

# 基于光子晶体自准直效应的新型 $1 \times 3$ 分束器

周兴平 疏 静

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

**摘要** 设计了一种基于正方形晶格二维光子晶体自准直效应的  $1 \times 3$  分束器。使用平面波展开法对正方形晶格椭圆介质柱光子晶体进行分析, 计算出其等频线, 讨论自准直光波频率和传播特性。逆时针旋转椭圆介质柱到一定角度, 同样使用平面波展开法计算其等频线并分析光波传播特性。根据以上分析, 基于自准直效应, 使用不同偏转角度的椭圆介质柱光子晶体设计出  $1 \times 3$  分束器。使用时域有限差分法对工作状态下光波在分束器中的传播特性进行分析, 并给出了电场分布图, 实现了  $1 \times 3$  分束功能。此结构的分束器期望能推进光子晶体在光集成回路中的应用。

**关键词** 光学器件; 光子晶体; 自准直效应; 平面波展开法; 等频线; 时域有限差分法

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0423002

## Novel $1 \times 3$ Splitter Based on Photonic Crystal Self-Collimation Effect

Zhou Xingping Shu Jing

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract** A  $1 \times 3$  splitter based on self-collimation in a two-dimensional square-lattice photonic crystal is presented. The frequency and the direction of propagation of the self-collimated beams in square-lattice photonic crystal composed of elliptical dielectric rods are obtained by the equal-frequency contours (EFC) which are calculated by plane-wave expansion (PWE) method. Then the elliptical rods are rotated counterclockwise and the EFC is calculated employing PWE method. Based on the above, a  $1 \times 3$  splitter is realized by photonic crystals composed of elliptical rods with different orientation angles. The transmission characteristics of light in the splitter are analyzed via the finite-difference time-domain (FDTD) method, and the resulting electric fields are also given. It is concluded from the electric fields that a  $1 \times 3$  beam splitter is realized. The proposed splitter is expected to promote the application of photonic crystals in optical integrated circuits.

**Key words** optical devices; photonic crystal; self-collimation effect; plane-wave expansion method; equal-frequency contours; finite-difference time-domain method

**OCIS codes** 050.5298; 130.5296; 160.5298; 230.5298

## 1 引 言

1987年, Yablonovitch等<sup>[1,2]</sup>提出光子晶体概念。光子晶体, 也被认为是光子带隙材料, 其周期性介质结构可以使禁止某些频率范围的光从任意角度

穿过。在过去的几十年中, 光子晶体的带隙特性以及基于此所设计的通信器件得到了广泛的研究, 如光开关<sup>[3]</sup>、滤波器<sup>[4]</sup>、波分/解波分复用器<sup>[5]</sup>、谐振腔<sup>[6-8]</sup>以及分束器<sup>[9]</sup>等, 而对于光子晶体带隙和缺

收稿日期: 2012-11-28; 收到修改稿日期: 2013-01-04

基金项目: 中国博士后科学基金(20080430171)、江苏省博士后科学资助计划(0702024B)和南京理工大学卓越计划紫金之星(AB39105)资助课题。

作者简介: 周兴平(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事光子晶体器件方面的研究。E-mail: zhou846775223@sina.com

导师简介: 疏静(1980—), 女, 博士, 讲师, 主要从事光子晶体、半导体量子点和光力学等方面的研究。

E-mail: jingshu@mail.njust.edu.cn(通信联系人)

