

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

贾亚俊 梁文耀* 陈武喝

华南理工大学物理与光电学院, 广东 广州 510640

摘要 研究了具有二重旋转对称性的椭圆介质柱光子晶体的宽带全角超准直色散特性及其在分束器方面的应用。利用平面波展开法计算其色散关系,发现该类结构的TE偏振模式在较宽的带宽内存在跨越整个第一布里渊区的平直等频线,利用这些平直等频线实现了宽带全角超准直光传输。在此基础上设计了一种Y型能量分束器,时域有限差分(FDTD)仿真结果表明,该分束器对内置二维点光源和高斯光源均具有很好的分束性能。以上研究在光子器件集成、定向耦合等领域具有潜在的应用价值。

关键词 材料; 光子晶体; 对称性; 超准直效应; 能量分束器

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1116002

Study on Y-shape Power Splitters Based on Broadband and All-Angle Supercollimation Effect of Photonic Crystals

Jia Yajun Liang Wenyao Chen Wuhe

School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China

Abstract The broadband all-angle super collimation dispersion properties of two-dimensional (2D) elliptical photonic crystal structures with two-fold rotational symmetry and its applications in power splitters are studied. Its dispersion relation is calculated by the plane wave expand method. The calculated results show that there exist straight-like equi-frequency lines spanning over the whole first Brillouin zone within a relative broad band for TE polarization. These straight-like equi-frequency lines are used to realize broadband all-angle super collimation transmission. Based on the above results, one kind of Y-shape power splitter is designed. Finite-difference Time-domain simulations reveal that this Y-shape splitter has good performance for 2D point source and Gaussian source. The above results have great potential in photonic devices integration and directional coupling.

Key words materials; photonic crystals; symmetry; super-collimation effect; power splitters

OCIS codes 160.5298; 120.1680; 230.1360

1 引言

随着科技的飞速发展,电子基本属性的限制使得电子器件的性能发展已经接近极限,遭遇到“瓶颈效应”。而光具有超宽带宽、高速和互不干扰等独特的优点,这使得光子作为信息载体比电子更具优势,可利用光子实现高密度通道交互传输及并行处理,同时还有更多可利用的资源,如振幅、相位、频率等。因此,人们渴望获得可以灵活操控光子的新材料和新结构,以实现梦寐以求的光子计算机、全光通讯网络。光子晶

收稿日期: 2015-08-10; 收到修改稿日期: 2015-09-30

基金项目: 国家自然科学基金(11504114, 11247253)、中央高校基本科研业务费专项资金(2015ZZ056)、华南理工大学教研教改项目(Y1141830)和第二批探索性实验教学项目(Y1150620)、华南理工大学——工业和信息化部电子第五研究所大学生校外创新实践基地项目

作者简介: 贾亚俊(1990—),男,硕士研究生,主要从事光子晶体方面的研究。E-mail: 957767227@qq.com

导师简介: 陈武喝(1963—),男,博士,副教授,主要从事光子晶体和非线性光学的研究。E-mail: chenwuhe@scut.edu.cn

***通信联系人。** E-mail: liangwenyao@scut.edu.cn

体是由介质或金属周期性排列而成的新型人工材料^[1-2],能够在光波长尺度上灵活操控光子^[3],被誉为光子学中的“半导体”,在基础研究和未来的全光网络应用方面具有广阔的应用前景。

光子晶体具有许多独特的性质如光子带隙^[4]、光子局域^[5-6],以及负折射^[7]、超准直^[8]、超棱镜效应^[9]等反常色散效应,根据这些性质,人们研究并设计了各种各样的功能器件,如光开关^[10]、光耦合器^[11]、波分复用器^[12]、滤波器^[13]和光分束器^[14-21]等。其中,光分束器是光通讯和光集成中不可或缺的重要光学器件。目前,基于光子晶体的光分束器实现机制主要有两种:1)是基于线缺陷或耦合腔光子晶体波导设计^[16-17],利用波导模传导光波,其工作带宽较窄并且位于缺陷模附近;2)是基于光子通带的反常色散效应如负折射、超准直等^[18-19]。其中,超准直是利用色散曲面的平坦部分实现光子晶体内部的无衍射导光,与波导型导光机制相比,具有带宽大、无需精确耦合两大优点,因此被广泛应用于设计各种光子器件^[20-21]。

