

文章编号: 0258-7025(2010)02-0567-05

介质柱形状对准晶光子晶体带隙特性的影响

殷建玲¹ 黄旭光² 刘颂豪² 刘 军¹

¹ 军械工程学院光学与电子工程系光纤技术研究所, 河北 石家庄 050003
² 华南师范大学光子信息技术广东省高校重点实验室, 广东 广州 510006

摘要 采用时域有限差分法(FDTD)对介质柱构成的 8 重准晶光子晶体(PQCs)的带隙特性进行了研究,分别讨论了介质柱形状和对称度变化对带隙宽度、带隙对方向不敏感特性的影响。数值模拟和分析结果表明,当填充因子保持不变时,介质柱形状不会影响带隙对方向不敏感的特性;六边形、正方形和三角形介质柱构成的准晶光子晶体的带隙宽度分别是圆形介质柱带隙宽度的 98.9%, 97.8% 和 91.5%,带隙宽度随着介质柱对称程度的降低逐渐变窄,但变化可以忽略;带隙宽度随介质柱的椭圆率,即对称度的降低而变窄,但变化趋势平缓,即使椭圆率小至 0.3,相对带隙仍然有 5.9%。这些分析结果表明,8 重准晶光子晶体的带隙对加工误差所引起的形状变形和轴长偏离都具有较高的稳定性。

关键词 导波与光纤光学;时域有限差分法;准晶;光子晶体;光子带隙

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103702.0567

Effect of the Structure Shape on the 8-Fold Photonic Quasicrystals

Yin Jianling¹ Huang Xuguang² Liu Songhao² Liu Jun¹

¹ Fiber Optic Technology Laboratory, Department of Optical and Electronic Engineering,
Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China
² Laboratory of Photonic Information Technology,
South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China

Abstract The effect of the cylinder shape and symmetry of two-dimensional 8-fold photonic quasicrystals (PQCs) is numerically investigated using the finite difference time domain (FDTD) method. Results indicate that, when the fill factor remains: i) the property that the bandgap is independent on the direction can be remained; ii) the lower the symmetry of the cylinder shape is, the narrower the bandgap of 8-fold PQCs is. The reduction of the band gap is negligibly small for the hexagon and square cylinder while it reduces more for the triangle cylinder; iii) the lower the symmetry of the ellipse cylinder shape is, the narrower the bandgap of 8-fold PQCs is. However, the variant of the bandgap is very gently.

Key words guided wave and fiber optics; finite difference time domain; quasicrystals; photonic crystals; photonic bandgap

1 引 言

传统意义上的光子晶体^[1,2]是指存在“光子带隙”(PBG)的周期性人工微结构,故光子晶体也被称为光子带隙材料。但是,许多研究表明,在具有准晶排列特征的人工微结构中也存在光子带隙^[3~7]。这些结构获得完全带隙的折射率阈值比周期性光子晶体低得多^[3],这使得许多基于 PBG 的器件能用普通光通信材料(如,硅)来实现,对发展与当前光纤器件

的直接耦合非常重要。不仅如此,准晶光子晶体(PQCs)在实现亚波长远场成像^[8,9]、降低微腔激光器阈值^[10]、提高 LED 发光效率^[11]等性能上甚至还优于周期性光子晶体,具有广阔的应用前景,深入分析和讨论准晶光子晶体的带隙特性对于实际应用具有指导意义。

