

基于光子晶体波导环形共振腔的分束管理特性研究

刘云凤 刘 彬* 何兴道 李 翔 钱佳成 龚 强

南昌航空大学测试与光电子工程学院, 江西省光电检测技术工程实验室, 江西 南昌 330063

摘要 提出一种基于正方晶格二维光子晶体波导环形共振腔结构。通过有限元分析方法数值模拟其传输特性, 研究发现, 通过改变环形共振腔内可调介质柱的结构参数, 可以有效地调节共振腔的共振频率; 并根据共振腔不同的共振模式可以设计出多通道输出的分束器, 实现了良好的带通滤波和分束特性。以 1×2 的分束器为例, 通过改变共振腔内可调介质柱结构参数, 可以实现对各端口的输出光强的有效调制。此特性在全光网络中具有一定的潜在应用价值。

关键词 光子晶体; 有限元法; 共振腔; 分束器

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.s113001

Study on Splitting Management Characteristics of Ring Resonance Cavity Based on Photonic Crystal Waveguide

Liu Yunfeng Liu Bin He Xingdao Li Xiang Qian Jiachen Gong Qiang

Jiangxi Engineering Laboratory for Optoelectronics Testing Technology, School of Measuring and Optical Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China

Abstract A kind of waveguide ring resonator structures based on two-dimensional square lattice photonic crystal is reported. The transmission characteristics are researched by finite element method numerical simulation. The results show that by changing the structural parameters of adjustable rods in ring cavity, the resonance frequency of resonance cavity can be effectively adjusted, and according to the different resonance modes of the resonance cavity, a good band-pass filter and beam splitting characteristics are achieved. As an example with a 1×2 beaming splitter, by changing the structure parameters of adjustable rods in ring cavity regularly, the intensity modulation to each port output light can be realized. This feature has certain potential application value in the all-optical network.

Key words photonic crystal; finite element method; resonance cavity; beam splitter

OCIS codes 130.5296; 230.4555; 230.1360

1 引 言

光子晶体^[1-2]的概念首先是由 Yablonovitch 及 John 在 1987 年各自独立提出, 是介电常数在空间呈周期性变化的人工微晶结构, 利用晶体中折射率呈空间周期分布产生的光子带隙结构^[3-5]特性以及在光子晶体中引入缺陷后对光的局域特性来控制光子行为。光子较电子而言具有电子器件无法比拟的优势, 吸引了大批科研人员的关注。现阶段, 在光子晶体光纤^[6-10]、光子晶体发光二极管^[11-12]、光子晶体滤波器、耦合器以及分束器等^[13-18]等各个领域都有一定的研究成果。其中分束器作为未来全光网络中必不可少的组件, 因此对前人的工作加以借鉴和改善, 提出了一种新型有效的可控光强分束结构, 该器件具有结构简单、体积小、

收稿日期: 2015-01-10; 收到修改稿日期: 2015-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(61205119, 11104128)

作者简介: 刘云凤(1992-), 女, 硕士研究生, 主要从事光子晶体的理论研究。E-mail: 441949335@qq.com

导师简介: 何兴道(1963-), 男, 博士, 博士生导师, 主要从事激光散射光谱学, 光全息与信息处理等方面的研究。

E-mail: xingdaohe@126.com

* 通信联系人。E-mail: liubin_d@126.com

透射性能好、调制简便、便于制作等诸多优点。

对光子晶体常见的数值分析法中,目前最常用的方法有:平面波展开法^[19-20]、多重散射法^[21]、有限差分法^[22-23]、有限元法^[24-26]等。平面波展开法在处理有限长度或非周期系统时,分析光子晶体非常繁琐。多重散射法对高和低填充率的极端情况具有更好的收敛速度,显然在光子晶体中的运算结果准确度不高。而有限差分法适用于任何复杂的界面,但是运算速度比较慢。在文献[26]中,作者把有限元法、平面波展开法和有限差分法这3种分析方法做了详细的对比分析,阐述了有限元方法同时拥有他们所具备的优点,适用于任意非周期结构,计算结果精确,综合比较后采用了有限元的方法对提出的结构进行数值模拟和分析。

