

局部准周期光子晶体及其缺陷模式分析

沈 云¹ 于国萍² 傅继武¹ 邹林儿¹ 范定寰¹

(¹南昌大学物理学系, 江西 南昌 330031
²武汉大学物理科学与技术学院, 湖北 武汉 430072)

摘要 利用时域有限差分方法(FDTD)研究了由十二重准周期光子晶体(PQ)局部结构组成的复合二维(2D)光子晶体(PC)及其点缺陷的光学特性。结果表明,由于准周期光子晶体局部结构平移对称性缺失,该复合光子晶体可以通过改变缺陷位置来调节缺陷模的特性,由此具有比周期光子晶体更为丰富的缺陷模式及更灵活的调节方式。同时,研究表明,缺陷模频率与所去除介电柱之间的相互影响强弱具有关联性。通过不同点缺陷腔的组合可以进一步获得灵活多样的缺陷模式。

关键词 集成光学;复合光子晶体;时域有限差分;缺陷模式

中图分类号 O753 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0623001

Defect-Mode Properties of Photonic Crystals Constructed with a Portion of Photonic Quasicrystals

Shen Yun¹ Yu Guoping² Fu Jiwu¹ Zou Liner¹ Fan Dinghuan¹

(¹Department of Physics, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China
²School of Physics and Technology, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract Complex two-dimensional (2D) photonic crystal (PC) constructed with a portion of 12-fold photonic quasicrystals (PQ) is proposed and its defect-mode properties are studied by performing finite-difference time-domain (FDTD). The results show that such complex PC allow for richer defect modes and higher degree of flexibility compared with conventional periodic PCs due to the absence of translational symmetry in the portion of 12-fold PQ. It is also demonstrated that the frequencies of defect modes are related to the strength of the interplay of the removed cylinders. The defect modes of flexibility and tunability can be obtained by combining different defect cavities.

Key words integrated optics; complex photonic crystals; finite-difference time-domain; defect modes

OCIS codes 230.5298; 160.5293; 250.5300

1 引 言

准周期光子晶体^[1,2]由于平移对称性缺失,不同位置的格点具有不同周边环境,因此不仅可以像周期光子晶体一样通过改变缺陷尺寸和缺陷介质的介电常数来调节缺陷模特性,还可以通过改变缺陷的位置来调节缺陷模特性,由此具有比一般周期光子晶体更为丰富的缺陷模式和更灵活多样的调节方式^[3]。但同时,准周期光子晶体结构周期性的缺失使得其能带特性的精确计算面临着困难^[4]。更重要的是,一些重要的光子器件如腔阵列激光器^[5]、波导

阵列特异介质^[6]和耦合共振光学波导^[7,8]等不可避免地需要周期性结构的存在。针对这些问题,由准周期结构的某一部分组成的复合光子晶体结构,即局部准周期结构在理论上^[4,9]被提出并在实验上^[10,11]得到了制备。研究表明,这种在长程上保持周期性结构的局部准周期光子晶体,可以表现出准周期光子晶体的光学特性。另一方面,光子晶体功能器件的应用与光子晶体缺陷密切相关。在光子晶体结构中引入各种点或线缺陷,在光子禁带中就会产生各种缺陷模式,利用这些模式的空间局域性和

收稿日期: 2010-11-26; **收到修改稿日期**: 2010-12-21

基金项目: 国家自然科学基金(60967003)、江西省自然科学基金(2010GQW0044)和南昌大学科学基金(Z03355)资助课题。

作者简介: 沈 云(1980—),男,博士,讲师,主要从事微纳光子器件、非线性光学等方面的研究。

E-mail: shenyunoptics@gmail.com

奇异的色散特性,可以制作光子晶体激光器^[12]、波导^[12,13]、分束器^[14]、滤波器^[15]和波分复用^[16]等微型功能器件,极大地拓展了光子晶体的应用范围。目前,虽然完整局部准周期光子晶体的光学特性已有研究^[4,9~11],但缺陷特性的研究少见报道。基于此,本文针对由十二重准周期光子晶体局部结构组成的复合二维光子晶体,在研究其完整结构光学特性的基础上,着重研究了其点缺陷的光学特性。结果表明,由于准周期光子晶体局部结构平移对称性的缺失,该复合光子晶体可通过改变缺陷位置来调节缺陷模特性,由此具有比周期光子晶体更为丰富的缺陷模式及更灵活的调节方式。另外,缺陷模频率与所去除介质柱之间的相互影响强弱具有关联性。对于该局部准周期光子晶体,其灵活多样的缺陷模式还可以通过不同点缺陷腔的组合获得。