本文提出了一种具有二重旋转对称性的二维光子晶体结构,研究发现该类结构在较宽范围内存在平直的等频线,它们可用于产生全角超准直光传输。在上述基础上,进一步设计了一种能量分束器件,分别研究了高斯光源和内置点光源(即二维线光源)两种入射情况的分束性能。时域有限差分(FDTD)计算结果表明,该类分束器具有优越的能量分束性能。

2 光子晶体结构及其色散特性分析

本文以二维光子晶体为对象研究其宽带超准直传输特性,并进一步设计Y型能量分束器。由于结构对称性和全角超准直效应存在密切联系,选取具有二重旋转对称性的椭圆介质柱光子晶体进行研究,其结构见图1(a)。这是按二维正方晶格排列的椭圆硅介质柱阵列,介质柱在Z方向为无限长,背景为空气,其折射率为1,晶格常数为 a 。由于介质柱为椭圆柱,这使得整个结构具有二重旋转对称性,这将影响结构能带分布的对称性,后面将进一步分析。假定椭圆硅柱为无损弱色散材料,其介电常数在1550 nm附近为 $\epsilon_r = 11.56$,其长短轴 L_a 和 L_b 分别平行于X轴和Y轴,比值为 $\rho = L_a/L_b$ 。本文仅考虑TE偏振(即电场//介质柱)的情况。

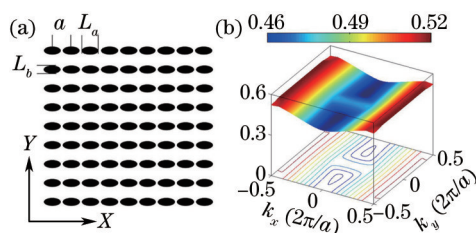


图1 (a)光子晶体结构图;(b) TE偏振第四个能带面

Fig.1 (a) Photonic crystal structure; (b) the 4th band surface for TE polarization

分析了上述光子晶体结构的色散关系。在前期研究中发现,当 $L_a=0.9a$ 和 $\rho=2.1$ 时,光子晶体结构存在较宽的超准直带宽^[22],故本文选择该组参数进行研究,此时短轴为 $L_b = L_a/\rho=0.43a$,利用平面波展开法计算了该结构TE偏振在整个第一布里渊区的色散关系,图1(b)是TE偏振的第四个能带面。可以看出,该能带面表现为二重旋转对称性。其原因分析如下:尽管正方晶格具有四重旋转对称性,但是其椭圆柱格点使得该结构从整体上表现为二重旋转对称性,从而导致能带也具有相应的二重旋转对称性。由图1(b)还可看出,该能带面具有强烈的各向异性,而且存在跨越整个第一布里渊区(沿 k_y 方向)的平坦区域,该平坦区域具有独特的性质,下面将作进一步讨论。

由图1(b)中 k_x-k_y 平面上的等频线可以看出,在与平坦区域对应的 $0.47\sim 0.5(2\pi/a)$ 归一化频率范围内,对应的等频线几乎为直线。这些平直的等频线能够用于实现超准直效应。对于周期性无损、无色散介质中传播的电磁波,其能量速度方向和群速度方向是一致的^[23]。由群速度公式 $\mathbf{v}_g = \nabla_k \omega(\mathbf{k})$ 可知,电磁波在光子晶体内部将沿等频线的梯度方向传输。在上述平坦区域的频率范围内,由于等频线接近直线,电磁波在传输过程中几乎不会扩散,将形成超准直传输效应。为了验证上述预测,利用二维FDTD方法模拟高斯光束从空气入射到光子晶体的传播现象。对于频域,选择归一化频率范围的中间频率0.49为例进行计算;在角度域,以 0° 、 30° 和 60° 三个代表性入射角度为例演示全角超准直传输现象。

图2(b)~(d)分别给出了 0° 、 30° 和 60° 入射时的能流分布,为统一起见,图中已将能流数据对计算区域内的

最大值进行了归一化并取对数(后文的能流分布图均按此方法处理)。可以看出,无论入射角是 0° 、 30° 和 60° ,在光子晶体内部被激发的布洛赫波在三个角度都很好地被限制在 X 方向形成高质量的定向传输光束。从图2中还可以看出,入射光和反射光在空气中形成干涉,并且 60° 时的反射远大于 0° 和 30° 入射时的反射。这是由于大角度入射所造成的,由Fresnel公式很容易理解该现象。可以预见,即使入射角度进一步增大到接近 90° 时,仍可产生超准直传输效应,只是反射率会进一步增加。这表明该结构可用于实现宽带全角超准直光传输。为了增强透射率以提高准直效率,可以采用表面修饰或者阻抗匹配的方法进一步减少界面反射造成的能量损失^[24-25],这超出了本文的讨论范围,在此不再赘述。