2 主要研究内容与结果

输入光子晶体的光频率是由光子晶体禁带决定的,而影响光子晶体所在带隙宽度和数量的因素有介质柱和背景介电常数的对比度、晶格结构和材料的填充比等。一般来说,当介质柱和背景介电常数之比大于2时就可以形成稳定的光子带隙。利用光子晶体局域特性,当输入光频率与波导的缺陷态频率相一致时,输入光局域在波导中,并只能在波导中传输。所设计的结构采用正方形晶格的二维光子晶体,介质柱为GaAs材料,其介电常数为11.97,背景为空气,晶格常数为 a ,介质柱半径为 $0.3a$,利用有限元法计算得到能带图如图1所示,为了更好地研究器件的光传输特性,采用了带隙最宽的频带范围作为输入光频率范围,在图1中可以得到带隙最宽处的归一化频率范围为 $0.41 \sim 0.51(\omega a/2\pi c)$,若需要得到特定的频率范围(通信波段频率或紫红外光波段),可以通过调节介质柱半径的大小或介质柱之间的间距等方法来实现。

图2为所设计的波导环形共振腔 1×2 分束器结构,在正方晶格二维光子晶体中心引入环形共振腔,共振腔的中心介质柱为可调介质柱,分别在腔体的上面和右边引入缺陷波导作为输出端口,令左边端口为输入端口1,右边输出端口为端口2,上面输出端口为端口3。

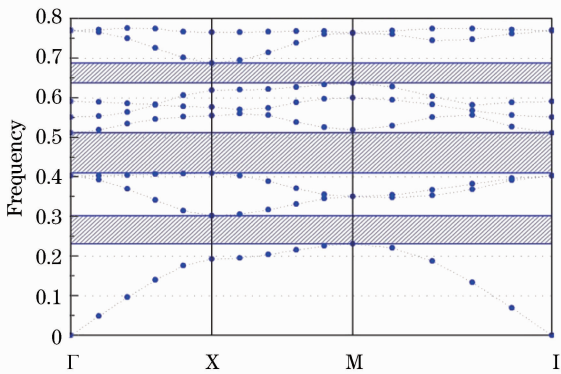


图1 能带图

Fig. 1 Bandgap

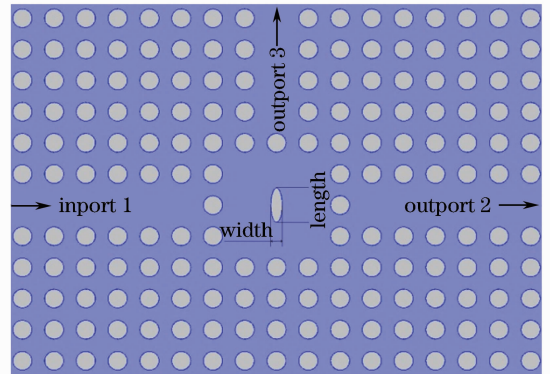


图2 正方形晶格二维光子晶体波导环形共振腔分束器结构

Fig. 2 Structure of waveguide ring cavity beam splitter

based on two-dimensional square lattice photonic crystal

为了实现两个端口对分束光强的控制,通过打破环形共振腔中心的可调介质柱结构的对称性,将环形共振腔内部的可调介质柱设计成椭圆形状,且介质柱的尺寸可以人工调节。环形腔内共振模式由于可调介质柱的影响,当输入光频率与环形共振腔共振频率一样时,局域在腔内的光强将以不同的程度耦合至各输出端口,实现输出光强的不均匀分束效果。为了验证提出的结构对分束光强的控制效果,通过软件数值模拟了该结构可调介质柱在不同尺寸下对各端口输出光光强及滤波中心频率的变化曲线。