2 模拟与分析

由部分十二重准周期光子晶体结构组成的二维复合光子晶体如图 1 所示。其中实线连接区域表征十二重光子晶体局部结构。从整体上看,该局部准周期复合光子晶体为由图中虚线所围 7 个介质柱组成的六边形 Wigner-Seitz 原胞构成的正三角周期光子晶体。其 x 方向上的周期为 $(1+\sqrt{3})a$,其中 a 为晶格常数。在各个原胞中,中心介质柱由 6 个外围介质柱环绕。而这 6 个外围介质柱则各自由 5 个紧邻介质柱环绕,与中心介质柱相比有不同的局域环境,由此造成平移对称性的缺失。研究表明,该复合光子晶体的能带特性优于一般三角晶格周期光子晶体,表现出十二重准周期光子晶体的能带特性^[4]。

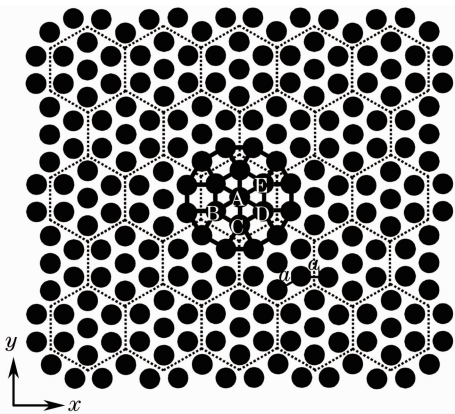


图 1 十二重准周期光子晶体局部结构(实线)组成的复合光子晶体结构

Fig. 1 Schematic geometry of complex PC constructed with a portion of 12-fold PQ (solid lines)

由于 Wigner-Seitz 原胞内介质柱排列平移对称性缺失,若选取一个原胞从中去掉一个介质柱,则去掉中心介质柱 A,与去掉一个外围介质柱,如 B,会形成两种不同的结构缺陷。同理,若去掉两个介质柱,如去掉 A-B, B-C, B-D 以及 B-E,则会形成 4 种不同的结构缺陷。如果去掉更多的介质柱,则会有更多不同结构缺陷形成。由此可见,相较于一般周期光子晶体,该局部准周期光子晶体可以通过改变缺陷的位置来获得不同缺陷结构,因此可以提供数量更多、调节方式更灵活的缺陷结构及相应的缺陷模式,这在拓展与缺陷密切相关的光子晶体功能器件的应用上是十分有利的。

为了研究局部准周期光子晶体及其点缺陷的光学特性,采用时域有限差分(FDTD)方法对其进行数值分析。在文中,介质柱的介电常数为 13.0,背景介质为空气,其介电常数为 1.0。最紧邻的两个介质柱之间的距离 a 即晶格常数根据实验值取为 709 nm^[11]。FDTD 计算中设置为 TE 偏振光入射,其电场偏振方向与介质柱平行。计算区域上下边界采用周期边界条件且与所计算结构样品上下界面相接。计算区域左右边界采用完全吸收边界条件,分别远离结构样品左右界面。为了计算透射系数,选择紧邻样品左右边界且与样品等高的两个面作为输入输出窗口,累加这两个窗口上的电场强度之和计算透射系数。