陷之外的特性却研究甚少。1999年, Kosaka等<sup>[10]</sup>发现光子晶体中存在自准直效应。光子晶体内光线的传播方向由群速度的方向决定, 而群速度的方向总垂直于等频线(EFC)。若特定频率的等频线为直线, 光线将沿直线传播, 形成虚波导。在一定入射角范围内, 光线都可以耦合进入光子晶体形成自准直传输。近些年来, 光子晶体带隙之外的这一特性得到了广大科研人员越来越多的注意。基于光子晶体自准直效应, 科研人员设计出了多种光学器件, 如干涉仪<sup>[11]</sup>、超棱镜、虚波导、偏振分束器以及超透镜等。光子晶体自准直效应对于降低光子集成器件的复杂度有着重要的意义。引入线缺陷可以实现对光子晶体中自准直光束的半反射或者全反射, 从而改变自准直光束的传播方向。由此, 科研人员设计出了不同种类的干涉仪以及分束器<sup>[12~15]</sup>。基于自准直效应, 文献<sup>[13]</sup>中通过在平板光子晶体中引入一条缺陷的方式实现了对入射光的 $1 \times 2$ 分束功能, 实验结果与仿真结果相符合之后, Zabelin等<sup>[14]</sup>同样通过引入缺陷的方式实现了对TE和TM两种偏振光的分束功能。文献<sup>[15]</sup>中通过引入多条缺陷的方式实现了 $1 \times 3$ 以及 $1 \times 7$ 分束功能。文献<sup>[12]</sup>则采取不同方法实现了分束功能。采用椭圆介质柱作为光子晶体背景材料, 通过改变椭圆的旋转角度来改变特定波长光线的传播方向, 进而实现了 $1 \times 2$ 分束功能。但文献<sup>[12]</sup>中使用渐变结构的光子晶体, 结构略显复杂。本文中使用的分束器光子晶体, 对结构进行简化, 仿真结果显示分束器的工作效果较为明显, 并且实现了 $1 \times 3$ 分束功能。

## 2 理论分析

光线在光子晶体中垂直于色散表面传播。色散表面上特定频率的横切面与色散表面相交所得的曲线即为一条等频线。等频线记录了麦克斯韦方程组在倒易空间中的本征频率。光线传播方向由群速度决定, 其垂直于等频线<sup>[10]</sup>。理想的自准直效应要求等频线为直线。直线状态的等频线越长, 表面自准直光线就可以有更大的入射角。当等频线不是一条绝对笔直的直线时, 自准直光线就会发生偏转, 偏转角度定义为 $|\theta_p|_{\max}$ <sup>[16]</sup>。通过利用自准直光线偏转角度, 就可以改变光子晶体中光线的传播方向。

使用椭圆介质柱作为分束器的背景材料。椭圆有长轴、短轴以及其与水平线夹角等可控变量, 而圆形介质柱只有半径一个可控变量。这些变量对于等频线形状有着重要的影响。所以相对于圆形介质柱

光子晶体, 椭圆介质柱光子晶体有着更多的特性。首先使用平面波展开法(PWE)分析椭圆介质柱光子晶体等频线特征。假设晶格常数为 $a$ , 椭圆半长轴为 $l = a/3$ , 半短轴长为 $m = a/4$ , 介质柱介电常数为12.96, 椭圆介质柱逆时针旋转角度为 $\theta$ , 如图1所示。并采用正方形晶格排布, 使用平面波展开法计算其等频线。图2(a), (b)分别为椭圆介质柱水平放置时( $\theta = 0^\circ$ )TM模(电场平行于介质柱 $z$ 轴方向)计算所得第一能带和第二能带的等频线。

