

文章编号: 0253-2239(2003)10-1237-4

# 光子晶体波导定向耦合器

朱志宏 叶卫民 袁晓东 曾 淳 梅洛勤 张晚云

(国防科技大学光子声子研究中心, 长沙 410073)

**摘要:** 在完整二维光子晶体中引入线缺陷后, 就形成了光子晶体波导; 将时域有限差分方法(FDTD)用于光子晶体波导耦合研究, 计算了不同耦合长度情形下的波导各个出口处的透过率, 结果表明: 光子晶体波导耦合遵循普通介质波导耦合的一般规律, 也有定向耦合的功能。进一步的研究表明: 对于不同的频率, 光子晶体定向耦合器耦合系数是不同的, 并且耦合系数和对应的频率之间近似直线关系。

**关键词:** 光子晶体; 光子禁带; 时域有限差分; 定向耦合器

中图分类号: O488 文献标识码: A

## 1 引 言

近年来, 光子晶体(photonic crystals)<sup>[1,2]</sup> 因其具有控制光子的流动的能力而备受关注<sup>[3,4]</sup>。简而言之, 光子晶体即为按一定空间周期性排列的电介质阵列; 基于电磁波的布拉格散射, 光子晶体中光的色散曲线明显地不同于均匀电介质中的光的色散曲线, 其中存在类似于半导体禁带的“光子禁带”(photonic band gap)<sup>[5~10]</sup>; 如果光的频率在禁带范围内, 则它不能在介质中传播。光子晶体的非凡的本领正是由于这个禁带的存在。当在光子晶体中引入线缺陷后, 处于原来对完整光子晶体不透明的禁带中的光可以沿着线缺陷传播, 这就形成了光子晶体波导。当光子晶体中有两个或两个以上线缺陷波导时, 在一定条件下, 这些波导之间会发生耦合。由于定向耦合器在光信号处理系统、光通信和光计算领域起着举足轻重的作用<sup>[11]</sup>, 所以寻找性能更好、功能独特的定向耦合器, 一直是人们很感兴趣的一个领域。鉴于光子晶体波导具有传统介质波导所不具有的一些独特的性质: 光子晶体波导的尺寸可以是波长的数量级, 这使光子晶体波导的集成更为容易; 光子晶体波导的拐弯角度可以很大, 这使得光子晶体波导的形状可以更加多样化; 光在光子晶体中可以无损耗传播等等。所以自然就想到, 如果光子晶体波导也能和传统介质波导一样有定向耦合效果, 那么光子晶体波导定向耦合器与普通介质波导

定向耦合器相比相应的也就有一些特有的功能: 容易光学集成、拐弯角度大和损耗小等等; 如此研究光子晶体波导耦合问题是一件很有意义的事情。

本文将时域有限差分方法(FDTD)<sup>[12~15]</sup> 作为光子晶体波导耦合研究的工具, 以二维方型光子晶体 TM 模为研究对象, 计算表明: 光子晶体波导的确和普通介质波导一样能产生定向耦合效果, 并且其耦合系数和对应的频率是近似直线关系。

## 2 普通介质波导定向耦合器原理

两根互相靠近的条形介质光波导就形成了一个介质波导耦合器, 如图 1 所示。由耦合模理论<sup>[16]</sup> 可得

$$\left. \begin{aligned} da_1/dz &= -j\beta_{01}a_1 + 0.5\kappa_{12}a_2, \\ da_2/dz &= -j\beta_{02}a_2 + 0.5\kappa_{21}a_1, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中  $a_1$ 、 $a_2$  是波导 1 和波导 2 中的两个模的复振幅瞬时值,  $\beta_{01}$ 、 $\beta_{02}$  为固有相移系数,  $\kappa_{12}$ 、 $\kappa_{21}$  为耦合系数。

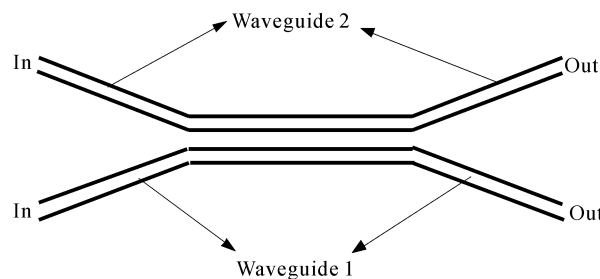


Fig. 1 Conventional waveguide directional coupler

如果两波导的固有相移系数相等, 即  $\beta_{01} = \beta_{02}$  可以得出; 并且在波导 1 的输入端有初始激励  $a_1(0)$ , 波导 2 的输入端信号为零, 则由(1)式可得

