

光子晶体偏振分束器的设计与性能分析

张信祥¹, 陈鹤鸣²

¹南京邮电大学光电工程学院, 江苏 南京 210023;

²南京邮电大学贝尔英才学院, 江苏 南京 210023

摘要 设计了一种基于定向耦合结构的光子晶体偏振分束器。该分束器由两个单模波导构成,通过调节两个单模波导的宽度可以改变耦合长度。利用时域有限差分法进行仿真分析,结果表明,在波长 1550 nm 下 TE 和 TM 两种偏振模可以分束,透射率都达到 90% 以上,消光比分别达到 22.4 dB 和 18.2 dB。该光子晶体偏振分束器的尺寸为 25.8 μm \times 13 μm 。

关键词 集成光学; 定向耦合; 光子晶体; 偏振分束器; 时域有限差分法

中图分类号 O436.3 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.011301

Design and Performance Analysis of Photonic Crystal Polarizing Beam Splitter

Zhang Xinxiang¹, Chen Heming²

¹ College of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China;

² Bell Honors School, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China

Abstract A photonic crystal polarizing beam splitter based on directional coupling structure is proposed. The beam splitter consists of two single-mode waveguides. By adjusting the width of the two single-mode waveguides, the coupling length can be changed. The splitter is simulated and analyzed by using finite-difference time-domain method. The results show that at the wavelength of 1550 nm, both TE and TM polarizations achieve mode split. The transmissivities of TE and TM modes both exceed 90% and the extinction ratios reach 22.4 dB and 18.2 dB respectively. The size of the device is only 25.8 μm \times 13 μm .

Key words integrated optics; directional coupling; photonic crystal; polarizing beam splitter; finite-difference time-domain method

OCIS codes 130.3120; 060.2310; 130.5296; 130.5440

1 引言

偏振分束器是一种能把电磁波中相互正交两种偏振模式沿着不同的传播方向分开的光学器件^[1],其在光通信、光存储、光集成领域都有广泛的应用。传统的偏振分束器一般利用天然晶体的双折射效应^[2]或者布儒斯特角附近分离偏振光束的多层介质薄膜^[3]。利用其自身所固有的小分开角度特性可以将天然双折射晶体制作成沃拉斯顿棱镜,然而天然双折射晶体需要足够的厚度才能分开两种偏振态,因此这种分束器受到天然双折射晶体特性的限制。多层介质膜结构的双折射特性比天然双折射晶体大几倍,这在很大程度上减小了偏振分束器的厚度,但是这种多层介质膜结构需要一层一层镀膜迭代,再经曝光、显影等工艺制作而成,工艺精度要求高,镀膜厚度要求严格;并且多层膜结构的偏振分束器的分束波长范围和角度范围选择狭窄,

收稿日期: 2016-09-01; 收到修改稿日期: 2016-09-13; 网络出版日期: 2016-12-20

作者简介: 张信祥(1991—),男,硕士研究生,主要从事光通信和光波技术方面的研究。E-mail: 15651813920@163.com

导师简介: 陈鹤鸣(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信与光波技术、光通信与光信息处理等方面的研究。

E-mail: chhm@njupt.edu.cn(通信联系人)

对电磁波的人射角度和入射波长要求较高。因此,综合来看传统材料的偏振分束器难以满足现代集成光子器件的需要。

光子晶体分束器是光通信中重要的组成部分,相比于传统的分束器,光子晶体分束器具有传输角度和结构可调节、尺寸较小、传输高效等特点。目前基于光子晶体的偏振分束器已得到广泛研究。2008年,朱桂新等^[4]提出了一种基于光子晶体波导定向耦合器的超微偏振分束器,由于未考虑反射,该分束器的透射率较低;2010年,郭浩等^[5]基于光波在直波导和复合结构光子晶体中的传播特性提出了一种三角晶格的光子晶体分束器,根据 TE 和 TM 模式光子禁带的位置彼此错开进行偏振分束,但是该分束器的波长选择范围比较小;2013年,周飞等^[6]根据不同禁带范围的特性,设计了一种光子晶体偏振分束器,其尺寸较小,透射率较高,但是 TM 波的消光比仅为 13.3 dB;2015年,贾亚俊等^[7]提出了一种基于光子晶体宽带全角超准直效应的 Y 型能量分束器,利用平直等频线实现了宽带全角超准直光传输。

