

文章编号: 0253-2239(2009)03-0818-04

二维光子晶体分束器和偏转器

孔伟金 云茂金 王 美 单福凯

(青岛大学物理科学学院, 山东 青岛 266071)

摘要 针对二维光子晶体在光束调整和光束偏转中的应用,采用平面波展开法、二维有限时域差分法和完全匹配层吸收边界条件,从理论上研究了二维方形光子晶体结构中 TM 模式的自准直现象。通过分析光子晶体的能带结构和等频图,基于二维光子晶体的自准直效应和光子带隙,对光波在二维光子晶体中的传播特性进行了讨论。数值计算表明,通过在合适的方向引入不同的线缺陷,可以实现自准直光束的 1×2 和 1×3 分束以及光束偏转。最后讨论了透射光束和偏转光束的能量随线缺陷半径的变化关系。所设计的器件极大地扩展了光子晶体在高密度光学集成电路中的应用。

关键词 光学材料; 光子晶体; 自准直效应; 有限时域差分方法; 线缺陷

中图分类号 TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092903.0818

Beam Splitter and Deflector in Two-Dimensional Photonic Crystals

Kong Weijin Yun Maojin Wang Mei Shan Fukai

(College of Physics Science, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract The self-collimation effect of TM mode in a two-dimensional square lattice photonic crystal is studied by using plane-wave expansion method, and two-dimensional finite-difference time-domain method with perfectly matched layer absorbing boundary conditions for the application of beam adjustment and deflection. The light transmission through the two-dimensional square lattice photonic crystal is investigated in detail with its equal-frequency contours plot and band structure, based on self-collimation effect and band gap in two-dimensional photonic crystals. The simulation results show that one-to-two beam splitter, deflector and one-to-three beam splitter can be realized by appropriately arranging the line defect along the proper direction. The energy of the transmitted beam and the deflected beam versus the radius of the line defect along TX direction is discussed. Such devices can greatly expand the application of photonic crystals in high-density optical integrated circuits.

Key words optical materials; photonic crystals; self-collimation effect; finite-difference time-domain method; line defect

1 引 言

光子晶体是一种人工设计的新型功能材料,其不同介电常数的周期排列可以在波长的量级上控制光子的运动。自从光子晶体的概念被提出以来,因其可以控制光子运动的独特优点而引起研究者的极大兴趣^[1,2],光子晶体被广泛地应用于光通信、光电集成器件、光子集成器件、空间光电技术以及光电显示和激光等现代高新技术中。利用光子晶体的散射特性实现了超棱镜、负折射率和自准直等效应^[3~9]。自准直效应可以有效地限制光束在空间的展宽和发散,使其无衍射地准直传播。基于光子晶体的自准

直效应可以实现光波的低损耗传输、大角度偏转和分束,使高密度的光路集成成为可能^[10~12]。因而,研究人员对光子晶体的自准直效应开展了理论和实验的详细研究^[13~15]。基于光子晶体的自准直效应,文献^[4~9]利用光子晶体实现光束偏转器、分束器以及马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪等光学器件。

本文利用光子晶体的自准直效应,通过在二维方形光子晶体中引入不同的线缺陷设计了 1×2 、 1×3 分束器和光束偏转器。利用光子晶体的等频图得到自准直光束的频率,进而借助于二维有限时域差分法模拟了 TM 模式的场分布,并且分析了自准

收稿日期: 2008-06-05; 收到修改稿日期: 2008-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(10804060)、山东省教育厅科技计划(JY08348)和山东省教育厅科技计划(J08LI05)资助课题。

作者简介: 孔伟金(1976—),男,副教授,博士,主要从事光子晶体和光学薄膜性能等方面的研究。E-mail: kwjsd@163.com

直光束的分束比与线缺陷中介质柱半径的关系。研究表明如果引入合适的线缺陷,可以利用光子晶体的自准直效应实现光束的 1×2 、 1×3 分离和光束偏转。

2 理论模型

有限时域差分法是对光子晶体中电磁场分布进行数值分析的有效手段。该方法主要是将解麦克斯韦方程组在直角坐标系中展开成标量场分量的方程组,然后用二阶精度的数值差商代替微商,将连续的空间和时间问题离散化,得到标量场分量的差分方程组,再根据吸收边界条件可以得到光子晶体中电磁场分布^[16]。本文采用该方法计算二维光子晶体中的场分布。

