

椭圆介质柱光子晶体导模区域的调控

敖玲 冯帅* 王义全

(中央民族大学理学院, 北京 100081)

摘要 利用时域有限差分方法, 理论研究了由介电常数为 8.9 的介质柱排列在空气背景中组成的二维正方晶格光子晶体耦合腔光波导的传输特性。理论模拟结果表明, 将微腔紧邻的两个圆形介质柱改变为椭圆形, 通过改变椭圆的旋转角度能够调控导模的频率范围。通过将相邻微腔两边的椭圆形设置为不同旋转角度, 可以在保证高传输效率的同时进一步地降低导模的群速度。基于上述结构的光子晶体分支波导, 可以实现对不同频率信息的共享和选择。

关键词 光子晶体; 波导; 群速度; 微腔; 导模

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP48.032301

Adjusting Guiding Mode Region of Elliptical Dielectric Cylinder Photonic crystals

Ao Ling Feng Shuai Wang Yiquan

(School of Science, Minzu University of China, Beijing 100081, China)

Abstract The propagating characteristics of the electromagnetic waves through two-dimensional square lattice photonic crystal coupled-cavity waveguides are studied by the finite-difference time-domain method, which consists of dielectric cylinders with a permittivity of 8.9 immersed in air. The simulated results show that the guiding mode region can be controlled by partially changing the circular rods with oval rods adjacent to the cavities and setting the elliptical rod's rotating angles to different values. When the rotating angles of the oval rods around one cavity are set to be equal and be different to those of the oval rods around the adjacent cavities, the group velocity can be greatly reduced and high transmission efficiency of light transmission is insured. And the information of different frequencies can be shared and chosen at the same time by the photonic crystal waveguide branch based on the above structure.

Key words photonic crystal; waveguide; group velocity; microcavity; guiding mode

OCIS codes 230.5298; 230.7370; 050.5298

1 引言

光子晶体^[1,2]与电子在晶体中受到周期性势场作用而具有能带结构类似, 介电常数的周期性分布使得光子晶体对于在其中传输的光子具有能带结构, 光子能带之间可能存在光子带隙。光子带隙范围内的电磁波被禁止在光子晶体中传播, 而频率位于能带里的电磁波则能在光子晶体里无损地传播。带隙的宽度和位置与光子晶体的介电常数比值、周期排列的尺寸及排列规则都有关系。由于光子晶体具有许多崭新的性质和广阔的应用前景, 在光子晶体提出以后的十几年里得到了迅速的发展, 已经成为应用物理的研究热点。与此同时光子晶体也打开了许多令人振奋的研究领域, 如抑制自发辐射, 可观察有趣的量子干涉效应, 以及实现较强的光子局域。另外还可以用来制作多种性能优良的新型光无源和有源器件, 如光子晶体波导^[3~5]、滤波器^[6~10]、光延迟线^[11]和超高速光开关^[12,13]等。

在光子晶体中引入点缺陷后, 由于光子局域效应会在光子带隙中产生缺陷模式(类似于半导体晶体中的缺陷态), 频率与缺陷模式对应的入射光波可以通过光子晶体。如果将相邻的点缺陷连在一起而形成一个线缺陷, 那么该线缺陷所支持的光波模式也能够通过光子晶体, 只是光的传播通道只能沿着线缺陷所确定的路径。由于光子带隙效应, 该种光波模式在其他方向上是不能传输的。因此, 在光子晶体中引入线缺陷就可以