本文提出了一种基于定向耦合结构的二维光子晶体偏振分束器,它由两个单模波导构成,通过调节两个单模波导的宽度可以改变耦合长度,从而实现偏振分束功能。利用 RSoft 软件分析了该分束器的结构参数与性能,结果表明,当分束器的晶格常数、空气孔半径、耦合长度等参数一定时,TE 和 TM 波的透射率都达到 90%以上,消光比分别达到 22.4 dB 和 18.2 dB。本文提出的偏振分束器具有透射率较高、消光比良好、尺寸较小、易于制作的优点。

2 结构设计及原理分析

首先选取无限长空气孔按照三角晶格周期性排列在 GaAs 材料的平板中,构成完整的二维光子晶体。结构参数选取如下:GaAs 材料的折射率为 3.38,空气的折射率为 1.00,空气孔(红色)的半径 $r=0.32a$,其中 a 为晶格常数,完整的光子晶体结构如图 1 所示。

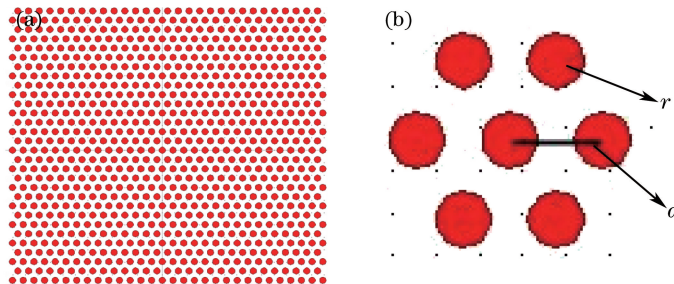


图 1 (a)完整的光子晶体结构;(b)局部视图

Fig. 1 (a) Complete photonic crystal structure; (b) local vision

在完整的光子晶体结构中,利用 RSoft 仿真软件中的 BandSolve 模块进行分析,结果如图 2 所示。从图中可以看到,TE 模存在光子禁带,其范围有两块区域,分别是 $0.209(a/\lambda) \sim 0.281(a/\lambda)$ 和 $0.598(a/\lambda) \sim 0.626(a/\lambda)$,其中 λ 为光在真空中传播的波长。选取 $0.209(a/\lambda) \sim 0.281(a/\lambda)$ 这一禁带范围,

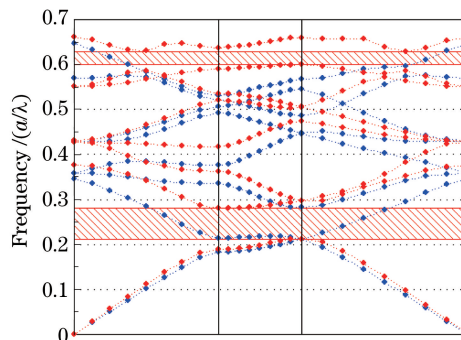


图 2 TE 模(红色)和 TM 模(蓝色)的带隙图

Fig. 2 Band diagram of TE (red) and TM (blue) modes

TM 在此范围内不存在光子禁带。

光子晶体偏振分束器结构示意图如图 3 所示,在完整光子晶体中沿着 ΓK 方向去掉两排空气孔,分别形成 TE 模和 TM 模的波导,两个波导之间由一排半径为 r_1 ($r_1 < r$) 的空气孔(黄色)相隔。在 $z=0$ 处,TE、TM 均在上波导传输。对于 TM 模,在耦合区内不存在光子带隙,但由于波导核心区的有效折射率比核心区两侧部分的平均折射率大^[7-8],满足全内反射条件,通过全内反射,TM 模可以在耦合区的下波导(TM 波导)中传输,从端口 B 输出。