平面波展开法是将电磁场在倒格矢空间中以平面波叠加的形式展开^[17],将麦克斯韦方程组转化为一个本征方程,通过求解本征方程便可得到传播光子的本征频率。由麦克斯韦方程可得

$$\begin{cases} \nabla \times E = -\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t} = -\frac{\mu}{c} \frac{\partial H}{\partial t}, \\ \nabla \times H = \frac{1}{c} \frac{\partial D}{\partial t} = \frac{\epsilon}{c} \frac{\partial E}{\partial t}, \end{cases} \quad (1)$$

其中 E 和 H 满足随时间的变化关系

$$E = E_0 \exp(-i\omega t), \quad H = H_0 \exp(-i\omega t).$$

由(1)式可以得到亥姆霍兹(Helmholtz)方程:

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\epsilon(r)} \nabla \times H(r) \right] = \frac{\omega^2 u(r)}{c^2} H(r), \quad (2)$$

其中 $H(r) = u(r) \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})]$, $u(r)$ 是晶格周期的函数。

将 $H(r)$ 代入(2)式可得

$$\hat{L}u_k = (ik + \nabla) \times \left[\frac{1}{\epsilon(r)} (ik + \nabla) \right] \times u_k = \omega^2 u_k, \quad (3)$$

(3)式是个本征值方程,其中 \hat{L} 为引入的记号, u_k 为方程的本征值, ω 为本征矢量, k 为自由参量。通过完全匹配层吸收边界条件求解 ω , 即可得二维光子晶体的带隙结构。

3 分析与模拟

为了分析光子晶体自准直效应产生的光束分离和光束偏转,考虑以空气为背景的二维方形排列的圆柱体系,介质柱的半径和介电常数分别为 $r = 0.3a$ 和 $\epsilon = 14$, 其中 a 为二维光子晶体的晶格常数。在本论文的研究中,主要考虑电场平行于介质柱的 TM 模式。为了找到光子晶体中自准直效应出现的频率和传播方向,采用平面波展开法计算了光子能带结构和等频图。TM 模式的光子能带结构和与第一能带相应的等频图分别如图 1(a) 和图 1(b) 所示,其中第一频率带所对应的范围为 $f = \omega a / (2\pi c) \in [0.06, 0.208]$ 。光子晶体中能流矢量的方向与群速度的方向一致,而群速度的定义为 $v_g = \nabla_k \omega(\mathbf{k})$, \mathbf{k} 为波矢。因此可以得知群速度矢量垂直于等频图并指向频率增加的方向。从图 1(b) 可以看出, TM 模在频率 $f = 0.192c/a$ 时的等频图为圆角正方形。平坦的等频图表明 TM 模可以在该光子晶体中沿 ΓM 方向(自准直方向)没有发散地准直传播,即产生自准直效应。

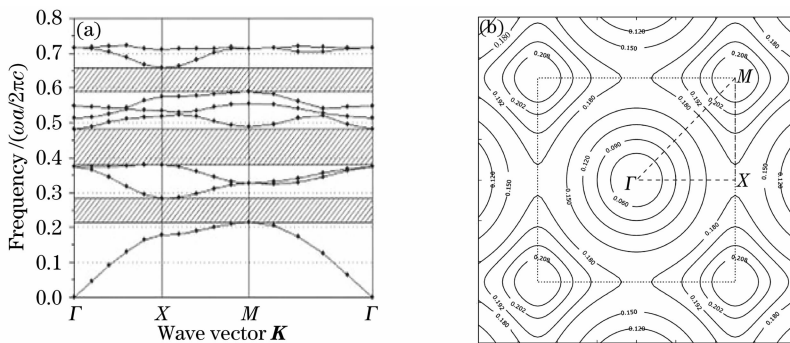


图 1 (a)二维光子晶体 TM 模式的光子能带结构, (b)是与(a)相应的第一频率带的等频图

Fig. 1 (a) Photonic band structure of TM modes for the two-dimensional photonic crystal, (b) equal-frequency contours (EFCs) of the first band corresponding to Fig. 1 (a)

为了实现自准直光束的分离和偏转,需要在光子晶体中引入不同的线缺陷,然后利用二维有限时域差分法和完全匹配层吸收边界条件,对自准直光束在二维光子晶体中的传播进行模拟。通过移除一

行 ΓX 方向(缺陷方向)的介质柱引入线缺陷,将频率为 $f = 0.192c/a$, 半峰全宽为 $3a$ 的高斯光束沿 ΓM 方向引入光子晶体。模拟结果如图 2(a) 所示,可以清楚地看出在光子晶体中自准直光被分成两

束,其中一束(透射光束)沿原来的方向(ΓM 方向)传播,另外一束(偏转光束)沿垂直入射方向传播。而且还可以看出,入射光的能量大多数被分配到偏转光束中,很少一部分被分配到透射光束中。有些情况下只需要光束的偏转而不需要实现光的分束作

