

十重准晶光子晶体缺陷模性质研究

武毓龙 孙晓红 刘 薇

(郑州大学信息工程学院河南省激光与光电信息技术重点实验室, 河南 郑州 450052)

摘要 研究了十重准晶光子晶体(QPC)缺陷模的性质,观察引入不同缺陷时十重准晶对光路的影响。基于介质柱在空气背景中的十重准晶光子晶体结构,用时域有限差分法(FDTD)计算其透射谱,通过改变晶体结构,引入点缺陷和线缺陷,研究缺陷模的特性,观察光路变化情况,从而设计出特性优良的微腔和波导结构。在TE偏振模式下,改变介质柱的形状、大小和缺失等,观察缺陷准晶透射谱特性的变化。计算点缺陷微腔品质因子(Q值)并优化微腔结构,发现当去掉中心点介质柱时十重准晶有最大的Q值。设计不同缺陷的波导结构,观察光场的传播情况,发现不同的波导结构可以控制不同的光路和选择不同的入射光频率。

关键词 物理光学;十重准晶光子晶体;缺陷模;品质因子;有限时域差分法

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.062601

Investigation on Defect-Mode Property of Ten-Fold Photonic Quasicrystal

Wu Yulong Sun Xiaohong Liu Wei

(Henan Key Laboratory of Laser and Opto-Electric Information Technology, School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450052, China)

Abstract The defect-mode property of ten-fold photonic quasicrystal (PQC) is investigated, and the changes of light path when introducing different defects are observed. The transmission spectra of ten-fold PQC are calculated by using finite-difference time-domain (FDTD) method. By changing the crystal structure and introducing the point and line defects, the defect-mode characteristics are investigated, leading to the design of good micro-cavity and waveguide structures. In TE mode, the transmission spectra with defect modes are observed and quality (Q) factors are calculated to optimize the micro-cavity structure. It has the biggest Q factor when the central dielectric cylinder is removed. Furthermore, we design different waveguide structures and explore the field distribution. Different waveguide structure can be used to control different light path and choose different incident light frequency.

Key words physical optics; ten-fold photonic quasicrystal; defect mode; quality factor; finite-difference time-domain method

OCIS codes 260.1180; 350.4238; 220.4610

1 引言

自从 Yablonovitch^[1] 和 John^[2] 首先提出光子晶体的概念起,人们就开始对其进行大量的研究,观察其性质,通过运用光子带隙以及光子局域性控制介质中光的传播,从而制造出了大量优秀的光电子器件,得到了广泛的应用。但是在光子晶体结构中引入缺陷更能突出光子晶体的优良性质。例如慢光性较好的光子晶体就是通过在光子晶体单线缺陷波导两侧引入不同的耦合腔设计而成的^[3,4]。还有通过在二维硅基平板光子晶体中引入缺陷模实现各种集成光学器件、设计性能较好的滤波器等^[5,6]。未来的全光信息技术也将通过在光子晶体中引入缺陷,使其实现零色散慢光性而实现,将对未来的科技发展起到至关重要的作用^[7]。通过在光子晶体中引入缺陷,光子带隙中出现缺陷模,与缺陷模频率一致的光子将被局域在有缺陷的位置,使其可以几乎无衰减地通过介质,而其他频率的光子能量会迅速衰减,禁止通过。这样就可以进一步精密地控

收稿日期: 2013-01-24; 收到修改稿日期: 2013-03-20; 网络出版日期: 2013-05-14

作者简介: 武毓龙(1988—),男,硕士研究生,主要从事准晶光子晶体方面的研究。E-mail: wulong888111@126.com

导师简介: 孙晓红(1971—),女,博士,教授,主要从事准晶光子晶体方面的研究。

E-mail: 2368732474@qq.com(通信联系人)

制不同频率光子的传播,把入射的白光分离开,并且可以获得确定频率的光。不仅光子晶体具有这样优良的性质,准晶光子晶体(PQC)同样拥有这样的性质。众所周知,准晶光子晶体的特殊结构使其具有完全光子带隙的折射率阈值低^[8,9]、光子带隙与方向无关、缺陷模更为丰富等优良性质,这使其成为光子带隙材料、负折射材料等的优秀候选对象,具有更广阔的应用前景。本文主要通过改变十重准晶光子晶体介质柱的形状、大小、缺失等,观察缺陷准晶透射谱特性的变化,并计算微腔品质因子 Q 优化微腔结构。设计了不同缺陷的波导结构,观察光场的传播情况。