首先减小可调介质柱的宽度,增加可调介质柱的长度来破坏共振腔中的对称性,以达到输出光强不均匀分布的目的。经过多次数值模拟,当共振腔内可调介质柱的长度变为 $0.55a$,改变可调介质柱的宽度时,对输出端口光强的灵敏度较大,如图3所示,共振腔可调介质柱的不同尺寸参数对应了不同的滤波中心频率及最大透射率。

从图3可知,端口输出光中心频率随着共振腔可调介质柱宽度的增加向低频方向移动,且变化接近线性关系。这是由于电磁波在介质柱中传播公式可以表示为 $\omega(k) = ck/\epsilon^{1/2}$, c 为真空中的光速, k 为波矢, $k = 2\pi/\lambda$ 。

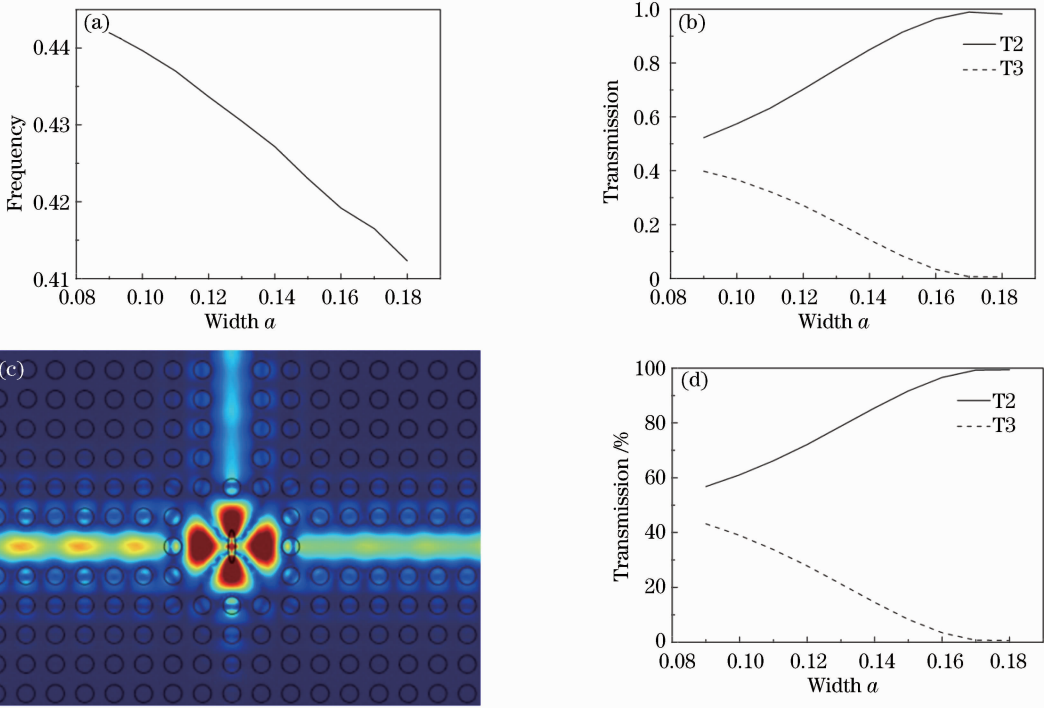


图 3 输出光中心频率及透射率特性曲线。(a)中心频率随可调介质柱宽度的变化曲线;(b)透射率随可调介质柱宽度的变化曲线;(c)可调介质柱尺寸为 $0.15a \times 0.55a$ 时光场分布图;(d)各个端口透射率占总输出光强的百分比

Fig.3 Center frequency and transmission characteristics curve of output light. (a) Center frequency versus width of adjustable rod; (b) transmission versus width of adjustable rod; (c) optical field distribution with adjustable rod size of $0.15a \times 0.55a$; (d) percentage of transmission of total output light intensity of each output