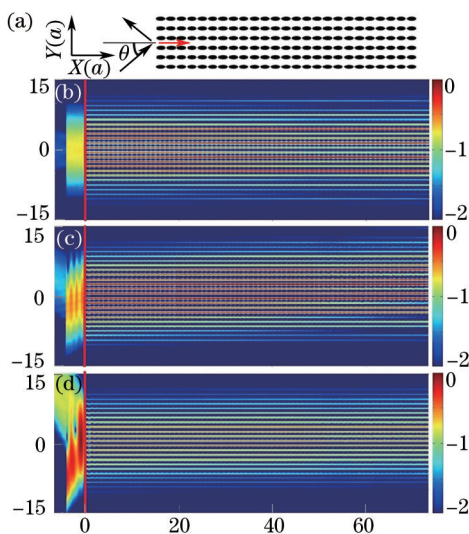


图2 (a) 高斯光入射示意图;(b)~(d) 0° 、 30° 和 60° 入射情况下的稳态能流分布

Fig.2 (a) Schematic diagram for Gaussian light incidence; (b)~(d) Stable power flow distributions for $\theta=0^\circ$, 30° and 60°

3 Y型能量分束器的设计及性能分析

在前面研究中讨论了超准直效应的机理和特点,并通过FDTD仿真验证了椭圆介质柱光子晶体的超准直传输特性。上述的宽带全角超准直效应对控制光束的传播和设计各种光子集成器件具有重要意义,例如可用于设计光路、无缺陷波导和光分束器等。下面以椭圆介质柱光子晶体为基础,设计一种紧凑、高效的Y型能量分束器。如图3(a)所示,Y型分束器结构由两个具有前述结构参数的光子晶体组成,它们的椭圆介质柱长轴分别与 X 轴成 $+45^\circ$ 和 -45° ,形成 90° 夹角的Y型分束器。下面分为二维点光源(即线光源)和高斯光源入射两类情况研究该光分束器的性能。

3.1 二维点光源情况

根据点光源位置不同,可进一步细分为外置和内置两种情况,下面对此进行讨论。首先考虑内置点光源情况,如图3(a)所示,在光分束器的内部挖去两个介质柱用于放置二维点光源,并分别在上下对称位置放置两根相同的探测线 L_1 、 L_2 ,分别用于探测上、下两路光束的能量值 P_1 、 P_2 。利用二维FDTD方法研究内置点源情况的分束器性能,选择 0.47 、 0.48 、 0.49 和 $0.5(2\pi/a)$ 4个代表性频率进行进行仿真计算,图3(b)~(e)是相应的能流分布图。

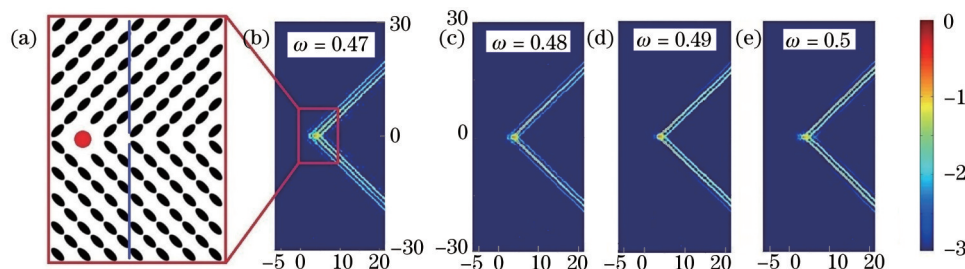


图3 (a) Y型分束器结构;(b)~(e): 0.47 、 0.48 、 0.49 、 $0.5(2\pi/a)$ 的稳态能流分布

Fig.3 (a) Y-shape splitter structure; (b)~(e) Stable power flow distributions for 0.47 , 0.48 , 0.49 and $0.5(2\pi/a)$