E-mail: mlq 6596@sina. com. cn

收稿日期: 2002-09-02; 收到修改稿日期: 2002-11-18

$$\left. \begin{aligned} |a_1(z)|^2 &= \frac{[a_1(0)]^2}{2} [1 + \cos(\kappa_{12}z)], \\ |a_2(z)|^2 &= \frac{[a_2(0)]^2}{2} [1 + \cos(\kappa_{21}z)]. \end{aligned} \right\} (2)$$

若耦合器长度为  $l = \pi/\kappa_{12}$ , 则在输出端, 波导 2 有功率输出, 而波导 1 无功率输出, 能量全部从波导 1 耦合到了波导 2。

若两波导的固有相移系数不相等, 则不可能实现能量的全部转换。

### 3 光子晶体波导耦合的结果与分析

对于图 2 所对应的完整二维方型光子晶体: 晶格常量为  $a$ , 基质为空气, 介质柱半径为  $r$ , 介电常量为  $\epsilon$ ; 取  $r = 0.25a$ , 介质柱的相对介电常量为 4.55。以 TM 模(电场方向平行于介质柱轴方向)为研究对象, 可以求得它的能带图如图 3(图中  $a$  是晶格长度,  $c$  是真空中光速,  $\omega$  是光的角频率,  $\pi$  是圆周率), 从图中可以看出, TM 模完全禁带位于归一化频率 0.40 和 0.45 之间。所以当研究波导耦合时, 我们考虑的光波频率主要在 0.40 到 0.45 这个范围。

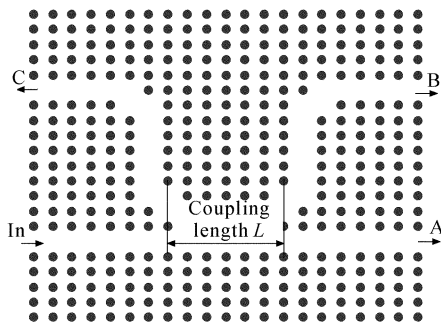


Fig. 2 Top view of the 2-D square-lattice photonic crystal with coupling waveguide

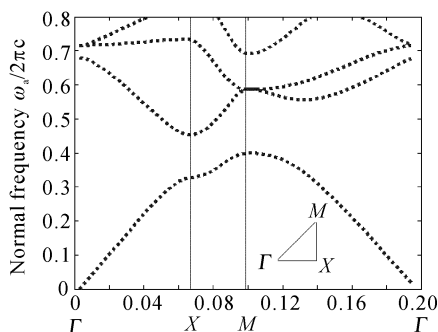


Fig. 3 The photonic band structure for TM mode of the 2D square-lattice photonic crystal

当归一化频率为 0.40 的单频源沿图 2 中箭头方向和位置入射到光子晶体上, 改变耦合波导的长度分

别为  $10a$  和  $15a$  时, 可以得到光子晶体中的 TM 模电场分布矢量图图 4(电场大小和方向由颜色指明)。从图中, 可以直观地看出: 当耦合长度为  $10a$  时, 光的能量绝大部分从波导出口 A 处出来; 而当耦合长度为  $15a$  时, 光的能量绝大部分从波导口 B 处出来。

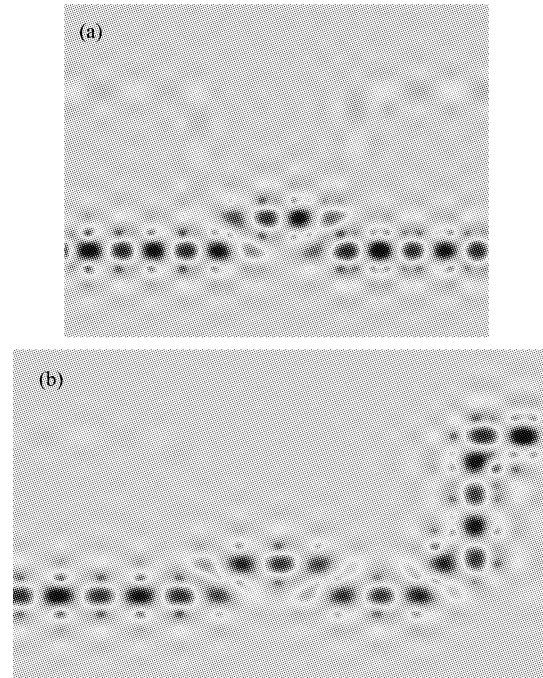


Fig. 4 Distribution of electric fields  $E$  of TM mode (normalized frequency 0.40) in photonic crystals with different coupling length. (a) Coupling length  $10a$ ; (b) Coupling length  $15a$