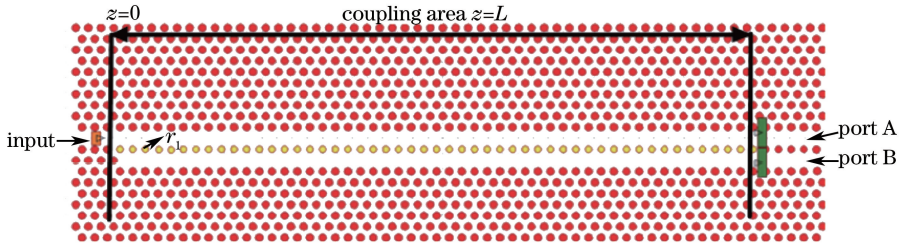


图 3 光子晶体偏振分束器结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of photonic crystal polarizing beam splitter

在 $z=0$ 处输入 TE 波,TE 波在耦合区将激发出多种模式,多个模式发生干涉会形成输入场的像和镜像,输入场的叠加光场分布 $\psi(x, z)$ 可以写成多个模式的叠加:

$$\psi(x, z) = \sum_{n=0}^{p-1} c_n \varphi_n(x) \exp(-j\beta_n z), \quad (1)$$

式中 c_n 为场激励系数, $\varphi_n(x) \exp(-j\beta_n z)$ 为传播常数 β_n 的模场, n 为导模的阶数, p 为模式数。在输出端 $z=L$ 处,由于各本征模产生不同的相移,叠加光场的分布为

$$\varphi(x, L) = \sum_{n=0}^{p-1} c_n \varphi_n(x) \exp(-j\beta_n L) = c_0 \varphi_0(x) \exp(-j\beta_0 L) + c_1 \varphi_1(x) \exp(-j\beta_1 L) + c_2 \varphi_2(x) \exp(-j\beta_2 L) + \dots \quad (2)$$

可见由于多个模式之间发生干涉,光场将形成新的分布,因此能量在空间的分布情况随相干长度而发生变化。采用平面波展开法计算光子晶体偏振分束器的色散曲线,结果如图 4(a)所示,图 4(b)为在归一化频率 $a/\lambda=0.278$ 处的放大图。在归一化频率 $a/\lambda=0.278$ 处,激发出奇模和偶模^[9-10],其传播常数 $k_1=k_2$ 。归一化频率 $a/\lambda=0.278$ 处是解耦合点,其耦合拍长 $L = \frac{\pi}{|k_1 - k_2|} = \infty$ 。因此 TE 模在耦合区域内没有能量转换,即 TE 模一直在上波导(TE 波导)传输,从端口 A 输出(会有极小部分的能量泄漏到 TM 波导中)。通过改变中间空气孔半径的大小,即改变两波导的距离,光场将形成新的分布,能量在空间的分布情况随相干长度发生改变。在解耦合点频率(即归一化频率 $a/\lambda=0.278$),设置晶格常数 a 的大小,可以改变工作波长。耦合区 $z=L$ 的相干长度随耦合区空气孔半径的增大而增大。

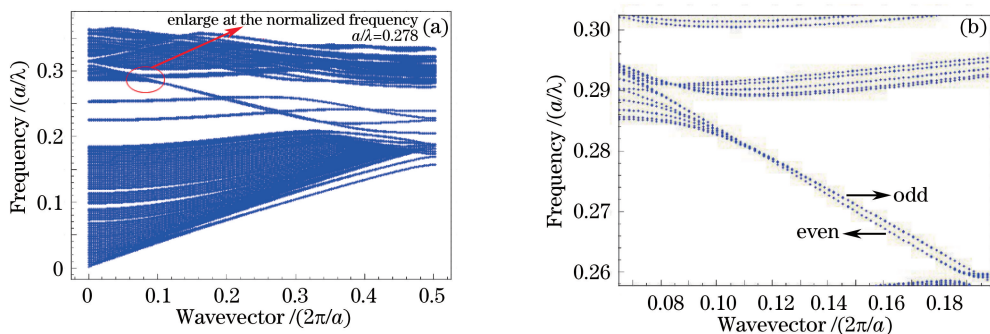


图 4 光子晶体偏振分束器的(a)色散曲线和(b)部分放大图

Fig. 4 (a) Dispersion curve and (b) a part of larged view of photonic crystal polarizing beam splitter

3 仿真结果与分析

利用 RSoft 软件中的 FullWave 模块,通过时域有限差分法模拟和计算电磁波在此结构中的传输特性及模场分布,在偏振分束器结构四周采用完全匹配层(PML)的吸收边界,PML 中设置 Width 为 Period $\times e$ 。选取晶格常数 $a = 0.43 \mu\text{m}$,归一化频率 $a/\lambda = 0.278$ 的高斯脉冲为入射光,则该归一化频率对应的波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$,是光通信窗口常用的波长。