由图3(b)~(e)可以看出,该分束器对于内置点源来说具有很好的分束效果。在超准直频率范围内,点源耦

射的电磁波被分成了夹角为 90° 的两束光,它们分别沿着两个光子晶体的椭圆介质柱长轴方向传输,形成稳定的定向光束。注意到不同频率下该分束器的能量分布有所不同,这是由于不同频率的光会激发不同的布洛赫模而导致的。从图3(b)~(e)还可发现,光子晶体内部没有后向散射和其他方向的能量损耗,原因是光子晶体内部的多重布拉格散射造成的部分光子带隙使得电磁波无法沿这些方向传输。探测条 L_1 、 L_2 探测到0.47、0.48、0.49和0.5归一化频率的分光比 P_1/P_2 的值依次为1.04、0.995、0.992和0.999,这表明在0.47~0.5($2\pi/a$)带宽内该能量分束器的分束比接近于1:1。可见该Y型分束器在准直带宽内对点源有很好的分束效果。

下面讨论点光源外置的情况。图4为0.48($2\pi/a$)频率下外置点光源的FDTD模拟结果,从图4可以看出。进入光子晶体内部的光波仍存在分束效果,但是总体透射效率较低。这是由于点光源向周围空间均匀辐射光波,当光源外置时,只有一部分光波入射到空气-光子晶体界面上,而且大角度入射的光很大程度上被反射,其中入射到界面上的光波仅部分能够有效耦合进入光子晶体中形成分束传输。综合上述讨论可得出结论:该分束器对于内置光源情况具有优越的分束性能,其能量几乎100%向前传输;但对于外置点光源而言尽管仍存在分束效应,但透射率较低,导致点光源外置时分束性能较差。

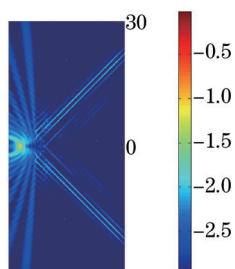


图4 外置点光源情况,以0.48($2\pi/a$)归一化频率为例

Fig.4 Stable power flow distribution at 0.48($2\pi/a$) in external point source case

3.2 高斯光源入射情况

下面讨论高斯光源从空气入射到分束器的情况。分束器的结构与点源采用的结构类似,只是此时不再需要去掉介质柱以放置点源。为了更全面地探讨分束器的性能,在频域选取0.47、0.48、0.49和0.5这4个归一化频率,同时在角度域选取 0° 、 20° 、 40° 和 60° 这4个代表性入射角度为例研究高斯光源入射时的Y型分束器性能。以上对频域和角度域的选取足以分析超准直带宽范围内分束器的分束效果。在进行FDTD计算时,选择腰宽为 $6a$ 的高斯光束入射,并始终令不同入射角度的光入射到空气-光子晶体界面的中心处,以保证其分束效果。与点源情况类似采用探测条 L_1 、 L_2 探测分束后的上、下两束光的能量值 P_1 、 P_2 ,上、下光束的分光比为 P_1/P_2 。图5~图8为4个频率下 0° 、 20° 、 40° 和 60° 入射下的稳态能流分布。

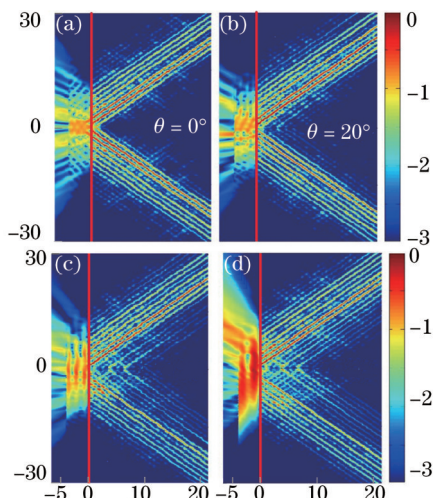


图5 $\omega=0.47$ 时,入射角 θ 为 0° 、 20° 、 40° 和 60° 的稳态能流分布图

Fig.5 Stable power flow distributions for $\theta = 0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$ and 60° at $\omega=0.47$