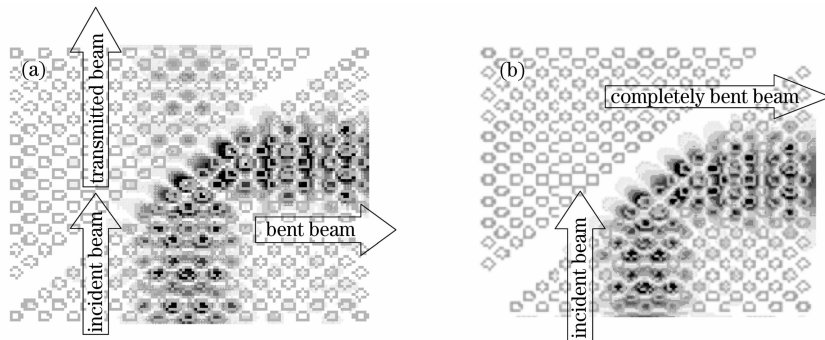


图 2 (a)当引入一条线缺陷,自准直光束沿 ΓM 方向传播时 TM 模式光的静态场分布,(b)当引入三条线缺陷,自准直光束沿 ΓM 方向传播时 TM 模式光的静态场分布

Fig. 2 (a) steady-state field distribution of the TM mode of a self-collimated beam propagating along ΓM direction with the line defect along ΓX direction, (b) is corresponding to three line defects along ΓX direction

由以上的设计可知:如果光子晶体中没有任何缺陷,自准直光束在光子晶体中只沿 ΓM 方向传播;如果沿着 ΓX 方向移除三行介质柱,自准直光束将被完全偏转。因此,线缺陷中介质柱的半径、折射率与分束比之间存在着一定的关系。为了研究这个关系,通过对坡印廷(Poynting)矢量进行积分,引入三个实时探测器来测量光被分束前后的平均能量,并将偏转光束和透射光束能量相对于入射光束能量进行归一化。图 3 给出了透射光束和偏转光束的能量随线缺陷半径的变化关系。

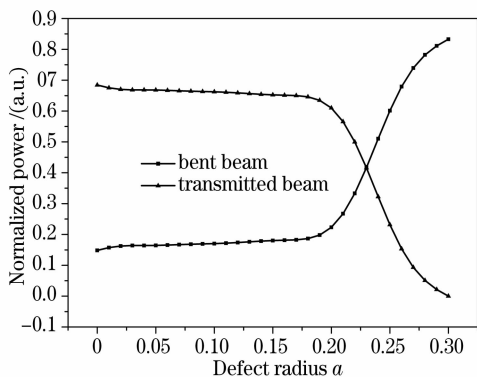


图 3 归一化透射光束和偏转光束能量随沿 ΓX 方向线缺陷半径的变化关系

Fig. 3 Normalized power of the transmitted beam and the bent beam versus the radius of the line defect along ΓX direction

从图 3 可以看出,入射的自准直光束被分成透射光束和偏转光束,它们的能量比可以通过改变沿

用。因此,为了实现入射光束的全部偏转,沿 ΓX 方向移除三行介质柱形成如图 2(b)所示的线缺陷。模拟结果表明,引入三行缺陷的情况下入射的自准直光束可以完全被偏转。

ΓX 方向线缺陷的半径而进行调控。从图 2(a)和图 2(b)可以看出,在光子晶体自准直分光结构存在着微弱的散射现象,所以,透射光束和偏转光束能量之和要小于入射光束的能量。由图 3 还可以看出,当线缺陷的半径为 $0.23a$ 时,光子晶体中透射光和偏转光具有相同的能量。

利用光子晶体的自准直效应将入射光束分为三束或是更多束的效应可以扩展光子晶体在高密度光集成电路中的应用。D. M. Pustai 等^[14]通过在自准直光子晶体中引入一层六角形的晶格结构,设计了 1×3 的光子晶体分束器。

为了在设计的光子晶体结构中实现 1×3 分束,通过同时改变介质柱的半径和折射率的方法,沿 ΓX 方向引入线缺陷。假设线缺陷中介质柱的半径是 $r=0.25a$,介电常数 $\epsilon=10$,利用二维有限时域差分法对光子晶体内自准直光束的传播进行模拟,结果如图 4 所示。可以明显看出,在该条件下,光子晶体内的自准直光束分为三束光。从图 4 可以进一步看出,一部分自准直光束沿 ΓM 方向穿过分光区,一部分自准直光束沿垂直于 ΓM 方向向右偏转,该两束光与前面的 1×2 分束一致。这是因为引入一行线缺陷不足以使自准直光束完全偏转。除了透射光束和偏转光束,另外一束光称为耦合光束,它沿偏转光束的相反方向传播,这束光主要是由线缺陷和原来光子晶体之间晶格不匹配所产生的^[14]。晶格的不匹配将产生不规则形状的微腔(Irregularly

shaped cavities), 该腔将产生与偏转光束相反方向的波矢, 并且允许很小角度范围内的能量通过。所以, 满足该条件的光会被微腔耦合进偏转光束的相反方向传播。

