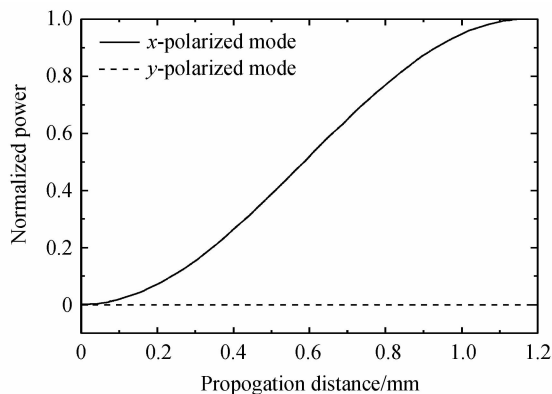


图10 C纤芯归一化功率随传输距离的变化

Fig. 10 The normalized power varies with the propagation distance in core C

2.4 消光比

消光比是检验偏振分束器性能的重要指标.一般来说,消光比的绝对值大于 20 dB 就可以达到很好的分光效果.本文光纤偏振分束器长度为 1.14 mm 时,其消光比随波长的变化曲线如图11.

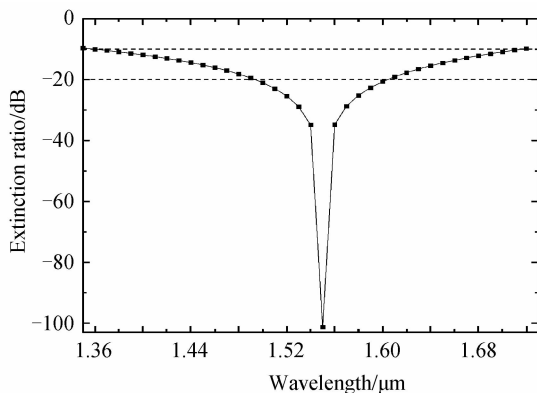


图11 偏振分束器消光比随波长变化曲线

Fig. 11 Extinction ratio varies with wavelength of the polarization splitter

从图11可以看出,波长在 $1.36 \sim 1.71 \mu\text{m}$,带宽

为 350 nm 范围内,偏振分束的消光比小于 -10 dB;波长 1.5~1.6 μm 范围内,消光比小于 -20 μm ,带宽为 100 nm;在 1.55 μm 波长处,消光比最高,其绝对值达到了 101.271 8 dB.这是因为在 1.55 μm 波长处, x 偏振光的谐振耦合作用最强, y 偏振光的耦合作用最弱,此时分光效果最明显.

3 结论

本文提出了一种背景材料为碲酸盐玻璃,包层柱折射率为 1.1 的全固光子晶体光纤偏振分束器,并对其进行了仿真研究.利用三芯光纤中存在的谐振耦合现象,使 x 偏振光产生谐振, y 偏振光不发生谐振,实现了不同偏振光的分离.该偏振分束器长度为 1.14 mm,最大占据带宽达 350 nm,工作波长处的消光比达 -101.27 dB,综合性能优越,为全固光子晶体光纤偏振分束器的实现提供了理论支撑.

参考文献

- [1] ZHANG Ming-yu, DING Ming-ji, LUO Qing-song. Trends and overview of next generation optical communications network[J]. *Optical Communication Technology*, 2014, **38**(8): 20-22.
张明宇,丁明吉,罗青松.下一代光通信网络传送技术概述及其趋势[J]. *光通信技术*, 2014, **38**(8): 20-22.
- [2] BRICHENO T, BAKER V. All-fiber polarization splitter/combiner[J]. *Electronics Letters*, 1985, **21**(6): 251-252.
- [3] PENG G D, TJUGIARTO T, CHU P L. Polarization beam splitting using twin-elliptic-core optical fibers[J]. *Electronics Letters*, 1990, **26**(10): 682-683.
- [4] SNYDER A W, STEVENSON A J. Polished-type couplers acting as polarizing beam splitters[J]. *Optics Letters*, 1986, **11**(4): 254-256.
- [5] RUSSELL P. Photonic-crystal fibers[J]. *Journal of Light Wave Technology*, 2006, **24**(12): 4729-4749.
- [6] 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.
- [7] WEN Ke, WANG Rong, WANG Jing-yuan, et al. Polarization splitter based on resonant tunneling phenomenon in three-core photonic crystal fibers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, **35**(12): 1962-1965.
文科,王荣,汪井源,等.基于谐振耦合现象的三芯光子晶体

- 光纤偏振分束器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1962-1965.
- [8] SHENG Zhu-feng, WANG Jia-sheng, FENG Rui-juan. Design of a compact polarization splitter based on the dual-elliptical-core photonic crystal fiber[J]. *Infrared Physics Technology*, 2014, **67**: 560-565.
- [9] HAN Bo-lin, LOU Shu-qin, LU Wen-liang, et al. Novel ultra-broadband polarization beam splitter based on dual-core photonic crystal fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(24): 244202.
韩博琳,娄淑琴,鹿文亮,等.新型超宽带双芯光子晶体光纤偏振分束器的研究[J]. *物理学报*, 2013, **62**(24): 244202.
- [10] GUO Shi-liang, HU Chun-hai, HUANG-Hui, et al. Analysis of coupling characteristics of dual-core photonic crystal fibers based on tellurite glass[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(1): 0106001.
郭士亮,胡春海,黄惠,等.碲玻璃双芯光子晶体光纤耦合特性研究[J]. *光子学报*, 2015, **44**(1): 0106001.
- [11] NIE Qiu-hua, HONG Jun, XU Jian, et al. Research development of negative index materials [J]. *Materials Review*, 2007, **21**(12): 6-11.
聂秋华,洪俊,徐键,等.负折射率材料的研究进展[J]. *材料导报*, 2007, **21**(12): 6-11.
- [12] JIA Xiu-li, WANG Xiao-peng, ZHOU Zhong-xiang, et al. Latest progress on chiral negative refractive index metamaterials[J]. *Chinese Optic*, 2015, **8**(4): 548-556.
贾秀丽,王晓鹏,周忠祥,等.手性负折射率材料的最新进展[J]. *中国光学*, 2015, **8**(4): 548-556.
- [13] SHELBY R A, SMITH D R, SCHULTZ S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. *Science*, 2001, **292**(5514): 77-79.
- [14] HOU Shang-lin, ZHANG Shu-jun, LI Suo-ping, et al. Investigation transmission characteristics of doubly cladding fiber with an inner cladding made of negative refractive-index material[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0506004.
侯尚林,张书军,黎锁平,等.内包层为负折射率介质双包层光纤的传输特性的研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0506004.
- [15] HUAN Zhen-yong. Dispersion and equal-inclination interference characteristics of left-handed materials[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(9): 091602.
黄振永.左手材料的色散和等倾干涉[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(9): 091602.
- [16] GUO Shi-liang, HUANG Hui, SHA Xiao-peng, et al. Polarization splitter based on octagonal dual-core photonic crystal fibers[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, **35**(7): 878-882.
郭士亮,黄惠,沙晓鹏,等.八边形晶格双芯光子晶体光纤偏振分束器[J]. *发光学报*, 2014, **35**(7): 878-882.