改变介质柱的外径,实际上就改变了缺陷局部范围内光传播介质的平均介电常数,当介电常数 ϵ 增大时,传播过程中对应的光波频率就会相应地减小,当增加介质柱宽度时,局部范围内介质柱所占的空间比例上升,共振腔的平均介电常数随之增大,因此腔内共振模的中心波长向低频方向移动。若将共振腔内可调介质柱改为非线性材料,也能够得出类似的结果。

随着可调介质柱宽度的增加,输出端口 2 的透射率越来越强,并趋于饱和,相应的端口 3 的透射率越来越弱趋近于零。图 3(c)给出了可调介质柱尺寸为 $0.12a \times 0.55a$ 时输入光在中心频率处的场强分布,可以看到共振腔内共振局域分 4 个最强区域,在最局域光强区域耦合至最近的缺陷波导,光从波导传输至各端口。图 3(d)为各个端口透射光强占总输出光强的百分比,其比值与各端口输出透射率几乎相等,说明此分束光强控制结构的损耗很小,损耗来源于从端口 1 入射的光不是百分百从出射端口 2 和 3 出射的,部分光在环形共振腔中从端口 1 处耦合出去,但是耦合强度很小,故图 3(b)和(d)存在很微小的差别。其中 T2 端口为强光输出端口,T3 端口为弱光输出端口,固定可调介质柱长度不变,T2 端口输出光强随可调介质柱宽度的增加而增加,T3 端口输出光强随可调介质柱宽度的增加而减弱。

打破结构对称性除了改变可调介质 x 方向的宽度之外,还可以改变结构可调介质柱 y 方向上的长度,选取图 3 中光强对比度较明显时可调介质柱的尺寸为 $0.16a \times 0.55a$,保持宽度为 $0.16a$ 不变,逐渐减少可调介质柱长度。同样模拟仿真光在结构中的传输变化曲线,其变化规律如图 4 所示。

各端口输出光强和滤波中心频率随可调介质柱长度的变化规律与变化可调介质柱宽度的原理相同,图 4 中变化曲线与图 3 类似,端口的输出光强随可调介质柱长度改变与可调介质柱宽度变化趋势一样,随着尺寸的增大,端口 2 透射率逐渐增大,而相应的端口 3 的透射率逐渐减小乃至趋近于零。但是端口透射率的改变对可调介质柱宽度变化较明显,图 3 中宽度的变化范围从 $0.09a$ 到 $0.18a$,图 4 中长度变化范围从 $0.3a$ 到 $0.55a$,改变可调介质柱尺寸对宽度的精度要求比长度的高,因此改变可调介质柱长度存在更大的变化范围,能够更好地实现人工调控。