周期性光子晶体的带隙特性与其结构及材料密切相关,当光子晶体结构的对称性降低时,就会解除

收稿日期:2009-03-10;收到修改稿日期:2009-04-28

基金项目:广东省自然科学基金重点项目(05100534)和国家教育部留学回国人员科研启动基金资助课题。

作者简介:殷建玲(1979—),女,讲师,主要从事光子学及其应用方面的研究。E-mail: yinjianling2002@163.com

布里渊区中高对称点处光子能带的简并对光子晶体带隙尺寸的限制,从而获得较大的完全带隙。一般来说,采用各向异性介质^[12]、原有介质柱中间插入尺寸较小的介质柱^[13]、改变晶胞和介质柱的形状^[14]或非对称性介质柱的取向^[15]等都可以增大完全带隙的宽度。但是,对于准晶光子晶体,其介质柱形状和对称性与带隙之间的关系还未见报道。本文采用时域有限差分(FDTD)法,分别讨论形状为圆形、正方形、六边形、三角形以及椭圆的介质柱对它们所构成的二维8重准晶光子晶体光子带隙特性的影响,初步探讨介质柱形状和对称性与带隙之间的关系。

2 数值方法

通常计算光子晶体能带结构的方法主要有时域分析和频域分析。对于在传输方向具有周期性的晶体结构,采用平面波展开法可以在有限的时间内得到比较准确的能带结构,但是,8重准晶光子晶体在传输方向上不是周期性结构,对于这种结构,如果再采用平面波展开法来计算,所需的计算时间和内存都非常大,很难在有限时间得到能带结构,而采用完美匹配层边界条件的FDTD法适用于各种计算^[16]。本文采用FDTD法来计算结构无序对准晶光子晶体带隙特性的影响,光源选用脉冲光源,带隙以透过率低于-30 dB为标准。

理想的二维8重准晶光子晶体如图1所示,以正方形和菱形为基本原胞,以相继转动45°和重复排列而成;晶格常数(原胞的边长)为 a ,深灰色部分为基底(空气),白色部分为介质柱,角 θ 代表光的入射方向,当入射方向沿 x 轴时,入射角 $\theta=0$ 。为了充分描述所有方向的入射和透射情况,入射角的取值范围由介质柱形状和8重准晶结构共同确定。由于8重准晶对称性较高(具有8重旋转对称性),所以,对于对称性低于8重的介质柱,其入射角范围由

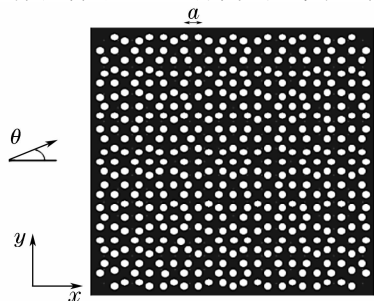


图1 圆形介质柱构成的8重准晶光子晶体
Fig.1 Schematic view of the two-dimensional octagonal PQC

介质柱各自的对称性所决定:圆形、正方形、六边形、三角形以及椭圆形介质柱的入射角取值范围分别为 $0^\circ\sim 22.5^\circ$, $0^\circ\sim 30^\circ$, $0^\circ\sim 45^\circ$, $0^\circ\sim 60^\circ$ 和 $0^\circ\sim 90^\circ$ 。

3 模拟结果和讨论

以空气为背景,相对介电常数为 $\epsilon = 5.0$ ($n = 2.24$),半径 r_0 为 $0.24a$ (该介电常数对应的最佳填充因子^[17,18])的圆形、正方形、六边形、三角形以及椭圆形无限长介质柱所构成的8重准晶光子晶体为研究对象,并假设样品包含图1所示的图样范围,考察介质柱形状和对称性对8重准晶光子晶体带隙特性的影响。

3.1 介质柱形状对带隙特性的影响

数值模拟结果表明,当入射角 $\theta=0^\circ$ 时,圆形、正方形、六边形和三角形介质柱所构成的8重准晶光子晶体对TM模的带隙位置和宽度如图2和表1所示。