2 十重准晶光子晶体的结构模型

准晶是指准周期结构的光子晶体,只具有旋转对称性和长程指向性,不具备平移周期性^[10,11]。因此准晶光子晶体也就是节点材料呈准周期结构排列的光子带隙材料。

本文所构建的十重准晶介质柱结构模型是根据 Penrose 拼图的方法完成的^[12~15],用两种边长相等但内角不同的菱形(一个内角为 36° 和 144° ,另一个内角为 72° 和 108°)进行拼接,然后在拼接而成的菱形的顶角位置放上介质柱,背景材料为空气,介质柱的折射率 $n=3$,晶格常数 $a=1 \mu\text{m}$,介质柱半径 $r=0.24a$ 和晶格常数 a 也就是菱形的边长。这样就构成十重准晶结构,模型图如图 1 所示,它的第一布里渊区和不可约布里渊区如图 2 所示。

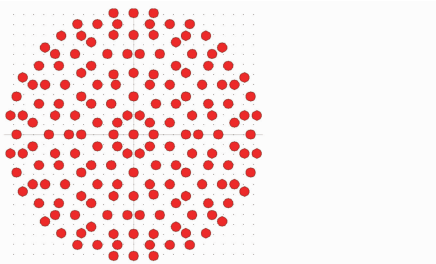


图 1 十重准晶光子晶体结构

Fig. 1 Ten-fold photonic quasicrystal structure

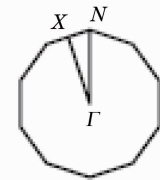


图 2 第一布里渊区和不可约布里渊区

Fig. 2 Schematic of the first Brillouin zone and irreducible Brillouin zone

3 时域有限差分法的特点

1966 年 Yee^[6]首先提出了一种电磁场数值计算的新方法,即为时域有限差分法(FDTD)。这种方法对电磁场 E, H 分量分别在空间和时间上采取交替取样的离散方式,其中每个 E 场分量周围有 4 个 H 场分量环绕,每个 H 场分量周围也有 4 个 E 场分量环绕。这种离散方式可以将麦克斯韦旋度方程转化为差分方程,并在时间轴上逐步求解空间磁场。由于它可以划分很多个网格单元,并且每个网格单元中的电场或磁场都与周围的磁场或电场有关,因此该方法可以处理复杂的形状目标和非均匀介质物体。时域有限差分法是比较精确的计算方法,也是目前常用的理论方法之一。

4 不同方式引入缺陷时十重准晶透射谱计算

4.1 完整结构下十重准晶的透射谱

图 3 为十重准晶结构的透射谱图,从中可以看出,虽然其透射效率不是很高,但有很宽的光子带隙。基本上光子带隙范围从频率 0.355 到 0.443(均指对 $\omega a/2\pi c$ 的归一化频率, ω 为角频率, c 为真空中光速)。只有带隙范围很大才容易产生缺陷。图 4 所示分别是入射光频率为 0.408(波长 $2.45 \mu\text{m}$)和 0.5(波长 $2 \mu\text{m}$)时的光场传播图。频率 0.408 正好处于禁带中,从图 4(a)可以看出光