不同介质柱半径 R 相应的完整局部准周期光子晶体透射谱线如图 2 所示,实线、虚线、点划线分别对应于 $R = 0.18a, 0.20a, 0.22a$ 。计算中所采用的局部准周期光子晶体结构样品如插图所示。从图 2 可以看出,在介质柱从 $0.18a$ (实线)增加到 $0.22a$ (点划线)时,第二带隙逐渐凸现出来,而在这一过程中,第一带隙的宽度逐渐减小。这表明,当介质柱半径增加时,更多的带隙会出现,而对于同一带隙,其宽度则会随介质柱半径的增加而减小。局部准周期光子晶体点缺陷特性通过去掉图 2 插图中所示样品中心原胞内不同位置的介质柱而计算得到。以介质柱半径 $R = 0.20a$ 为例,其去掉不同位置介质柱而得到的点缺陷透射谱如图 3 所示。其中,去掉介质柱 A 和 B 可分别在归一化频率 0.2~0.5 范围内各产生一个透射峰,如图 3(a)和(b)中的 f_1 和 f_2 所示,对应归一化频率分别为 0.3862 和 0.3777。去掉介质柱 A-B, B-C, B-D 以及 B-E 则分别各产生两个透射峰值,如图 3(c), (d), (e) 以及 (f) 中的 f_3 和 f_4 , f_5 和 f_6 , f_7 和 f_8 以及 f_9 和 f_{10} 所示,对应归

一化频率分别为 0.3557 和 0.4053, 0.3448 和 0.4089, 0.3682 和 0.3873 以及 0.3746 和 0.3805。另外,在计算中发现,入射光方向的变化对缺陷模式的位置无影响,这表明,缺陷模所在的禁带是一个完全禁带。计算中也发现,对于较小的介质柱 R ,由于其带隙个数的增加,透射峰值不仅在第一带隙出现,而且会在其他带隙出现。

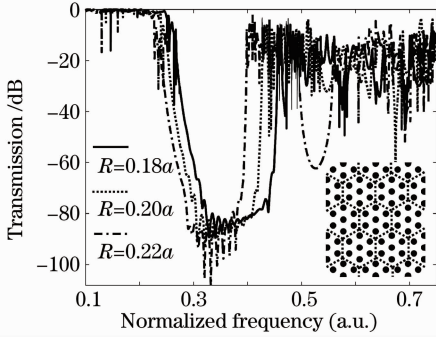


图2 不同介质柱半径 R 相应的完整复合光子晶体透射谱(插图:计算中采用的完整复合光子晶体结构样品)
Fig. 2 Transmission spectra of perfect complex PC sample with different R (Inset: samples of perfect complex PC)

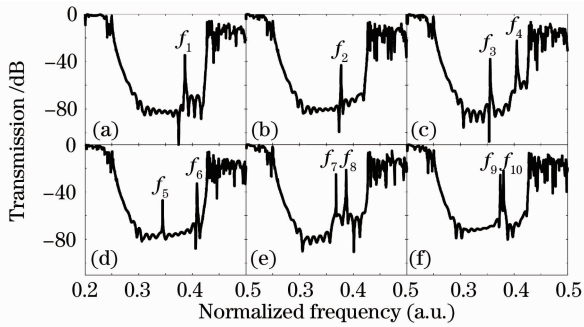


图3 分别去掉介质柱(a)A, (b)B, (c)A-B, (d)B-C, (e)B-D, (f)B-E后各自所产生的透射谱线
Fig. 3 Transmission spectra of different structural defect cavities in complex PC with removal of (a) A, (b) B, (c) A-B, (d) B-C, (e) B-D, (f) B-E respectively

分析图3可以发现,去掉A-B所对应 f_3 和 f_4 [图3(c)]与只去掉A所对应的 f_1 [图3(a)]以及只去掉B所对应的 f_2 [图3(b)]相比,其透射峰所在的归一化频率位置不同,有 $f_3 < f_2 < f_1 < f_4$ 。这表明,去掉A-B所形成的缺陷模并不是由单独去掉A和去掉B所对应缺陷模的简单再现;其由于介质柱A和B的互相影响,形成的缺陷膜频率位置分别以 $f_2 - f_1$ 为参照,以类似相互排斥的形式向两端有所偏移。对于具有相同局域环境的以A为中心的外围6个介质柱,去掉B-C、B-D以及B-E分别产生的