还是由频率为 0.40 的单频源沿图 2 中箭头方向和位置入射, 连续改变波导耦合长度, 得到波导出口 A、B 和 C 处的透射率如图 5 左图所示(“data A”表示 A 处的透射率, “data A”是对“data A”进行拟合得到的数据, 其他类似); 改变入射波的频率为 0.415 时, 结果如图 5 右图。从图 5 中可以看出, 光的能量大部分从波导口 A 处和 B 处出射, 从波导口 C 处流出的能量很少, 并且 A 处和 B 处的透射率是波导耦合长度  $L$  的正弦(或余弦)函数; 将图 5 与普通介质波导定向耦合器的公式(2)相比较, 可以发现, 光子晶体波导耦合与普通介质波导耦合的理论相吻合了, 这说明光子晶体波导耦合具有普通介质波导耦合所具有的一般性质, 也能够实现光的定向耦合。

对比左图和右图可以发现, 对应于不同的频率, 耦合系数  $\kappa$  值是不同的。连续改变频率的取值, 得到对应的一组  $\kappa$  值;  $\kappa$  值和对应的频率的关系如图 6; 结果表明: 它们是近似直线关系。

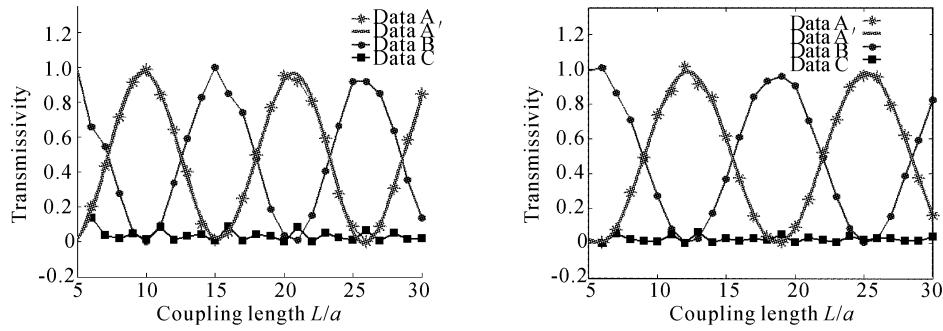


Fig. 5 Transmissivity vs. coupling length. Left: normalized frequency 0.40, right: normalized frequency 0.415

可以根据实际需要,调整以上参量,来选择合适的固有相移系数。

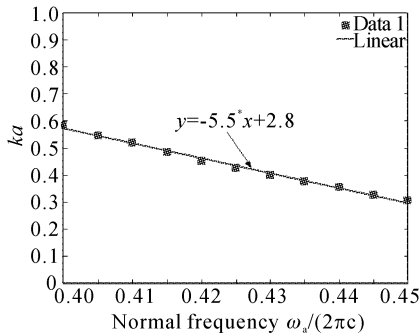


Fig. 6 Coupling coefficient vs. frequency

在图 2 所示的光子晶体耦合波导中再拿一排介质柱,形成如图 7 所示的结构,还是由频率为 0.40 的单频源沿图 7 中箭头方向和位置入射,连续改变波导耦合长度,得到波导出口 A、B 和 C 处的透射率如图 8 所示,从图 8 中可以看出,这种结构的光子晶体定向耦合器不能够实现能量的完全转换,这是由于两个波导的固有相移系数不相等的缘故,这也与耦合模理论所得到的普通介质波导定向耦合器的结果相一致。进一步说明了光子晶体波导定向耦合器具有普通介质波导定向耦合器的一般性质。进一步的研究表明,光子晶体波导的固有相移系数与介质柱折射率、光子晶体填充比、光子晶体波导几何结构、光子晶体波导宽度和材料的色散等有关系,我们

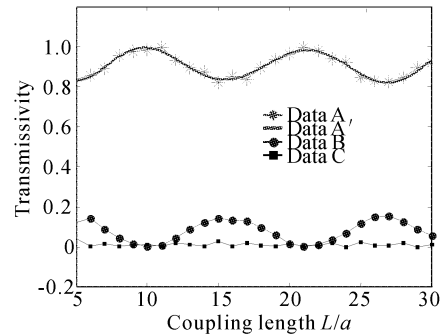


Fig. 8 Transmissivity vs. coupling length (normalized frequency 0.40)