采用时域有限差分法进一步计算上下端口透射率和偏振消光比。在输入端口放置一个探测器,在 TE 和 TM 的输出端口各放置一个探测器。将输出端口检测到的能量值进行归一化处理,得到准确的透射率。蓝线是输入端的能量,红线是端口 A 输出的能量,绿线是端口 B 输出的能量。

设置中间空气孔半径 r_1 依次为 $0.22a$ 、 $0.24a$ 、 $0.26a$,其耦合长度分别为 $L_1 = 35a$ 、 $L_2 = 41a$ 、 $L_3 = 49a$ 。当空气孔半径 r_1 为 $0.22a$ 时,TE 和 TM 模场分布图和时域稳态图如图 5 所示。从图 5(c)可以看出,在传输的过程中,TE 模会有大约 10% 的能量泄露到 TM 传输波导;从图 5(d)可以看出,TM 模在传输过程中约有 4% 的能量泄露到 TE 传输波导。

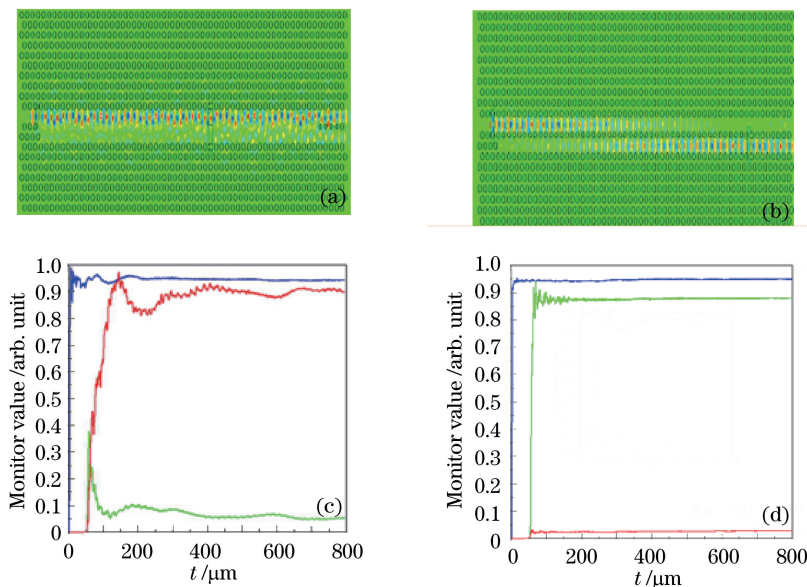


图 5 空气孔半径为 $0.22a$ 时,(a) TE 模场分布图;(b) TM 模场分布图;(c) TE 时域稳态图;(d) TM 时域稳态图

Fig. 5 (a) TE mode field distribution; (b) TM mode field distribution; (c) time domain steady state diagram of TE mode; (d) time domain steady state diagram of TM mode with air hole radius of $0.22a$

当空气孔半径 r_1 为 $0.24a$ 时,TE 和 TM 模场分布图和时域稳态图如图 6 所示。从图 6(c)可以看出,在传输过程中,TE 模会有大约 5% 的能量泄露到 TM 传输波导;从图 6(d)可以看出,TM 模在传输过程中泄露的能量已经很少。

当空气孔半径 r_1 为 $0.26a$ 时,TE 和 TM 模场分布图和时域稳态图如图 7 所示。从图 7(c)可以看出,TE 在端口 A 的透射率约为 93.8%,在端口 B 的透射率约为 1.4%;从图 7(d)可以看出,TM 在端口 A 的透射率约为 94.6%,在端口 B 的透射率约为 0.53%。此时 TE 模和 TM 模泄露的能量都已经很少。