缺陷模 f_5 和 f_6 [图3(d)], f_7 和 f_8 [图3(e)]以及 f_9 和 f_{10} [图3(f)]与由单独去掉B所产生的缺陷模 f_2 的归一化频率位置相比,存在 $f_5 < f_7 < f_9 < f_2 < f_{10} < f_8 < f_6$ 。这表明,外围的6个介质柱靠得越近,相互影响的强度越大,其缺陷模式归一化频率以 f_2 为中心向两端偏移得越远;相比而言,互相间隔距离较远的B-E,其互相之间影响较弱,其 $f_9 - f_{10}$ [图3(f)]极其接近 f_2 [图3(b)]。该现象类似于固体物理能带理论中的原子能级分裂。紧束缚理论表明,原子之间距离越近,波函数的交叠越多,进而配位数及交叠积分越大,则由原子能级分裂形成的能带越宽。对于局部准周期光子晶体,当去掉以A为中心的具有相同局域环境外围6个介质柱中的一个,其形成归一化频率为 f_2 的缺陷模,当去掉其中的两个,则柱子之间互相影响,形成模式分裂,柱子之间距离越近,影响越大, f_2 分裂产生的模式之间的间距越大。

为了进一步研究其缺陷模式的特性,利用FDTD计算了各个缺陷模式的电场分布,结果如图4所示。其中,电场分布图4(a)~(j)分别各自对应图3中峰值 $f_1 \sim f_{10}$ 。

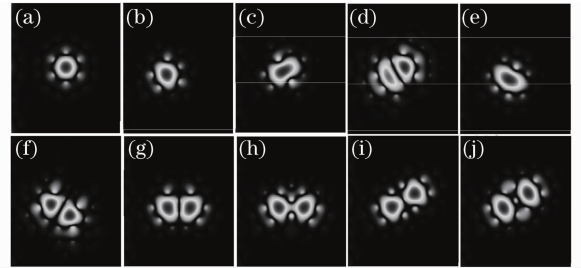


图4 缺陷模式电场分布

Fig. 4 Electric-field distributions of defect modes

从图4可知,透射谱中的每一个透射峰都代表一个缺陷模式,各个缺陷模式所对应的电场分布各不相同。去掉介质柱A和B形成的电场分布图4(a)和(b)在形状和被局域位置上都不同,去掉A-B形成的模式图4(c)和(d)虽然被局域在同一位置且形状上相似,但局域电场局部细节分布不同;图4(e)和(f), (g)和(h), (i)和(j)存在着与图4(c)和(d)同样的相似与不同。

由此可见,在局部准周期光子晶体中,可以通过改变缺陷的位置来调节缺陷模式的特性,而具有比周期光子晶体更为灵活多样的调节方式。另外,通过将局部准周期光子晶体不同点缺陷进行组合,可以获得灵活多样的缺陷模式,实现单一器件中的多缺陷模式。如,将去掉介质柱B以及B-C形成的两种

缺陷进行如图 5 插图所示组合,则如图 5 所示的透射谱线在归一化频率 0.2~0.5 范围内,从左至右依次出现 a,b,c 三个透射峰。相应归一化频率分别为 0.3445,0.3774 和 0.4113,透射率分别为 2.937×10^{-4} , 3.563×10^{-2} 和 1.929×10^{-2} 。该组合结构的缺陷模式频率与由单纯去掉 A-B 得到的 f_3, f_4 [图 3(c)]以及 B 所得到的 f_2 [图 3(b)]对应的缺陷模式归一化频率 0.3448,0.4089 以及 0.3777 相比,变化不大,表明两种腔组合后相互之间影响不大。由于准周期光子晶体具有丰富的缺陷模式和灵活的调节特性,其丰富的单一点缺陷之间可以进行各种不同组合,由此获得灵活多样的缺陷模式,方便地实现单一器件中的多缺陷模式。

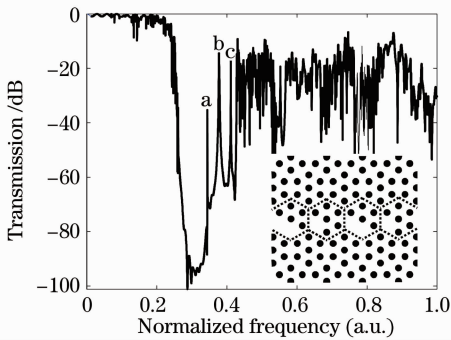


图 5 局部准周期光子晶体点缺陷组合结构的透射谱(插图:计算中采用的点缺陷组合结构样品)