除此之外,通过旋转中心椭圆的介质柱,实现旋转角度对输出端口强度的控制,其关系曲线图如图 5 所示。

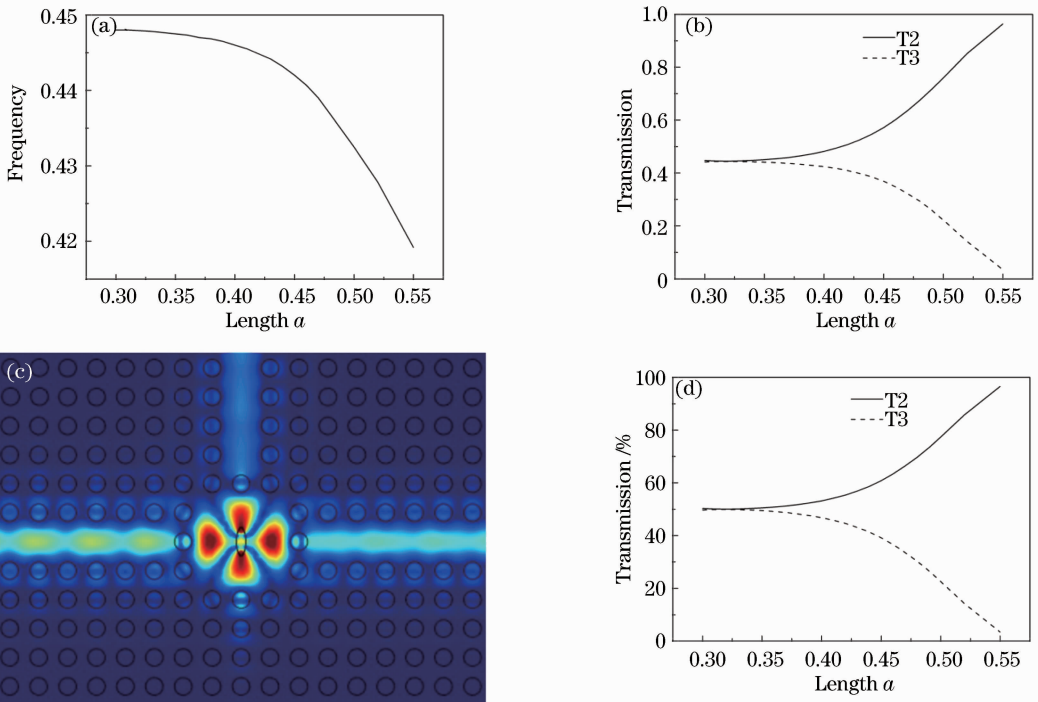


图 4 输出光中心频率及透射率特性曲线。(a)中心频率随可调介质柱长度的变化曲线;(b)透射率随可调介质柱长度的变化曲线;(c)可调介质柱尺寸为 $0.16a \times 0.49a$ 时光场分布图;(d)各个端口透射率占总输出光强的百分比

Fig. 4 Center frequency and transmission characteristics curve of output light. (a) Center frequency versus length of adjustable rod; (b) transmission versus length of adjustable rod; (c) optical field distribution with adjustable rod size of $0.16a \times 0.49a$; (d) percentage of transmission of total output light intensity of each output

选取端口透射光强度之比较明显时可调介质柱尺寸为 $0.16a \times 0.49a$ 作为参考,逆时针旋转可调介质柱。从图 5 可以知道,端口 2 变化周期为 180° ,可调介质柱旋转角度为 0° 的时候,端口 2 输出光强最大,随着旋转角度的逐渐增大,端口 2 输出光强呈下降趋势,当可调介质柱旋转角度在 45° 时两个端口的的光强透射率相等,当旋转角度为 90° 端口 2 处输出光强下降至最低点,在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 输出光强逐渐上升达到最高点并且在 135° 和另一端口的输出光强再次达到平衡。端口 3 在 $45^\circ \sim 135^\circ$ 之间变化较小,且输出光透射率在 0.5 左右。从图 5(b)可看出在椭圆介质柱旋转至 $45^\circ \sim 135^\circ$ 之间时,总的出射能量明显降低,这是由于光在椭圆介质柱的两个尖端的耦合强度最强,当椭圆介质柱旋转至 $45^\circ \sim 135^\circ$ 之间,其中一个尖端靠近入射端口,这就使得局域在尖端的光更容易耦合至入射端口中,特别将椭圆介质柱旋转至 90° 时,尖端水平对着入射端口,如图 6 所示,椭圆介质柱旋转 90° 状态下较 0° 状态,入射光波与耦合返回光波在入射波导中形成更明显的驻波现象,在 90° 状态下端口 2 和端口 3 的总输出能量最少。