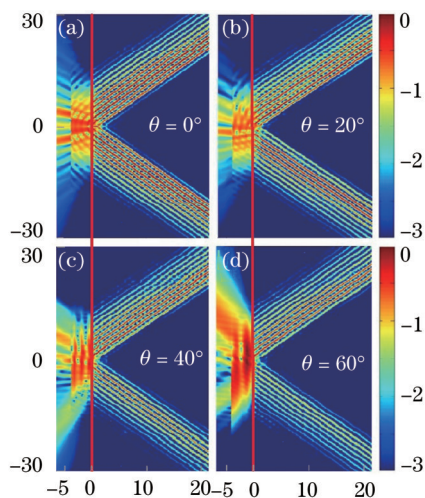


图6 $\omega=0.48$ 时,入射角 θ 为 0° 、 20° 、 40° 和 60° 的稳态能流分布图

Fig.6 Stable power flow distributions for $\theta = 0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$ and 60° at $\omega=0.48$

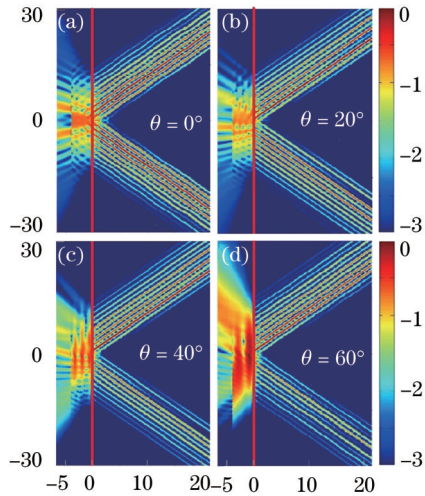


图7 $\omega=0.49$ 时,入射角 θ 为 0° 、 20° 、 40° 和 60° 的稳态能流分布图

Fig.7 Stable power flow distributions for $\theta = 0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$ and 60° at $\omega=0.49$

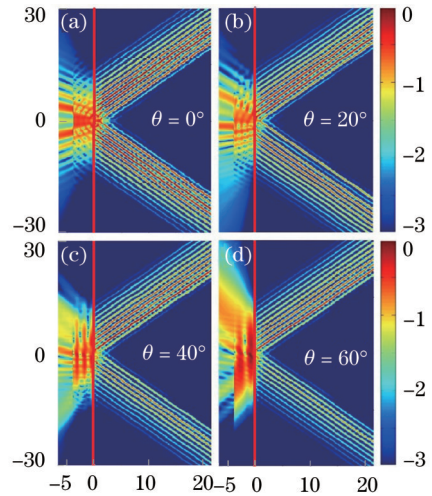


图8 $\omega=0.5$ 时,入射角 θ 为 0° 、 20° 、 40° 和 60° 的稳态能流分布图

Fig.8 Stable power flow distributions for $\theta = 0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$ and 60° at $\omega=0.5$

由图5~图8可看出,所有代表性频率的电磁波在4个角度都很好地被限制在与X轴成 $\pm 45^\circ$ 的方向传输,并形成高质量的定向光束。结合能量分布分析频域情况,可看出0.48、0.49、0.5($2\pi/a$)的分束效果明显好于0.47($2\pi/a$)的效果,原因分析如下:结合图1(b)可知0.47($2\pi/a$)位于全向超准直带宽的下带边,等频线不是完全的直线,弯曲程度相对其他三个频率稍大,此时椭圆介质柱的散射相对较强,从而使得该频率处的超准直传输效应不如另外三个代表性频率。在角度域分析方面,4个代表性角度均有很好的分束效果,在光子晶体内部传输过程中几乎没有扩散。入射光和反射光在空气中形成干涉,并且入射角度越大,反射越强。这也是由于大角度入射所造成的,由Fresnel公式很容易理解该现象。