**结论** 本文将时域有限差分法(FDTD)用于光子晶体波导耦合研究;对于某一给定的处于禁带中的频率,计算了不同耦合长度情形下的波导各个出口处的透过率,结果表明:光子晶体波导耦合遵循普通介质波导耦合的一般规律,也有定向耦合的功能。进一步的研究表明:光子晶体定向耦合器耦合系数和对应的频率之间是近似直线关系。相信不久的将来,对光子晶体波导定向耦合器的研究会进一步深入。

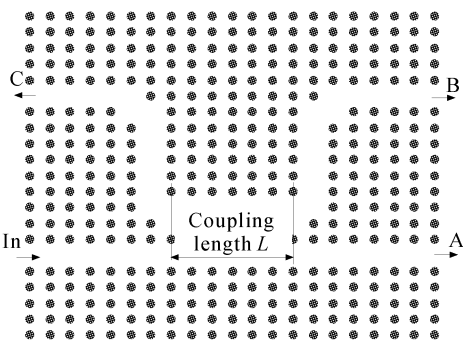


Fig. 7 Top view of the 2D square-lattice photonic crystal with coupling waveguide

参 考 文 献

- 1 Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58** (20):2059~2062
- 2 John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2486~2489
- 3 Joannopoulos J D, Meade R D, Winn J N. *Photonic Crystals; Molding the Flow of Light*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1995
- 4 Mekis A. High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77** (18):3787~3790

- 5 Joannopoulos J D, Villeneuve P R, Fan S. Photonic crystals: putting a new twist on light. *Nature*, 1997, **386** (6621):143
- 6 Abram I, Bourdon G. Photonic-well microcavities for spontaneous emission control. *Phys. Rev. (A)*, 1996, **54** (8):3476~3479
- 7 Ho K M, Chen C T, Soukoulis C M. Existence of a photonic gap in periodic dielectric structures. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **65**(25):3152~3155
- 8 Sigalas M M, Chan C T, Ho K M *et al.*. Metallic photonic band-gap materials. *Phys. Rev. (B)*, 1995, **52** (10):11744~11751
- 9 Jin Chongjun, Qin Bai, Yang Miao *et al.*. Two dimensional photonic band structure: Triangular non-bravais lattice. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17** (4):409~413 (in Chinese)
- 10 Qin Bai, Yang Miao *et al.*. Experimental study of photonic crystal-triangular lattices. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(2):239~244 (in Chinese)
- 11 Chen Baoxue, Yuan Yifang *et al.*. Design of wide waveband wavelength-insensitive coupler using statistical optimum method. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(8):996~1000 (in Chinese)
- 12 Bierwirth K, Schulz N, Amdt F. Finite-difference analysis of rectangular dielectric waveguide structures. *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, 1986, **34** (11):1104~1114
- 13 Yee K S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Trans. Antennas Propagation*, 1966, **17** (5):302~307
- 14 Mur G. Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time domain electromagnetic field equations. *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, 1981, **23**(4):377~382
- 15 Zhu Zhihong, Ye Weiming, Yang Miao *et al.*. The characteristic properties of transmission research of 2-D photonic crystals using the finite-difference time-domain (FDTD) method. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(5):522~525 (in Chinese)
- 16 Zhang Keqian, Li Dejie. *Electromagnetic Theory for Microwaves and Optoelectronics* (微波与光电子学中的电磁理论). Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1994

## Photonic Crystal Waveguide Directional Coupler

Zhu Zhihong Ye Weimin Yuan Xiaodong Zun Chun Mei Luoqing Zhang Wanyun  
(Research Center of Photon and Phonon, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

(Received 2 September 2002; revised 18 November 2002)

**Abstract:** Photonic crystal coupling waveguide is developed when line defects are introduced into photonic crystals. The finite-difference time-domain (FDTD) method is applied for analyzing the waveguide coupling of 2-D square lattice photonic crystals. Transmittivity at exits of photonic crystal waveguide with different coupling length is given. Results indicate that photonic crystal waveguide coupling follows general regulation of conventional dielectric waveguide coupling. Further studies show that coupling coefficient of the photonic crystal waveguide directional coupler is different, coupling coefficient is linear with the corresponding frequency.

**Key words:** photonic crystal; photonic band gap; finite-difference time-domain (FDTD); directional coupler