收稿日期: 2010-07-15; 收到修改稿日期: 2010-11-30

基金项目: 国家自然科学基金(10904176), 国家民委科研项目(10ZY0S, 09ZY012)和教育部“211工程”和“985工程”资助课题。

作者简介: 敖玲(1959—), 女, 副教授, 主要从事光子晶体和等离子体领域等方面的研究。E-mail: aolingz@sina.com

*通信联系人。E-mail: fengshuai75@163.com

构成一个理想的光波导。光子晶体光波导传输光的机理与传统的光波导是截然不同的。传统的光波导依靠波导层与衬底和覆盖层的折射率的差别,利用全内反射效应来引导光的传输,其传输特性不但受到波导材料参数的严格制约,而且存在严重的散射损耗和辐射损耗。基于周期结构的光子晶体波导可以分为两种类型。一种是在完整的光子晶体上引进线缺陷;另一种是由一系列的受强限制的点缺陷或耦合腔构成,通常叫作耦合光波导^[14~19]。在第二种光波导中,光信号在谐振腔中有局域的趋势,谐振腔之间的弱耦合使光信号沿光波导在谐振腔之间共振隧穿,因此,和传统的依靠全反射以及布拉格反射传输光信号的介质光波导不同,光信号在耦合腔光波导中跳跃式地沿光波导传播。由于其特殊的传输方式,光信号在这种光波导中的群速度比传统光波导中光信号的群速度低。由于基于光子晶体的光通信器件结构的紧凑性,以及在未来光集成芯片和全光通信网络中具有巨大的应用前景,相关研究已引起广泛关注并成为目前光通信领域研究的前沿。

目前人们广泛研究了基于圆形介质柱周期性排列组成的光子晶体耦合腔光波导。研究发现群速度和相邻的紧束缚缺陷模之间的耦合强度有非常紧密的关系。本文综合考虑光子晶体可以作为波导、滤波器和延迟线的特性,通过改变微腔紧邻的介质柱体的形状,将微腔紧邻的圆形介质柱改变为椭圆形,通过改变椭圆的旋转角度能够灵活地调控导模的频率范围。并且通过将相邻微腔两边的椭圆形设置为不同旋转角度,可以在保证高传输效率的同时进一步地降低导模的群速度。

2 数值计算与结果

利用时域有限差分方法^[20,21],首先计算了由圆柱形三氧化二铝(陶瓷)介质柱排列在空气中组成的二维正方晶格光子晶体。其中晶格常数 $a=10.0$ mm,介质柱的半径 $r=3.0$ mm,陶瓷柱的介电常数为 $\epsilon=8.9$ 。该种光子晶体的能带结构如图1所示。可以看出在第一个和第二个能带之间存在一个宽度为2 GHz的光子禁带,其频率范围从8.0~10.0 GHz。在第三个和第四个能带之间也存在一个宽光子带隙,其频率范围从14.10~16.90 GHz。沿着光传播方向每隔三个介质柱去掉一根介质柱,构一系列点缺陷,形成耦合腔光波导,如图2所示。不同频率的电磁波经过该结构波导的透过谱如图3所示,可以看出在第三个和第四个能带之间的第二个带隙中产生了导带,该导带的频率范围为14.96~15.13 GHz,导模宽度为0.17 GHz。

在此基础上,将微腔左右相邻的圆形介质柱改变为椭圆形,其中椭圆介质柱的长半轴为 $r_1=0.3675a$,短半轴为 $r_2=0.245a$,这样椭圆介质柱与圆形介质柱具有相同的面积。当椭圆介质柱的长半轴沿着光子晶体波导方向放置时,结构示意图如图4所示。入射光束通过该种结构光子晶体波导的透射谱如图5中所示,在频率范围14.80~14.98 GHz之间存在着非常高的传输效率。

在其他参数不变的条件下,在晶格内旋转椭圆介质柱,当椭圆介质柱的长轴方向与耦合腔波导的光传输方向之间的夹角分别为 $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ$ 和 90° 时,光子晶体波导的导模区域如图6中所示。可以看出,随着椭圆旋转角度的增加,光子晶体波导的导模区域由低频向高频方向移动。通过对相应耦合腔结构透射谱的计算,发现各结构波导在各自的导模区域内都具有非常好的传