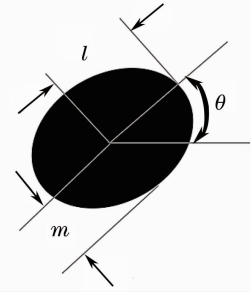


图1 椭圆介质柱示意图

Fig. 1 Schematic of the elliptical dielectric rod

从图2(a)中发现当归一化频率( $\omega a/2\pi c = a/\lambda$ , 其中 $\omega$ 为圆频率,  $c$ 为光速,  $\lambda$ 为波长)为0.2005时, 等频线呈直线状态, 光线可垂直于等频线沿 $\Gamma M$ 方向传播。从图2(b)中看到当归一化频率为0.3724时, 等频线呈直线状况, 光线可沿 $\Gamma X$ 或者 $XM$ 方向传播。由文献<sup>[16]</sup>可知, 光线沿 $\Gamma X$ 方向传播时具有更大的入射角度。若选择归一化频率0.2005为工作频率, 自准直光线沿 $\Gamma M$ 方向传播即与水平线成 $45^\circ$ 角传播。而如果选择归一化频率0.3724为工作频率, 自准直光线沿 $\Gamma X$ 方向(水平方向)传播。为了便于分束器设计, 选择归一化频率0.3724为分束器的工作频率, 所以只需计算第二能带的等频线。将椭圆沿逆时针旋转 $30^\circ$ ( $\theta = 30^\circ$ ), 计算其等频线。此时TM模第二能带的等频线如图3(a)所示。从图中可以发现归一化频率为0.37附近的等频线呈椭圆状。将椭圆沿逆时针旋转 $60^\circ$ ( $\theta = 30^\circ$ ), 同样使用平面波展开法计算其等频线, 如图3(b)所示。由于旋转 $30^\circ$ 和 $60^\circ$ 的椭圆关于 $\Gamma M$ 方向对称, 所以两种椭圆所计算出来的等频线也关于 $\Gamma M$ 方向对称。由对称特性可以知道, 当旋转角度 $\theta = -30^\circ$ 和 $\theta = -60^\circ$ 时(顺时针旋转 $30^\circ$ 和 $60^\circ$ ), 等频线形状分别与 $\theta = 30^\circ$ 和 $\theta = 60^\circ$ 时相同。光线在光子晶体中沿垂直于等频线方向传播, 所以此时入射光线呈微发散状态传播, 这就为改变光线在光子晶体中的传播方向提供了可能。

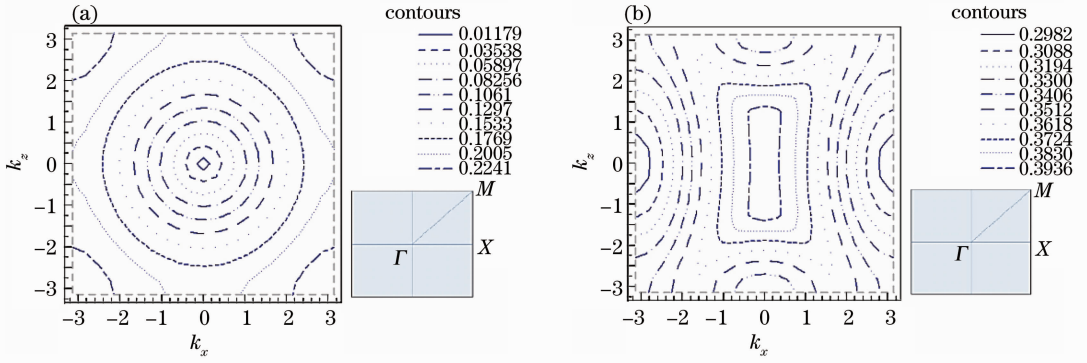


图 2 等频线( $\theta=0^\circ$ )。(a)第一能带；(b)第二能带

Fig. 2 Equal-frequency contours ( $\theta=0^\circ$ ). (a) First band; (b) second band

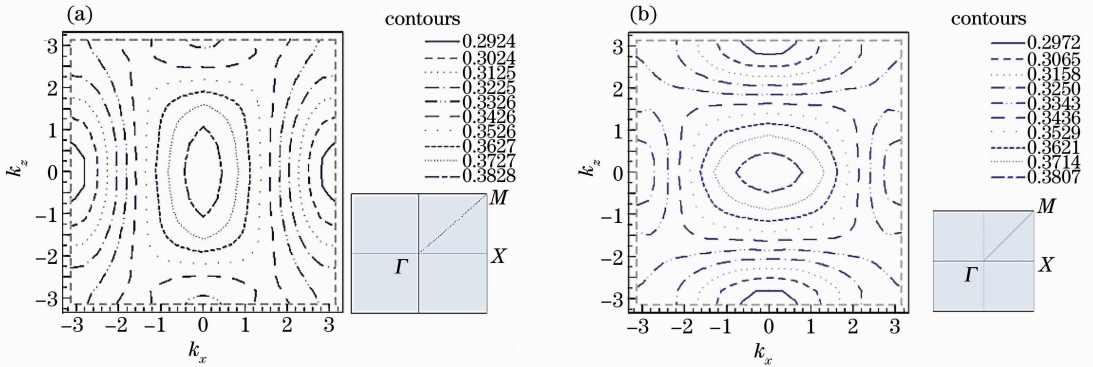


图 3 不同旋转角度完美光子晶体的第二能带等频线。(a)  $\theta=30^\circ$ ；(b)  $\theta=60^\circ$

Fig. 3 Equal-frequency contours of the second band in perfect photonic crystals with different orientation angles. (a)  $\theta=30^\circ$ ; (b)  $\theta=60^\circ$