从上述仿真结果可以得到,空气孔半径 r_1 增大,耦合长度变大,TE 模和 TM 模透射效率增强,损耗降低。当空气孔半径 r_1 为 $0.26a$,耦合长度为 $49a$ 时,TE 模和 TM 模的透射效率达到了最高值。此时 TE 模光波由于模简并,相干长度为无穷大,一直沿着原输入的方向进行传播,能量局限在上波导内,不会随着传播距离的改变转移到下波导中,最终可以低损耗地在端口 A 输出;TM 模光波由于在波导中产生了耦合作用,光波传输 $49a$ 的距离后能量耦合到下波导中,将在端口 B 输出。计算空气孔半径 r_1 为 $0.26a$ 、耦合长度为 $49a$ 时的偏振消光比,端口 A 和端口 B 的偏振消光比分别定义为

$$\eta_A = 10\log(T_{TE}^A/T_{TM}^A), \quad (3)$$

$$\eta_B = 10\log(T_{TM}^B/T_{TE}^B), \quad (4)$$

式中 T_{TE}^A 、 T_{TE}^B 和 T_{TM}^A 、 T_{TM}^B 分别为 TE 偏振态和 TM 偏振态下端口 A 和端口 B 的透射率。可计算出端口 A 的偏振消光比达到 22.4 dB, 端口 B 的偏振消光比达到 18.2 dB。

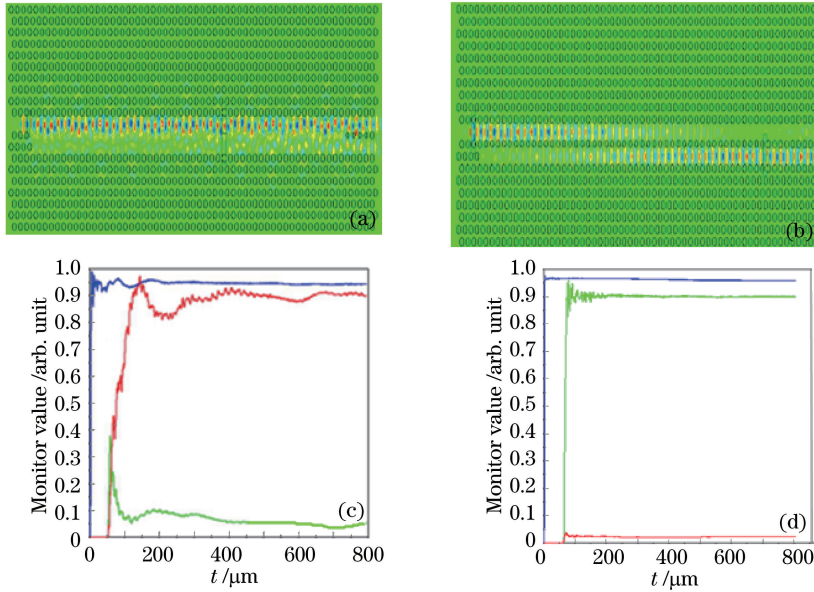


图 6 空气孔半径为 $0.24a$ 时, (a) TE 模场分布图; (b) TM 模场分布图; (c) TE 时域稳态图; (d) TM 时域稳态图

Fig. 6 (a) TE mode field distribution; (b) TM mode field distribution; (c) time domain steady state diagram of TE mode; (d) time domain steady state diagram of TM mode with air hole radius of $0.24a$