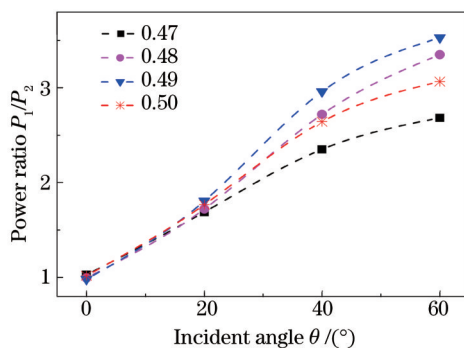
进一步研究该分束器的分光比随频率和入射角度 θ 的变化规律。表1为4个频率不同入射角度的上、下两束光的能量值 P_1 、 P_2 和相应的分光比 P_1/P_2 。可以看出,不同频率在相同入射角下的透射能量(P_1+P_2)不同,这是因为不同频率的高斯光源激发光子晶体内部不同的布洛赫模式,而不同的布洛赫模与空气的电磁模式耦合效率不同,从而导致上述现象。值得指出的是,随着 θ 增大,上面光束的能量 P_1 先增大到某一最大值,然后再逐渐减小,而下面光束的能量一直呈现减小的趋势,总透射能量(P_1+P_2)开始是缓慢减小,当 θ 增大到一定程度时迅速减小。图9为4个频率的分光比随入射角度变化的曲线。可看出当 $\theta=0^\circ$ 时,4个频率的分光比均接近1:1,而当 θ 增大时,上、下光束的分光比迅速增加,而且在 $0^\circ\sim 40^\circ$ 范围内接近线性变化。以上研究表明该分束器对高斯光源有很好的分束效果。

表1 高斯光源在 0° 、 20° 、 40° 和 60° 入射下 P_1 、 P_2 值及 P_1/P_2 值

Table 2 P_1 , P_2 and P_1/P_2 in Gaussian source case at $\theta=0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$ and 60°

Incident angle θ		0°	20°	40°	60°
0.47	P_1	2.249	2.653	2.116	1.014
	P_2	2.188	1.571	0.9	0.378
	P_1/P_2	1.028	1.689	2.351	2.683
0.48	P_1	3.386	4.001	2.588	1.276
	P_2	3.403	2.325	0.951	0.381
	P_1/P_2	0.995	1.721	2.721	3.35
0.49	P_1	3.323	4.249	3.265	1.482
	P_2	3.388	2.353	1.103	0.42
	P_1/P_2	0.981	1.806	2.96	3.529
0.50	P_1	3.252	3.438	2.721	1.533
	P_2	3.193	1.946	1.03	0.5
	P_1/P_2	1.018	1.767	2.642	3.066

综合上述讨论可知,本文设计的Y型分束器对于内置点光源和高斯光源入射情况均有良好的分束性能。由于本文主要以模型设计和理论分析为主,在后期研究中将考虑与实验相结合,进一步从实验角度研究该类光子晶体结构的超准直传输特性及分束性能,为拓展其应用提供参考。

图9 不同归一化频率下分束比 P_1/P_2 与入射角的关系Fig.9 Relation between P_1/P_2 and incident angles at different normalized frequencies

4 结 论

研究了具有二重旋转对称性光子晶体的宽带全角超准直传输现象,发现该结构在 $0.47\sim 0.5(2\pi/a)$ 频率范围内的等频线几乎为直线,它们可用于实现超准直效应。FDTD 仿真结果表明该结构可以在上述频率范围内实现全角超准直光传输。根据这些性质,设计出了一种 Y 型能量分束器。研究发现,不论是内置点源辐射还是高斯光源入射,该分束器均具有很好的分束效果,正入射时两种入射情况均可得到 1:1 的能量分束比;特别地,对于高斯光源入射的情况,在 $0^\circ\sim 40^\circ$ 入射角度范围内,上、下光束的分光比接近线性变化,这些性质有助于拓展该分束器的应用。设计的基于超准直效应的光分束器具有紧凑、宽带和易于集成等优点,在光子集成等领域具有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- 1 Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059.
- 2 John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(23): 2486.
- 3 Wang Xianwang, Zhang Wei, Han Jintao, *et al.*. Investigation of structure design and transmission characteristic of GeSbSe photonic crystal waveguides[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0105001.
王贤旺, 张 巍, 韩金涛, 等. GeSbSe 光子晶体波导结构设计及传输特性研究[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0105001.
- 4 Cao Y, Li J. Complete band gaps in one-dimensional photonic crystals with negative refraction arising from strong chirality[J]. Phys Rev B, 2014, 89(11): 115420.
- 5 Wang X, Chen Z. Beam control and multi-color routing with spatial photonic defect modes[J]. Opt Express, 2009, 17(19): 16927-16932.
- 6 Ma Ji, Wu Xiangyao, Liu Xiaojing, *et al.*. Research on the absorption property of defect layer in photon crystals[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0306002.
马 季, 吴向尧, 刘晓静, 等. 光子晶体缺陷层吸收特性的研究[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0306002.
- 7 Xia F, Yun M, Liu M, *et al.*. Negative refraction and subwavelength imaging in a hexagonal two-dimensional annular photonic crystal [J]. J Appl Phys, 2013, 113(1): 013109.
- 8 Liang W Y, Chen W H, Yin M, *et al.*. Highly efficient beam combiner based on the super-collimation effect in photonic crystals with elliptical rods[J]. J Opt, 2014, 16(6): 065101.
- 9 Liang W Y, Liu X M, Yin M. Large-angle beam splitter with sensitive adjustable power ratio based on superprism effect[J]. J Phys D: Appl Phys, 2013, 46(49): 495109.
- 10 Li Lei, Liu Guiqiang, Chen Yuanhao. An optical switch based on coupled heterostructure photonic-crystal waveguides[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0123002.
黎 磊, 刘桂强, 陈元浩. 光子晶体异质结构耦合波导光开关[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0123002.
- 11 Zhang X, Subbaraman H, Hosseini A, *et al.*. Highly efficient mode converter for coupling light into wide slot photonic crystal waveguide [J]. Opt Express, 2014, 22(17): 20678-20690.
- 12 Zhou Wen, Chen Heming. Mode division multiplexing of two-dimensional triangular lattice photonic crystal based on magneto-optical effect[J]. Acta Phys Sin, 2015, 64(6): 064210.
周 雯, 陈鹤鸣. 基于磁光效应的二维三角晶格光子晶体模分复用器 [J]. 物理学报, 2015, 64(6): 064210.