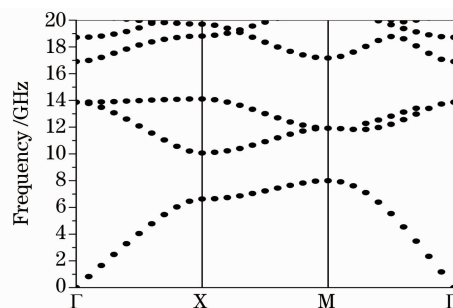


图1 正方晶格光子晶体的能带结构

Fig. 1 Band structure of square-lattice photonic crystal

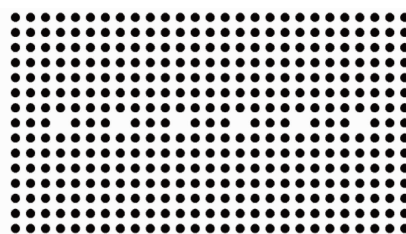


图2 正方晶格光子晶体耦合腔波导的示意图

Fig. 2 Schematic geometry of square-lattice photonic crystal coupled-cavity waveguide

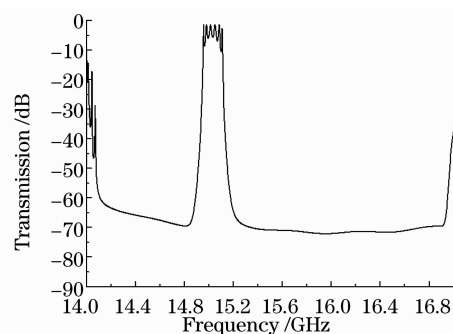


图3 电磁波经过图2中光子晶体耦合腔波导的透过谱
Fig. 3 Transmission spectrum of electromagnetic waves through the structure shown in Fig. 2

输效率。

为了降低光束在耦合腔波导中传输时的群速度,将相邻微腔两边的椭圆介质柱设置为不同旋转角度,当旋转角度分别为 0° 和 45° 时,光子晶体耦合腔波导的结构示意图如图7所示。电磁波经过该种光子晶体波导的透射谱如图8的实线所示。由于每种旋转角度的椭圆形缺陷具有各自不同的缺陷模,将相距一定距离的缺陷组合排列,不同局域模相互耦合从而形成两个宽度非常窄的导模区域。可以看出在频率区域 $14.86\sim 14.90$ GHz, $15.2\sim 15.23$ GHz内存在两个导带。当相邻微腔的椭圆柱旋转角度分别为 0° 和 90° 时,电磁波经过该结构波导的透射谱如图8中的虚线所示,在频率区域 $14.86\sim 14.89$ GHz, $15.37\sim 15.39$ GHz之间存在两个导带。

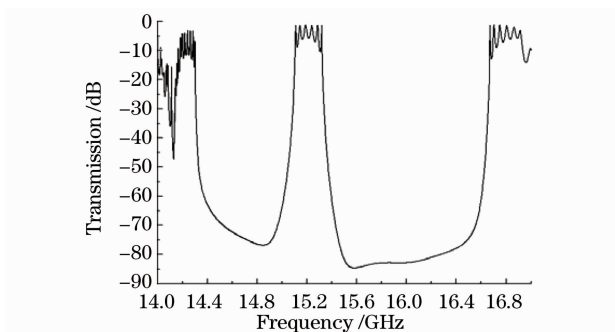


图5 电磁波经过图4中光子晶体耦合腔波导的透射谱
Fig. 5 Transmission spectrum of the electromagnetic waves through the structure shown in Fig. 4

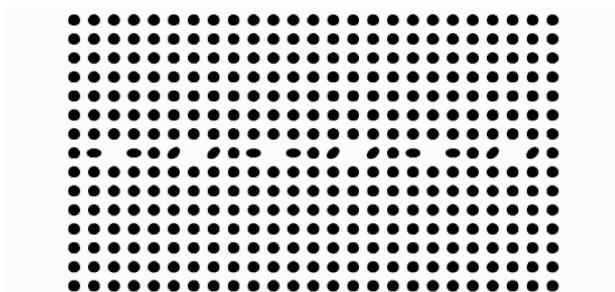


图7 椭圆介质柱光子晶体耦合腔波导的示意图
Fig. 7 Schematic geometry of elliptical dielectric cylinder photonic crystal coupled-cavity waveguide