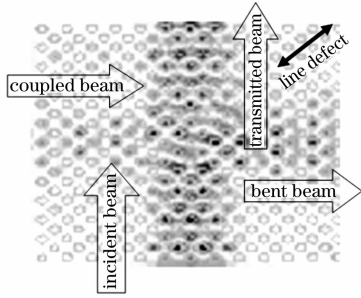


图 4 当线缺陷中介质柱的半径 $r=0.25a$, 介电常数 $\epsilon=10$ 时, 自准直光束沿 ΓM 方向传播时 TM 模式光的静态场分布

Fig. 4 Steady-state field distribution of the TM mode of a self-collimated beam propagating along ΓM direction with radius of $0.25a$ and the dielectric constant of the rods of 10

4 结 论

借助于平面波展开法和有限时域差分法, 从理论上研究了二维方形光子晶体中 TM 模式的自准直现象。通过在 ΓX 方向引入不同的线缺陷, 分别实现了自准直光束 1×2 、 1×3 分束和光束的偏转, 从而使光子晶体在超高密度光集成和光通信领域可以发挥更重要作用。

参 考 文 献

- 1 E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 2 S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super-lattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 3 H. Kosaka, T. Kawashima, A. Tomita *et al.*. Superprism phenomena in photonic crystals [J]. *Phys. Rev. B*, 1998, **58**(16): R10096~R1099

- 4 Zhaolin Lu, J. A. Murakowski, C. A. Schuetz *et al.*. Three-dimensional sub-wavelength imaging by a photonic-crystal flat lens using negative refraction at microwave frequencies[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **95**: 153901
- 5 Liu Qineng, Effect of impurity absorption on one-dimensional photonic crystal defect mode[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(6): 777~780
刘启能. 杂质吸收对一维光子晶体缺陷模的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 777~780
- 6 Deyin Zhao, Jie Zhang, Peijun Yao *et al.*. Photonic crystal Mach-Zehnder interferometer based on self-collimation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**: 231114
- 7 Xiaopeng Shen, Kui Han, Xianqing Yang *et al.*. Polarization-independent self-collimated bends and beam splitters in photonic crystals[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(11): 662~664
- 8 Yuanliang Zhang, Yao Zhang, Baojun Li. Optical switches and logic gates based on self-collimated beams in two-dimensional photonic crystals[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(15): 9287~9292
- 9 V. Zabelin, L. A. Dunbar, N. L. Thomas *et al.*. Self-collimating photonic crystal polarization beam splitter[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(5): 530~532
- 10 Cui Li, Zhao Jianlin, Zhang Xiaojuan *et al.*. Analysis of bending loss oscillations in photonic crystal fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1172~1177
崔莉, 赵建林, 张晓娟等. 光子晶体光纤的弯曲损耗震荡特性分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1172~1177
- 11 Xiaofang Yu, Shanhui Fan. Bends and splitters for self-collimated beams in photonic crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(16): 3251~3253
- 12 J. W. Haus, M. Siraj, P. Prasad *et al.*. Self-collimated beams in photonic crystals with anisotropic constituents[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(9): 527~530
- 13 H. Kosaka, T. Kawashima, A. Tomita *et al.*. Self-collimating phenomena in photonic crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**(9): 1212~1214
- 14 D. M. Pustai, Shouyuan Shi, Caihai Chen *et al.*. Analysis of splitters for self-collimated beams in planar photonic crystals[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(9): 1823~1831
- 15 Zhaofeng Li, Haibo Chen, Zhitang Song *et al.*. Finite-width waveguide and waveguide intersections for self-collimated beams in photonic crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(21): 4834~4836
- 16 Zhu Zhihong, Ye Weimin, Yuan Xiaodong *et al.*. Study of transmission characteristics of 2-D photonic crystals by the finite difference time domain method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 522~525
朱志宏, 叶卫民, 袁晓东等. 用时域有限差分法研究二维光子晶体传输特性[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 522~525
- 17 Yongjun Chao, Zhilin Hou, Youyan Liu. Convergence problem of plane-wave expansion method for phononic crystals[J]. *Phys. Lett. A*, 2004, **327**: 247~253