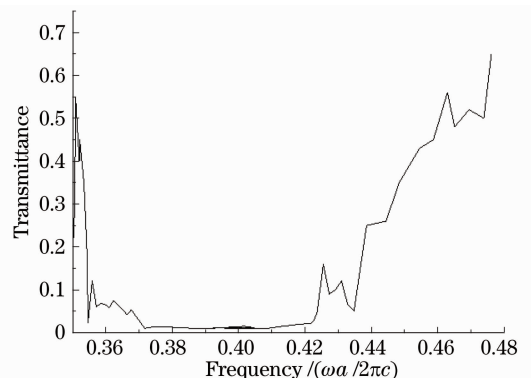


图 3 十重准晶光子晶体的透射谱

Fig. 3 Transmission spectra of the ten-fold photonic quasicrystal structure

全部被光子晶体反射,不能通过晶体传播;而频率 0.5 的光不在禁带范围内,能够顺利通过光子晶体,如图 4 (b)所示。

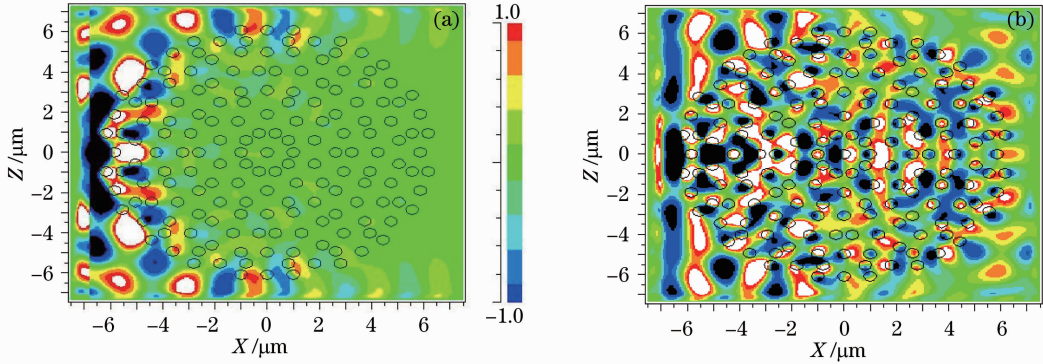


图 4 在 TE 模式下当频率为(a) 0.408 和(b) 0.5 时的光场传播图

Fig. 4 Light-field propagation in TE model when the normalized frequency is (a) 0.408 and (b) 0.5

4.2 微腔结构优化

首先,改变中心介质柱的大小,观察其透射谱的变化情况。当增大其半径至 $0.54a$ 时,透射谱如图 5 所示。减小中心点介质柱的半径至 $0.1a$,其透射谱如图 6 所示。

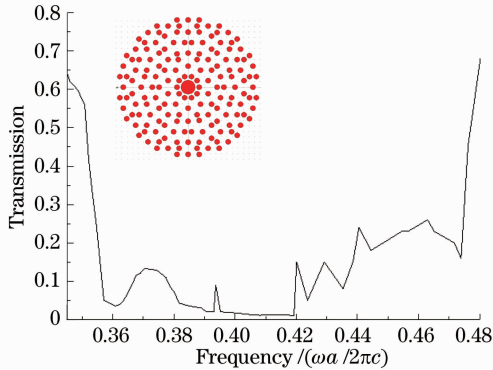


图 5 当中心点介质柱半径增大(插图)时的透射谱

Fig. 5 Transmission spectrum when the radius of the central dielectric cylinder is enlarged (inset)

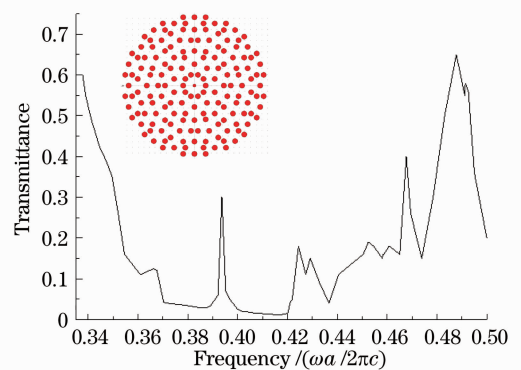


图 6 当中心点介质柱半径减小(插图)时的透射谱

Fig. 6 Transmission spectrum when the radius of the central dielectric cylinder is reduced (inset)

通过图 5 和图 6 可以看出,减小中心点介质柱的半径时,在频率 0.395 处出现了缺陷模,透射率比较低,只有 30%左右,并且 Q 值为 2080。因此可以通过减小中心介质柱的半径来优化微腔的 Q 值,半径不同时其微腔 Q 值也不同。通过计算,可以得出微腔 Q 值随中心介质柱半径变化的关系图,如图 7 所示。

从图 7 中可以看出随着中心介质柱半径的增加,微腔 Q 值呈线性减小的趋势,因此当面积为 0 时,即去掉中心介质柱时其 Q 值最大。下面去除中心点介质柱,观察其透射谱,如图 8 所示。