- 13 He Zhiyu, Jiao Hongfei, Cheng Xinbin, *et al.*. Design of reflective multichannel filter based on characteristics of photonic band gap[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0231002.
贺芝宇, 焦宏飞, 程鑫彬, 等. 基于光子晶体带隙特性的反射式多通道滤光片设计[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0231002.
- 14 Jiang B, Zhang Y, Wang Y, *et al.*. Self-collimated 1×2 TM-polarized beam splitter based on photonic crystal surface mode [J]. *Opt Commun*, 2014, 310: 114~119
- 15 Jia W, Deng J, Wu H, *et al.*. Design and fabrication of high-efficiency photonic crystal power beam splitters[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(20): 4077-4079.
- 16 Zhang L L, Li Q, Wang Q. 1-to-N beam splitter based on photonic crystal branched waveguide structure[J]. *Opt Laser Technol*, 2011, 43(7): 1325-1330.
- 17 Sesay M, Jin X, Ouyang Z B. Design of polarization beam splitter based on coupled rods in a square-lattice photonic crystal[J]. *J Opt Soc Am B*, 2013, 30(8): 2043-2047.
- 18 Mocella V, Dardano P, Moretti L, *et al.*. A polarizing beam splitter using negative refraction of photonic crystals[J]. *Opt Express*, 2005 13(19): 7699-7707.
- 19 Shen Y F, Wang Y C, Wu F F, *et al.*. A tunable power splitter based on modes coupling and self-collimation effect in two-dimensional photonic crystals [J]. *Opt Commun*, 2012, 285(12): 2846-2850.
- 20 Li Rongmin, Cao Ye, Tong Zhengrong. Short length polarization splitter based on dual elliptical-core photonic crystal fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(10): 1005004.
李荣敏, 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.
- 21 Cao Ye, Cui Danning, Tong Zhengrong, *et al.*. Dual-core photonic crystal fiber polarization splitter based on tellurite glass[J]. *Chinese J 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.
- 22 Liang W Y, Wang T B, Yin C P, *et al.*. Super-broadband non-diffraction guiding modes in photonic crystals with elliptical rods [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2010, 43(7): 075103
- 23 Kosada H, Kawashima T, Tomita A, *et al.*. Superprism phenomena in photonic crystals [J]. *Phys Rev B*, 1998, 58(16): 10096-10099.
- 24 Witzens J, Hochberg M, Baehr J T, *et al.*. Mode matching interface for efficient coupling of light into planar photonic crystals [J]. *Phys Rev E*, 2004, 69(4): 046609.
- 25 Park J M, Lee S G, Park H Y, *et al.*. Efficient beaming of self-collimated light from photonic crystals [J]. *Opt Express*, 2008, 16(25): 20354-20367.

栏目编辑: 张浩佳