Fig. 5 Transmission spectrum of a portion of point-defect structure constructed with PQ (Inset: sample of structure constructed with different point-defect cavities)

3 结 论

本文利用 FDTD 方法计算了准周期光子晶体局部结构在不同介质柱半径下的透射谱线,并对 $R=0.20a$ 的局部准周期光子晶体所构成的 6 种缺陷腔的透射谱线及电场分布做了计算分析。结果表明,局部准周期光子晶体相较于周期光子晶体而言,不仅可以像周期光子晶体一样通过改变缺陷尺寸和介质来调节缺陷结构,还可以通过改变缺陷的位置来调节缺陷结构,由此具有更为丰富的缺陷模式及更灵活的调节方式。另外,缺陷模频率与所去除介质柱之间的相互影响强弱具有关联性,如去除以 A 为中心的外围 6 个介质柱中的任意两个,则去除的两个介质柱靠得越近,相互影响的强度越大,缺陷模式归一化频率以 f_2 为中心向两端偏移得越远。而

其进一步灵活多样的缺陷模式还可以通过不同点缺陷腔的组合获得。这使得局部准周期光子晶体在构造与缺陷有密切关系的光子晶体功能器件如滤波器、波分复用器、耦合共振波导以及多通道慢光器件方面比一般周期光子晶体更具有优势。

参 考 文 献

- 1 Chan Y. S., Chan C. T., Liu Z. Y.. Photonic band gaps in two dimensional photonic quasicrystals[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **80**(5): 956~959
- 2 Cheng Samuel S. M., Li Lieming, Chan C. T *et al.*. Defect and transmission properties of two-dimensional quasiperiodic photonic band-gap systems[J]. *Phys. Rev. B*, 1999, **59**(6): 4091~4099
- 3 Ren Kun, Ren Xiaobin. Focus achieved by a slab lens of quasiperiodic photonic crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2317~2319
- 任 坤,任晓斌. 准周期光子晶体平板透镜的光会聚 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2317~2319
- 4 Yang Yi, Wang Guoping. Two-dimensional photonic crystals constructed with a portion of photonic quasicrystals[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(10): 5991~5996
- 5 Altug Hatic, Vuckovic Jelena. Photonic crystal nanocavity array laser[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(22): 8819~8828
- 6 Locatelli Andrea, Conforti Matteo, Modotto Daniele *et al.*. Discrete negative refraction in photonic crystal waveguide arrays [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(9): 1343~1345
- 7 Yariv Amnon, Xu Yong, Lee Reginald K. *et al.*. Coupled-resonator optical waveguide: a proposal and analysis[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(11): 711~713
- 8 Shen Yun, Wang Guoping. Gain-assisted time delay of plasmons in coupled metal ring resonator waveguides[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(15): 12807~12812
- 9 David Sylvain, Chelnokov A., Lourtioz J. M.. Isotropic photonic structure: Archimedean-like tilings and quasi-crystals [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2001, **37**(11): 1427~1434
- 10 Mikhael Jules, Roth Johannes, Helden Laurent *et al.*. Archimedean-like tiling on decagonal quasicrystalline surfaces[J]. *Nature*, 2008, **454**: 501~504
- 11 Yang Yi, Li Qiuzhe, Wang Guoping. Fabrication of periodic complex photonic crystals constructed with a portion of photonic quasicrystals by interference lithography[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(6): 061112
- 12 Pan Jun, Huo Yijie, Sandhu Sunil *et al.*. Tuning the coherent interaction in an on-chip photonic-crystal waveguide-resonator system[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **97**(10): 101102
- 13 Olivier S., Smith C., Rattier M. *et al.*. Miniband transmission in a photonic crystal coupled-resonator optical waveguide[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(13): 1019~1021
- 14 Bayindir Mehmet, Temelkuran B., Ozbay E.. Photonic-crystal-based beam splitters[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(24): 3902~3904
- 15 Kim Teunteun, Lee Sungoo, Kim Seonghan *et al.*. Ring-type fabry-perot filter based on the self-collimation effect in a 2D photonic crystal [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(16): 17106~17113
- 16 Sharkawy Ahmed, Shi Shouyuan, Prather Dennis W.. Multichannel wavelength division multiplexing with photonic crystals[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(14): 2247~2252