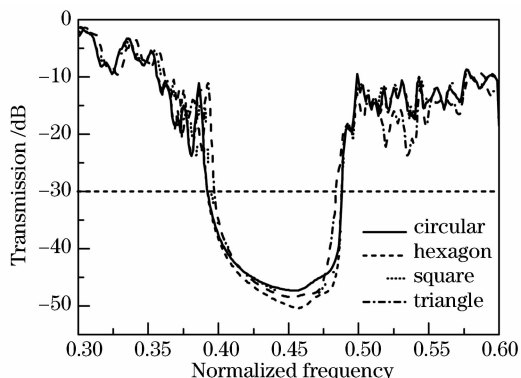


图2 4种形状的介质柱所构成的8重准晶光子晶体的透射谱线

Fig.2 Transmission spectra of the 8-PQCs with 4 different cylinder shapes

表1 4种形状的介质柱所构成的8重准晶光子晶体的带隙
Table 1 Bandgaps of 8-PQCs for 4 different cylinder shapes

Cylinder shape	Range of incident directions / ($^\circ$)	Bandgap $\omega / (2\pi c) / \text{eV}$
Circular	$0\sim 22.5$	$0.394\sim 0.488$
Hexagon	$0\sim 30$	$0.394\sim 0.487$
Square	$0\sim 45$	$0.395\sim 0.487$
Triangle	$0\sim 60$	$0.397\sim 0.483$

从表1和图2可以看出,在填充因子相同的情况下,8重准晶光子晶体光子带隙与介质柱的形状有关,但影响不明显。进一步的数据分析显示,带隙宽度随着介质柱对称程度的降低逐渐变窄,其中六边形和正方形介质柱构成的准晶光子晶体的带隙宽度分别是圆形介质柱的98.9%和97.8%,带隙变化

几乎可以忽略,而三角形介质柱构成的准晶光子晶体的带隙宽度变化明显,是圆形介质柱带隙宽度的 91.5%。总体而言,只要制作过程中各介质柱的位置和填充因子保持不变,介质柱形状对 8 重准晶光子晶体带隙的影响很小,几乎可以忽略,这与周期性光子晶体的带隙特性非常类似。

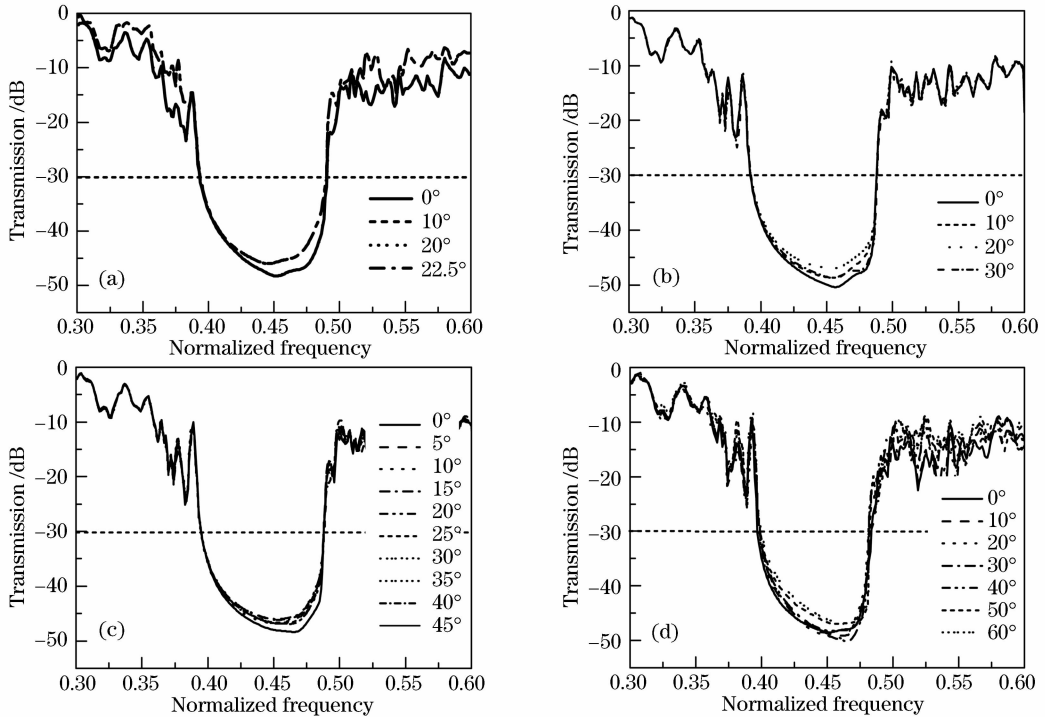


图 3 圆形(a)、六边形(b)、正方形(c)和三角形(d)介质柱构成的 8 重准晶光子晶体的透射谱线
Fig. 3 Transmission spectra of the 8-PQCs with the cylinder shape of circular (a), hexagon (b), square (c) and triangle (d)