### 3 分束器结构设计

分束器结构设计如图 4 所示,分为若干区域。区域 M 中椭圆介质柱不旋转水平放置,为 3 行 55 列。区域 A,B,C,D 中椭圆介质柱长轴与  $x$  轴夹角依次为  $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ ,如图 4 中插图所示,依次为

7 列,20 列,21 列,7 列。而区域  $A', B', C', D'$  中的椭圆介质柱分别与区域 A,B,C,D 中的介质柱关于  $x$  轴呈镜面对称(长轴与  $x$  轴夹角依次为  $-0^\circ, -30^\circ, -60^\circ, -90^\circ$ )。

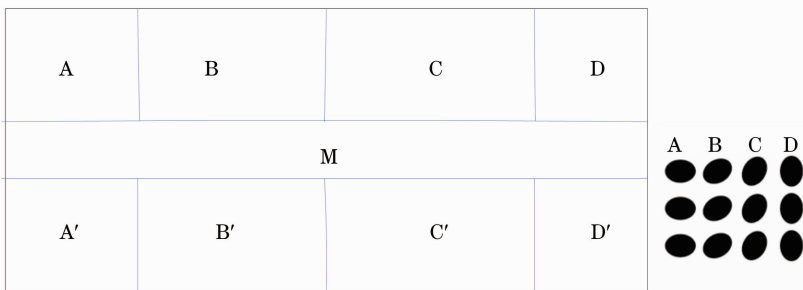


图 4 分束器结构示意图(右侧插图为不同旋转角度的椭圆介质柱示意图)

Fig. 4 Schematic of the splitter(elliptical dielectric rods with different orientation angles are in the right inset)

晶格常数设置为  $a=578 \text{ nm}$ ,这样分束器工作波长为通信中所常用的  $1551 \text{ nm}$ 。接下来使用二维时域有限差分法(FDTD)对分束器进行仿真。吸收边界采用完全匹配层(PML)吸收层。由于空气中

介质柱光子晶体只有 TM 模禁带,所以使用分量为  $E_z$ (平行于介质柱方向)的入射光源。晶格常数为  $a$ ,晶格数目取  $62 \times 62$ ,FDTD 计算精度设为每个晶格上取 12 个点。在分束器左侧放置垂直方向长度

为  $8a$  的线光源,其归一化频率设置为  $0.3724$ 。单步运行 300 步后,电场分布如图 5 所示。从电场分布图中可以看到,光束在通过传输至区域 B 和 B'之前呈聚焦状态沿水平方向传播,自准直效应较为明显。当光束传播至区域 B 和 B'时,光束发生分散。区域 M 中光束继续沿水平方向传播,而区域 B 和 B'中的光束分别向外发散。当区域 B 和 B'中的光束分别到达区域 C 和区域 C'时,两束发散光的发散角度略有增加并继续向外发散。当两束发散光分别到达区域 D 和 D'时,光束再次改变方向沿水平方向传播。从图中可以看出中间的光束聚集程度较高并始终沿水平方向传播,而上侧与下侧的光束也具有一定的聚集度。分束器右侧边界  $x=25$  处垂直方向的电场强度如图 6 所示。从图中可以看出, $0a$  处电场强度最高, $-10a$  和  $10a$  处强度大约分别为  $0.3$  的峰值,并且关于中心对称。由此,可以看出此结构的分束器较好地实现了分束功能。输出端口能量输出比例约为  $1:1:1$ 。

## 4 结 论

通过改变椭圆介质柱与水平轴之间的角度设计出异质结构光子晶体分束器。由于旋转椭圆介质柱可以改变等频线形状,而光波在光子晶体中总是垂直于等频线传播,这样就可以改变光波的传播方向。通过二维时域有限差分法仿真,所设计的分束器实现了对  $1551\text{ nm}$  通信波长光波的分束功能,将一束入射光波分为 3 束。此种结构的分束器对于提高集成光路密集度有一定的意义。