耦合腔光波导的传播模是由这些微腔的局域模式之间发生耦合实现的。这种耦合类似于固体物理中的紧束缚近似。如果只考虑临近微腔之间的耦合,则无限长耦合腔光波导的色散关系表示为

$$\omega(\mathbf{K}) = \Omega[1 + \kappa \cos(\mathbf{K}\mathbf{R})], \quad (1)$$

式中 ω 为传播模的角频率, \mathbf{K} 为沿波导方向传播的传播模的波矢, Ω 为单个微腔局域模式的角频率, κ 为耦合强度系数, \mathbf{R} 为两个相邻微腔之间的距离。耦合强度系数与导带的宽度及单个微腔的角频率之间存在关系

$$\Delta\omega = 2|\kappa|\Omega. \quad (2)$$

由(1)式和(2)式,可以得到群速度的绝对值

$$|v_g(\mathbf{K})| = \frac{\Delta\omega R}{2} \sin(\mathbf{K}\mathbf{R}). \quad (3)$$

对于图4波导结构中的导模,其群速度曲线如图9(a)线所示,其群速度最大值为0.012倍真空中光速。

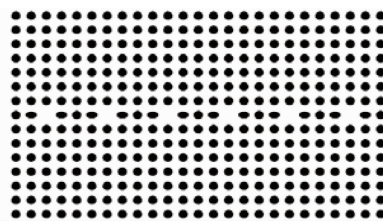


图4 椭圆介质柱光子晶体耦合腔波导的示意图
Fig. 4 Schematic geometry of elliptical dielectric cylinder photonic crystal coupled-cavity waveguide

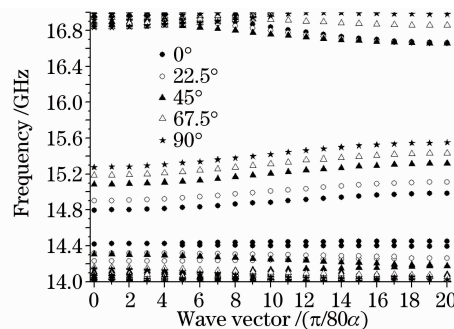


图6 正方晶格椭圆介质柱光子晶体的能带结构
Fig. 6 Band structure of square-lattice elliptical dielectric photonic crystal

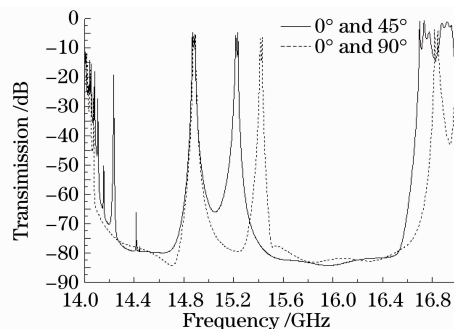


图8 电磁波经过图7中光子晶体耦合腔波导的透射谱
Fig. 8 Transmission spectrum of the electromagnetic waves through the structure shown in Fig. 7

对于图 7 所示光子晶体波导结构中的两个导模区域,其群速度最大值分别减小到 0.0045 倍和 0.0037 倍真空中光速,如图 9 中(b)线和(c)线所示。在此基础上,将两个不同结构的分支波导相结合,如图 10 所示。输入端为传统的 W1 型波导,一个分支波导由旋转角度为 0° 和 45° 的椭圆微腔交错排列组成,另一个分支波导由旋转角度为 0° 和 90° 的椭圆微腔组成。图 11 为不同频率的入射光经过该种光子晶体分支波导的光强空间分布。从图 11(a) 中可以看出入射频率为 14.890 GHz 的光束可以同时在这两个分支波导中稳定传输。进一步与光子晶体分支波导结构示意图 10 对比,发现该频率的光场能量主要集中在椭圆旋转角度为 0° 的微腔附近。当入射光的频率改变为 15.235 GHz 时,从图 11(b) 中可以看出该频率的入射光从上面的分支波导中输出,光场的能量重要局域在椭圆旋转角度为 45° 的微腔周围。从图 11(c) 中可以看出频率为 15.430 GHz 的入射光从下面的分支波导稳定输出,同样能量局域在椭圆旋转角度为 90° 的微腔周围。由于不同椭圆介质柱光子晶体微腔所支持的本征频率不同,通过将不同旋转角度的椭圆介质柱微腔交替排列,不仅增加了波导所支持的导模区域,同时增加了同种光场局域模式之间的耦合距离,降低了光束在其中传播的群速度。