从图 3 可以看出,带隙与入射方向无关的特性并不受介质柱形状的影响;但是,当透过率小于 -30 dB 时,光子带隙的位置和宽度均关于 22.5° 对称变化,带隙先随着入射角的增大逐渐偏离入射角为 0° 的透射谱线,到 22.5° 时偏离最大,然后,随着入射角的增大逐渐又与入射角为 0° 的透射谱线重叠。由此不难得出,8 重准晶光子晶体带隙对方向不敏感,而且这种不敏感与介质柱的形状无关,仅与 8 重准晶光子晶体的 8 次旋转对称性有关。

3.2 介质柱对称性对带隙特性的影响

为了更清楚地说明介质柱形状对准晶光子晶体带隙特性的影响,以椭圆形介质柱构成的 8 重准晶光子晶体为例,进一步分析介质柱形状的对称度对其带隙特性的影响。设介质柱的椭圆率定义为 $L = r_y/r_x$,其中 r_y 为椭圆的短半轴, r_x 为椭圆的长半轴,如图 4 所示。在介质柱的填充因子保持不变的情况下,椭圆率分别为 0.3,0.5 和 1.0 所对应的 8 重

准晶光子晶体的一个重要特性是带隙对入射方向不敏感,因此,介质柱形状对该特性的影响也需加以分析。图 3 给出当入射角的取值范围分别为 $0^\circ \sim 22.5^\circ$, $0^\circ \sim 30^\circ$, $0^\circ \sim 45^\circ$, $0^\circ \sim 60^\circ$ 时,圆形、正方形、六边形以及三角形介质柱所构成的 8 重准晶光子晶体的带隙特性。

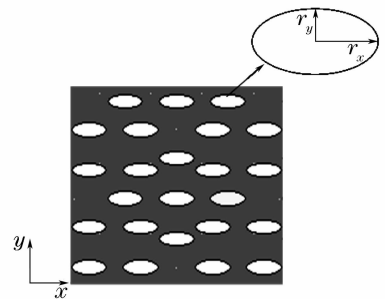


图 4 椭圆介质柱构成的 8 重准晶光子晶体结构 (部分截取图)

Fig. 4 Schematic view of the 8 PQCs with the cylinder shape of ellipse

准晶光子晶体的透射谱线以及带隙宽度随椭圆率的变化分别如图 5 和图 6 所示,其中介电常数 $\epsilon = 5.0$,填充因子对应于圆形介质柱的 $r/a = 0.24$ 。

从图 5 和图 6 可以看出:1) 随着介质柱椭圆率的增大,8 重准晶光子晶体的带隙变得越来越窄,并

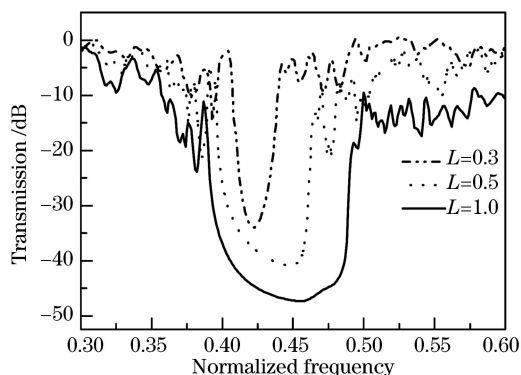


图 5 椭圆率分别为 0.3, 0.5 和 1.0 所对应的 8 重准晶光子晶体的透射谱线

Fig. 5 Transmission spectra of the 8-PQCs with the ellipticity of 0.3, 0.5 and 1.0