## 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 F. Cuesta-Soto, A. Martínez, J. García *et al.*. All-optical switching structure based on a photonic crystal directional coupler [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(1): 161~167
- 4 Song Litao, He Jie, Wang Hualei *et al.*. Optical performance of photonic crystal filter with liquid crystal layer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2834~2837  
宋立涛, 何 杰, 王华磊 等. 液晶缺陷光子晶体滤波器的光学特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2834~2837
- 5 A. Sharkawy, S. Shi, D. Prarthar. Multichannel wavelength division multiplexing with photonic crystals [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(14): 2247~2252
- 6 Y. Akahane, T. Asano, B. S. Song *et al.*. High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal [J]. *Nature*, 2003, **425**(6916): 944~947
- 7 Cui Naidi, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu *et al.*. Photonic crystal single channel side-coupled waveguide with parallel resonators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0223001  
崔乃迪, 梁静秋, 梁中翥 等. 并联谐振腔光子晶体单通道侧面耦合波导[J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0223001
- 8 Li Zhiyuan, Gan Lin. Two-dimensional silicon photonic crystal slab devices [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900119  
李志远, 甘 霖. 二维硅基平板光子晶体器件[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900119
- 9 D. C. Tee, T. Kambayashi, S. R. Sandoghchi *et al.*. Efficient, wide angle, structure tuned  $1 \times 3$  photonic crystal power splitter at  $1550\text{ nm}$  for triple play applications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2012, **30**(17): 2818~2823
- 10 H. Kosaka, T. Kawashima, A. Tomita *et al.*. Self-collimating phenomena in photonic crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**(9): 1212~1214
- 11 T. Kim, S. Lee, H. Park *et al.*. Asymmetric Mach-Zehnder filter based on self-collimation phenomenon in two-dimensional photonic crystals [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(6): 5384~5389
- 12 K. Ren, X. B. Ren. Y-shaped beam splitter by graded structure design in a photonic crystal [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2012, **57**(11): 1241~1245
- 13 D. Pustai, S. Shi, C. Chen *et al.*. Analysis of splitters for self-collimated beams in planar photonic crystals [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(9): 1823~1831
- 14 V. Zabelin, L. A. Dunbar, N. Le Thomas *et al.*. Self-collimating photonic crystal polarization beam splitter [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(5): 530~532
- 15 Y. Wan, M. J. Yun, L. H. Xia *et al.*.  $1 \times 3$  beam splitter based on self-collimation effect in two-dimensional photonic crystals [J]. *Optik*, 2011, **122**(4): 337~339
- 16 Y. C. Chuang, T. J. Suleski. Complex rhombus lattice photonic crystals for broadband all-angle self-collimation [J]. *J. Opt.*, 2010, **12**(3): 035102

栏目编辑: 王晓琰

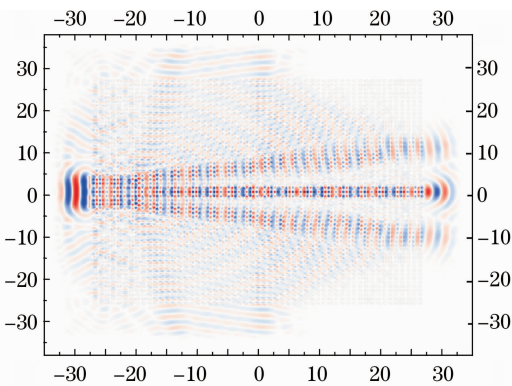


图 5 分束器电场  $E_z$  分布图

Fig. 5 Cross section of electric field  $E_z$  in the splitter

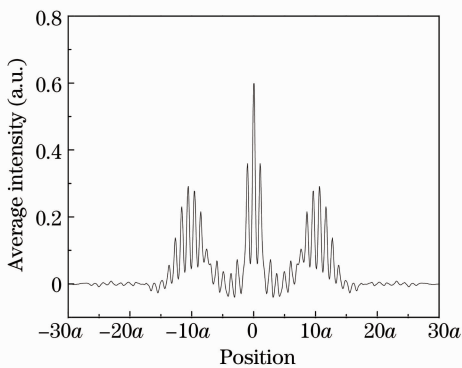


图 6 分束器右侧边界电场强度

Fig. 6 Intensity of electric field  $E_z$  at the right boundary of the splitter