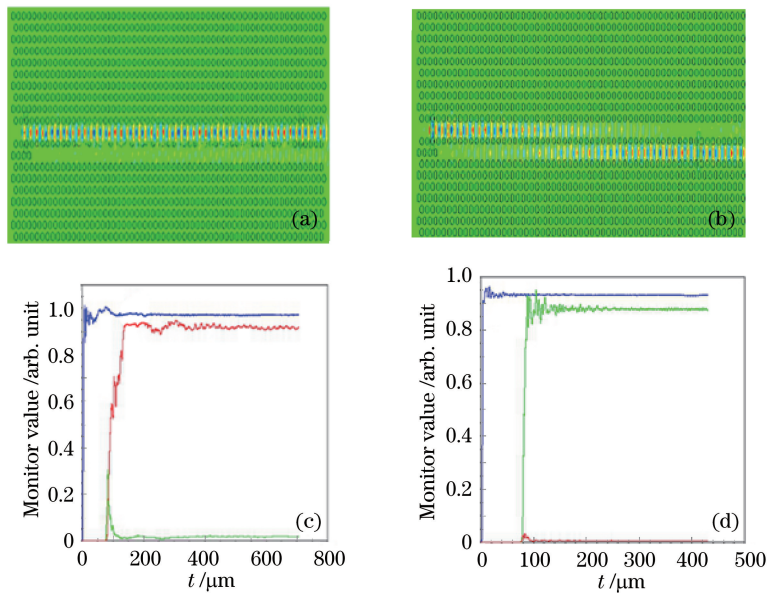


图 7 空气孔半径为 $0.26a$ 时, (a) TE 模场分布图; (b) TM 模场分布图; (c) TE 时域稳态图; (d) TM 时域稳态图

Fig. 7 (a) TE mode field distribution; (b) TM mode field distribution; (c) time domain steady state diagram of TE mode; (d) time domain steady state diagram of TM mode with air hole radius of $0.26a$

4 结 论

提出了一种基于二维光子晶体的偏振分束器, 可以对 TE 和 TM 中的某一分量进行完全过滤, 通过设置中间波导半径 r_1 , 进一步优化耦合长度, 可以同时为 TE 和 TM 的透射率提高到 90% 以上, 消光比分别达到 22.4 dB 和 18.2 dB。本文设计的基于二维光子晶体的偏振分束器结构简单紧凑, 传输效率高, 尺寸较小 (仅 $25.8 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$), 易于集成。

参 考 文 献

- [1] Shen X P, Han K, Li H P, *et al.* Polarization beam splitter for self-collimated beams in photonic crystals[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(3): 1737-1741.
沈晓鹏, 韩 奎, 李海鹏, 等. 光子晶体自准直光束偏振分束器[J]. *物理学报*, 2008, 57(3): 1734-1741.
- [2] Wong G, Pilkington R, Harvey A R. Achromatization of Wollaston polarizing beam splitters[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(8): 1332-1334.
- [3] Zhang Yueguang, Sheng Yongjiang, Ai Manling, *et al.* Wideband and wide angle polarizing beam splitter[J]. *Optical Instruments*, 2001, 23(6): 198-201.
章岳光, 盛永江, 艾曼灵, 等. 宽波段宽角度偏振分束薄膜[J]. *光学仪器*, 2001, 23(6): 198-201.
- [4] Zhu Guixin, Yu Tianbao, Chen Shuwen, *et al.* A new ultracompact polarizing beam splitter based on photonic crystal directional coupler[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(3): 450-454.
朱桂新, 于天宝, 陈淑文, 等. 一种新型光子晶体波导定向耦合型超微偏振光分束器[J]. *光子学报*, 2010, 39(3): 450-454.
- [5] Guo Hao, Wu Ping, Yu Tianbao, *et al.* Design of novel polarization beam splitter in two-dimensional photonic crystal [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(8): 5547-5552.
郭 浩, 吴 评, 于天宝, 等. 一种新型的光子晶体偏振光分束器的设计[J]. *物理学报*, 2010, 59(8): 5547-5552.
- [6] Zhou Fei, Fei Hongming, Chen Zihui, *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.
- [7] Jia Yajun, Liang Wenyao, Chen Wuhe. Study on Y-shape power splitters based on broadband and all-angle supercollimation effect of photonic crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(11): 1116002.
贾亚俊, 梁文耀, 陈武喝. 基于光子晶体宽带全角超准直效应的 Y 型能量分束器的研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(11): 1116002.
- [8] Wu Liheng, Wang Minghong. Reflecting splitter based on photonic crystal U-shaped resonators [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(2): 022301.
吴立恒, 王明红. 带有光子晶体 U-型谐振器的反射式分束器[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(2): 022301.
- [9] Li Xuyou, Xu Zhenlong, Liu Pan, *et al.* Short polarization splitter based on dual-core photonic crystal fiber with ultra-high extinction ratio[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(6): 0605006.
李绪友, 许振龙, 刘 攀, 等. 短长度超高消光比双芯光子晶体光纤偏振分束器[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0605006.
- [10] Liu Yunfeng, Liu Bing, He Xingdao, *et al.* Study on splitting management characteristics of ring resonance cavity based on photonic crystal waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(s1): s113001.
刘云凤, 刘 彬, 何兴道, 等. 基于光子晶体波导环形共振腔的分束管理特性研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(s1): s113001.