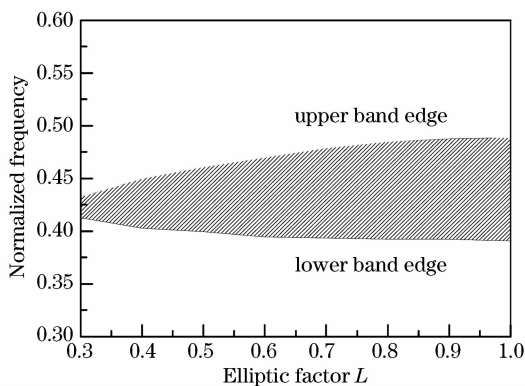


图 6 8 重准晶光子晶体的带隙随椭圆率的变化图

Fig. 6 Change of the bandgap of the 8-PQCs with the cylinder ellipticity

且中心频率逐渐向低频方向移动。这进一步证实了前面的结论——准晶光子晶体的带隙宽度随着对称度的降低而变窄。2) 对于准晶光子晶体而言, 介质柱形状的改变和介质柱对称性的降低并不能像周期性光子晶体那样增大带隙宽度, 反而会降低带隙的宽度。3) 8 重准晶光子晶体的带隙宽度随椭圆率的变化非常缓慢, 特别是椭圆率在 1.0~0.7 时, 带隙位置和宽度的变化几乎可以忽略; 即使椭圆率小到 0.3 时, 该结构的相对带隙仍然有 5.9%。这说明 8 重准晶光子晶体带隙的稳定性比较高。

图 7 给出椭圆率为 0.5 时, 8 重准晶光子晶体的透射谱线在对称度相差最大的人射角 ($0^\circ \sim 90^\circ$) 范围内的变化。从图 7 可以看到, 带隙的位置基本不变, 但是, 随着入射方向的增大, 带隙变得越来越深。实际上, 带隙加深是由于入射方向的增大使介质柱的尺寸在入射方向上看起来更大, 而导致光的透过率降低。剔除带隙深度的影响, 准晶光子晶体带隙对入射方向不敏感的特性表现出与介质柱的对

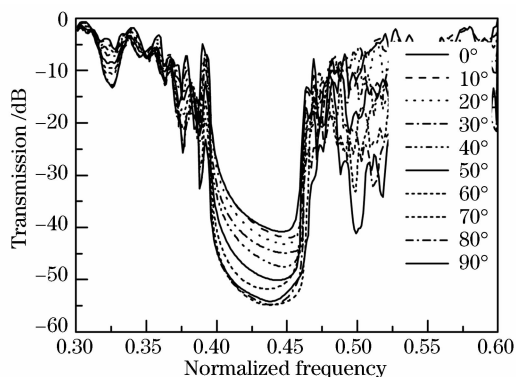


图 7 椭圆率为 0.5 时 8 重准晶光子晶体的透射谱线随入射角的变化曲线

Fig. 7 Change of the transmission spectra of 8-PQCs for different incident directions with the ellipticity of 0.5 称性无关。

在实际加工和制作过程中, 介质柱形状或轴长的偏离往往是由于工艺或加工误差引起的, 所以, 带隙较高的稳定性和带隙对入射方向的不敏感还说明 8 重准晶光子晶体能够承受较大的加工误差。

4 结 论

采用时域有限差分法分析了介质柱形状和对称性对介质柱构成的 8 重准晶光子晶体的带隙特性的影响。结果表明, 只要格点位置和填充因子保持不变, 介质柱形状对带隙与方向无关的特性以及中心频率的位置都没有影响; 而带隙的宽度则随着介质柱形状对称度的降低而变窄, 但其影响在对称度较高时可以忽略; 8 重准晶光子晶体的带隙对工艺上可能引起的形状或轴长偏离具有较高的稳定性; 另外, 介质柱形状的改变和介质柱形状对称性的降低并不能增大准晶光子晶体的带隙宽度, 这与周期性光子晶体的性质是不同的。