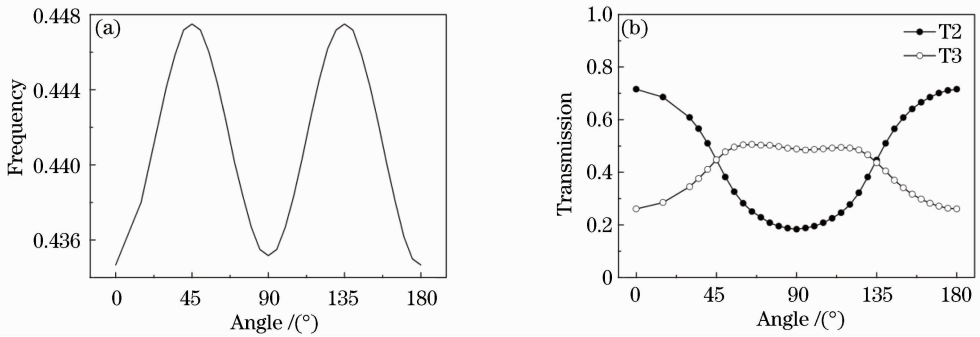


图 5 输出光中心频率及透射率特性曲线。(a)中心频率随可调介质柱旋转角度的变化曲线；(b)透射率随可调介质柱旋转角度的变化曲线

Fig. 5 Output light center frequency and transmission characteristics curve. (a) Center frequency versus angle of adjustable rod; (b) transmission versus angle of adjustable rod

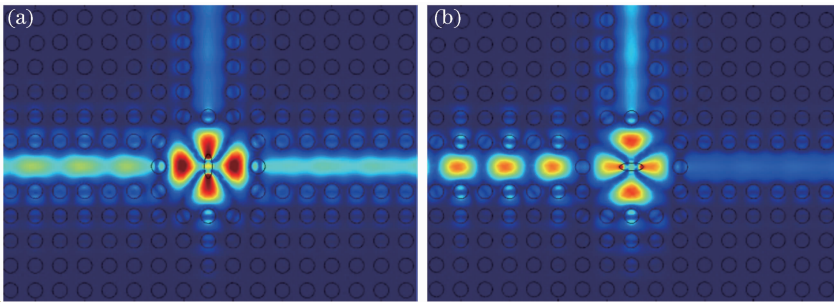


图 6 (a)可调介质柱旋转 0°时光场分布图；(b)可调介质柱旋转 90°时光场分布图

Fig. 6 (a) Optical field distribution with angle of 0°; (b) optical field distribution with angle of 90°

3 结 论

提出了一种基于正方晶格二维光子晶体波导环形共振腔的 1×2 分束器,采用了有限元分析方法数值模拟其传输特性,经过分析得到,改变共振腔内可调介质柱的尺寸参数就可以实现对各端口输出光强配比的有效控制,实现了良好的带通滤波和可控分束特性。随着共振腔内可调介质柱尺寸的增大,透射波中心频率向低频方向移动,与输入端口 y 对称的端口 2 透射率随之增大,端口 3 透射率相应地随之减小。透射率也会根据共振腔内可调介质柱的旋转角度变化而变化,两端口变化周期为 180° ,旋转共振腔内可调介质柱能够将两端口实现平均分束效果,除此之外还可以运用于光开关技术,将介质柱旋转 90° 就可将端口 2 中的光强从最强处降低到 0 值,可应用于光开关等各种领域中。

参 考 文 献

- 1 E Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics an electronics[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059–2062.
- 2 S Jonh. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(23): 2486–2489.
- 3 S Simsek. A novel method for designing one dimensional photonic crystals with given bandgap characteristics[J]. AEUE – International Journal of Electronics and Communications, 2013, 67(10): 827–832.
- 4 Q Xu, C Peng. The properties of two-dimensional photonic crystals bandgap structure with rhombus lattice[J]. Optik – International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 125(1): 104–106.
- 5 X Chen, X Liang, Y Wang, *et al.*. Theoretical study of light localization in photonic bandgaps of organic octagonal quasiperiodic photonic crystal slabs[J]. Optik – International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(18): 5058–5061.
- 6 T Yajima, J Yamamoto, F Ishii, *et al.*. Low-loss photonic crystal fiber fabricated by a slurry casting method[J]. Opt Express, 2013, 21(25): 30500.
- 7 M R Lebbal, T Boumaza, M Bouchemat. Structural study of the single-mode photonic crystal fiber[J]. Optik – International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(20): 4610–4613.
- 8 G Zhang, F Xing, P Yan, *et al.*. Double cladding seven-core photonic crystal fiber[J]. Optics and Photonics Journal, 2013, 3(2): 47–49.
- 9 M I Hasan, M S Habib, M S Habib, *et al.*. Design of hybrid photonic crystal fiber: Polarization and dispersion properties[J]. Photonics and