3 结 论

系统研究了由椭圆形介质柱微腔组成的二维正方晶格光子晶体耦合腔光波导。理论模拟结果表明,通过改变椭圆形介质柱在晶格内的旋转角度,可以灵活地调控导模的频率范围。并且通过将相邻微腔两边的椭圆形设置为不同旋转角度,可以在保证高传输效率的同时进一步地降低导模的群速度。基于上述结构的光子晶体分支波导,可以实现对不同频率信息的共享和选择。这为设计光学频率信息的选择和判断器件提供了一个新的方向。

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 superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 3 M. Tokushima, H. Yamada. Light propagation in a photonic-crystal-slab line-defect waveguide[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2002, **38**(7): 753~759
- 4 Han Shouzhen, Tian Jie, Ren Cheng *et al.*. A Y-branch photonic crystal slab waveguide with an ultrashort interport interval [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, **22**(8): 1934~1936
- 5 Kong Weijin, Yun Maojin, Wang Mei *et al.*. Beam splitter and deflector in two-dimensional photonic crystals[J]. *Acta*

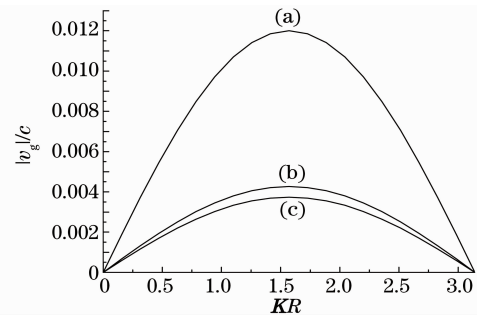


图 9 电磁波在环形腔波导传输时的群速度
Fig. 9 Group velocity of electromagnetic waves through annular cavity waveguides

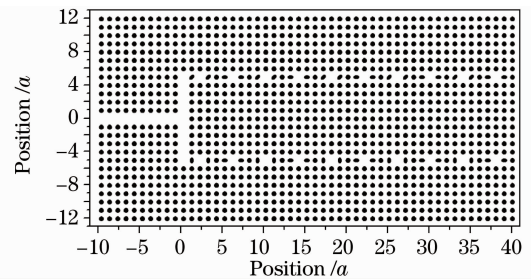


图 10 椭圆介质柱光子晶体分支波导的示意图
Fig. 10 Schematic geometry of elliptical dielectric cylinder photonic crystal branch waveguide

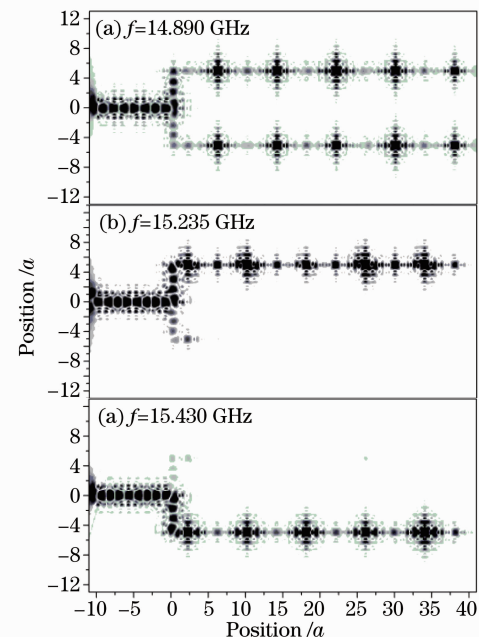


图 11 不同频率的电磁波经过图 10 所示结构的光强分布
Fig. 11 Electric intensity distribution of the electromagnetic waves at different frequencies through the structure shown in Fig. 10

- Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 818~821
- 孔伟金, 云茂金, 王 美 等. 二维光子晶体分束器和偏转器[J]. 光学学报, 2009, **29**(3): 818~821
- 6 Hongliang Ren, Chun Jiang, Weisheng Hu *et al.*. Photonic crystal channel drop filter with a wavelength-selective reflection micro-cavity[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(6): 2446~2458
- 7 Yu Haixia, Du Chunmei, Liang Guangdong. Tunable wavelength filter based on photonic crystal with complex periodical structure[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(3): 44~48
- 于海霞, 杜春梅, 梁广东. 复周期结构光子晶体波长可调谐滤波器的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(3): 44~48
- 8 Ziyang Zhang, Min Qiu *et al.*. Coupled-mode analysis of a resonant channel drop filter using waveguides with mirror boundaries[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(1): 104~113
- 9 Hitomichi Takano, Bong-Shik Song, Takashi Asano *et al.*. Highly efficient multi-channel drop filter in a two dimensional hetero photonic crystal[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(8): 3491~3496
- 10 Shanhui Fan, Pierre R. Villeneuve, J. D. Joannopoulos *et al.*. Channel drop tunneling through localized states[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **80**(5): 960~963
- 11 Mehmet Bayindir, Ekmel Ozbay. Band-dropping via coupled photonic crystal waveguides[J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(22): 1279~1284
- 12 Pierre R. Villeneuve, Daniel S. Abrams, Shanhui Fan *et al.*. Single-mode waveguide microcavity for fast optical switching [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(24): 2017~2019
- 13 Hu Xiaoyong, Liu Yuanhao, Tian Jie *et al.*. Ultrafast all-optical switching in two-dimensional organic photonic crystal[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(12): 121102
- 14 S. Olivier, C. Smith, M. Rattier *et al.*. Miniband transmission in a photonic crystal coupled-resonator waveguide[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(13): 1019~1021
- 15 Amnon Yariv, Yong Xu, Reginald K. Lee *et al.*. Coupled-resonator optical waveguide: a proposal and analysis[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(11): 711~713
- 16 Yiquan Wang, Juan Liu, Bo Zhang *et al.*. Simulations of defect-free coupled-resonator optical waveguides constructed in 12-fold quasiperiodic photonic crystals[J]. *Phys. Rev. B*, 2006, **73**(15): 155107
- 17 Shen Hongjun, Tian Huiping, Ji Yuefeng. A novel photonic crystal slab waveguide with dispersionless slow light[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(4): 2820~2826
- 沈宏君, 田惠平, 纪越峰. 一种新型无色散慢光光子晶体薄板波导[J]. 物理学报, 2010, **59**(4): 2820~2826
- 18 Lü Shuyuan, Zhao Jianlin, Zhang Dong. Slow light transmission in two-dimension square photonic crystal waveguide[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2224~2228
- 吕淑媛, 赵建林, 张 栋. 二维正方晶格光子晶体波导中的慢光传输[J]. 光子学报, 2009, **38**(9): 2224~2228
- 19 Yin Jianling, Huang Xuguang, Liu Songhao *et al.*. Properties and applications of photonic quasicrystals[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(1): 011601
- 殷建玲, 黄旭光, 刘颂豪 等. 准晶光子晶体特性及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(1): 011601
- 20 Kane S. Yee. Numerical solutions of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media[J]. *IEEE Trans. Antenna Propag.*, 1966, **AP-14**(3): 302~307
- 21 Jean-Pierre Berenger. Three-dimensional perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves[J]. *J. Comput. Phys.*, 1996, **127**: 363~379