参 考 文 献

- Lu Xiaodong, Han Peide, Quan Yujun *et al.*. Influences of wave vector direction on energy bands and applications of two-dimensional photonic crystals [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 770~774
陆晓东, 韩培德, 全宇军 等. 波矢方向对二维光子晶体能带及应用的影响[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 770~774
- Wang Qingyue, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. Large-mode-area photonic crystal fiber laser output high average power femtosecond pulses [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1603~1606
王清月, 胡明列, 宋有建 等. 用大模场光子晶体光纤获得高功率飞秒激光[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1603~1606
- J. R. Vivas, D. N. Chigrin, A. V. Lavrinenko *et al.*. Resonant add-drop filter based on a photonic quasicrystal [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(3): 826~835

- 4 D. T. Roper, D. M. Beggs, M. A. Kaliteevski *et al.*. Properties of two-dimensional photonic crystals with octagonal quasicrystalline unit cells [J]. *J. Mod. Opt.*, 2006, **53**(3):407~416
- 5 M. A. Kaliteevski, S. Brand, R. A. Abram *et al.*. Two-dimensional Penrose-tiled photonic quasicrystals; diffraction of light and fractal density of modes [J]. *J. Mod. Opt.*, 2000, **47**(11):1771~1778
- 6 M. E. Zoorob, M. D. B. Charlton, G. J. Parker *et al.*. Complete photonic bandgaps in 12-fold symmetric quasicrystals [J]. *Nature*, 2000, **404**(6779):740~743
- 7 X. D. Zhang, Z. Q. Zhang, C. T. Chang. Absolute photonic band gaps in 12-fold symmetric photonic quasicrystals [J]. *Phys. Rev. B*, 2001, **63**(8):081105
- 8 Z. Feng, X. D. Zhang, Y. Q. Wang *et al.*. Negative refraction and imaging using 12-fold symmetry quasicrystals [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(24):247402
- 9 X. D. Zhang. Negative refraction and focusing of electromagnetic wave through two-dimensional photonic crystals [J]. *Front. Phys. China*, 2006, **1**(4):396~404
- 10 K. Nozaki, T. Baba. Quasiperiodic photonic crystal microcavity lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(24):4875~4877
- 11 Z. S. Zhang, B. Zhang, J. Xu *et al.*. Effects of symmetry of GaN-based two-dimensional photonic crystal with quasicrystal lattices on enhanced surface light extraction [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(17):171103
- 12 Z. Y. Li, B. Y. Gu, G. Z. Yang. Large absolute band gap in 2D anisotropic photonic crystals [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **81**(12):2574~2577
- 13 C. M. Anderson, K. P. Giapis. Larger two-dimensional photonic band gaps [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**(14):2949~2952
- 14 M. Qiu, S. He. Large complete band gap in two-dimensional photonic crystals with elliptic air holes [J]. *Phys. Rev. B*, 1999, **60**(15):10610~10612
- 15 R. Wang, X. Wang, B. Gu *et al.*. Effects of shapes and orientations of scatters and lattice symmetries on the photonic band gap in two-dimensional photonic crystals [J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, **90**(9):4307~4313
- 16 A. Lavrinenko, P. Borel, L. Frandsen *et al.*. Comprehensive FDTD modelling of photonic crystal waveguide components [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(2):234~248
- 17 J. L. Yin, X. G. Huang, S. H. Liu *et al.*. Photonic bandgap properties of 8-fold symmetric photonic quasicrystals [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **269**(2):385~388
- 18 Yin Jianling, Huang Xuguang, Liu Songhao. Effect of structure disorder on band gap of eight-fold photonic quasicrystals [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8):1077~1080
殷建玲, 黄旭光, 刘颂豪. 加工误差对 8 重准晶光子晶体带隙特性的影响 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(8):1077~1080