- Nanostructures — Fundamentals and Applications, 2014, 12(2): 205–211.
- 10 Z Wang, C Zhao, S Jin. Design of a bending-insensitive single-mode photonic crystal fiber[J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(3): 213–218.
- 11 X X Shen, Y Z Ren, G Y Dong, *et al.*. Optimization design of holographic photonic crystal for improved light extraction efficiency of GaN LED[J]. Superlattices and Microstructures, 2013, 64: 303–310.
- 12 Y Chen, B Sun, T Ma, *et al.*. Thermal management for high-power photonic crystal light emitting diodes[J]. Microelectronics Reliability, 2014, 54(1): 124–130.
- 13 N Janrao, V Janyani. Ultra compact slow light photonic crystal directional coupler design with elliptical rods[J]. Optik — International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(17): 3120–3124.
- 14 L Li, G Q Liu. Photonic crystal ring resonator channel drop filter[J]. Optik — International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(17): 2966–2968.
- 15 A Mehr, F Emami, F Mohajeri. Tunable photonic crystal filter with dispersive and non-dispersive chiral rods[J]. Opt Commun, 2013, 301(1): 88–95.
- 16 J S Li, H Liu. Terahertz polarization beam splitter based on two photonic crystal cavities[J]. Optik — International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 136(1): 139–143.
- 17 N Janrao, V Janyani. Ultra compact slow light photonic crystal directional coupler design with elliptical rods[J]. Optik — International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(17): 3120–3124.
- 18 K Ren, X B Ren. Y-shaped beam splitter by graded structure design in a photonic crystal[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(11): 1241–1245.
- 19 M G Baboly, Y Soliman, M F Su, *et al.*. Enhanced plane wave expansion analysis for the band structure of bulk modes in two-dimensional high-contrast solid-solid phononic crystals[J]. Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 2014, 12(5): 487–492.
- 20 I A Khromova, L A Melnikov. Anisotropic photonic crystals: Generalized plane wave method and dispersion symmetry properties[J]. Opt Commun, 2008, 281(21): 5458–5466.
- 21 Y Wu, X Chen, W Lu. Thermal radiation property of a three dimensional photonic crystal based on multiple scattering method[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2006, 27(3): 425–434.
- 22 K B Dada, E Momoniat. On the application of finite differences, method of lines and pseudo-spectral methods to smectic-C liquid crystals [J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2010, 20(4): 429–444.
- 23 J Manzanares-Martinez, P Castro-Garay. Modeling the tuning of lasing in liquid crystal based one-dimensional photonic crystals using the finite difference timedomain method[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2010, 24(14–15): 1867–1875.
- 24 S Giani, I G Graham. Adaptive finite element methods for computing band gaps in photonic crystals[J]. Numerische Mathematik, 2012, 121(1): 31–64.
- 25 E Degirmenci, P Landais. Finite element method analysis of band gap and transmission of two-dimensional metallic photonic crystals at terahertz frequencies[J]. Appl Opt, 2013, 52(30): 7367–7375.
- 26 I Andonegui, A J Garcia-Adeva. The finite element method applied to the study of two-dimensional photonic crystals and resonant cavities [J]. Opt Express, 2013, 21(4): 4072–4092.

栏目编辑: 宋梅梅