去除结构中心的点,引入点缺陷后,会形成十重准晶结构微腔。从图 8 中可以看出在原带隙的范围内,对应频率 0.4 处出现了一个非常狭窄的波峰,透射率达到 65%,并且有很高的品质因子,通过计算 Q 值为 5625。引入点缺陷从而获得共振模,使对应频率的光子可以被限制在微腔中传播,而其他频率的光子则不能在其中传播,这种优良的性质被广泛地应用在电子器件中。通过

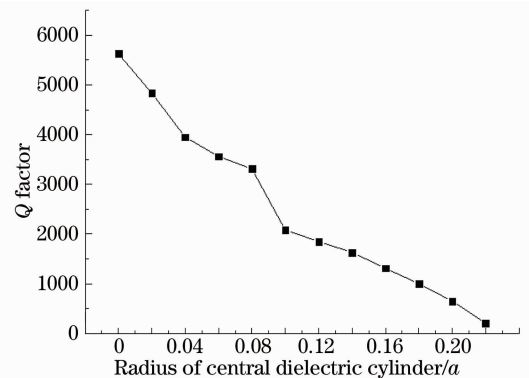


图 7 Q 值随着中心点介质柱半径的变化情况

Fig. 7 Q factor changes with the radius of the central dielectric cylinder

其光场局域效应图可以更好地观察,这种性质如图 9 所示。

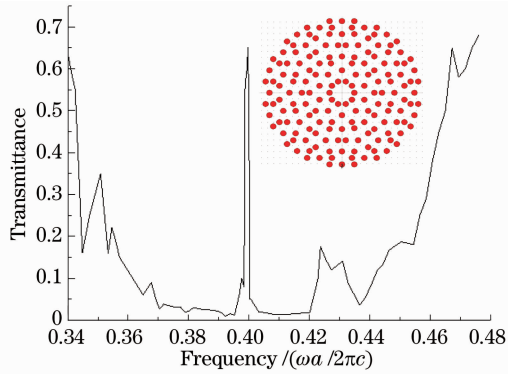


图 8 当中心点介质柱被去掉后(插图)的透射谱
Fig. 8 Transmission spectrum when the central dielectric cylinder is removed (inset)

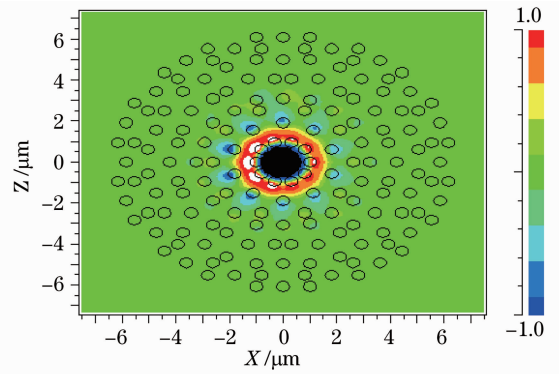


图 9 当中心点介质柱被去掉后的光场局域效应图
Fig. 9 Diagram of light-field local effect when the central dielectric cylinder is removed

4.3 引入线缺陷形成各种不同的波导

考虑引入线缺陷。首先去掉中间 3 排介质柱观察其透射谱变化情况,如图 10 所示。从图 10 中可以看出在原来的带隙中间出现了一个波峰,即为缺陷模。众所周知,带隙范围内禁止入射光通过,但是出现了一个波峰,和此波峰对应频率的入射光可以通过,并被限制在波导中。透射率从原来的 0 增加到 65%,有了很大的提高。由其光场传播图(图 11)可以更直观地看到,入射光波长为 $2.45 \mu\text{m}$,频率 0.408。

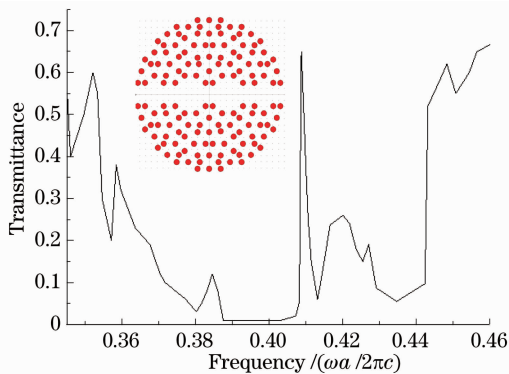


图 10 当中间 3 排介质柱被去掉(插图)后的透射谱
Fig. 10 Transmission spectrum when the 3 central rows of dielectric cylinders are removed (inset)

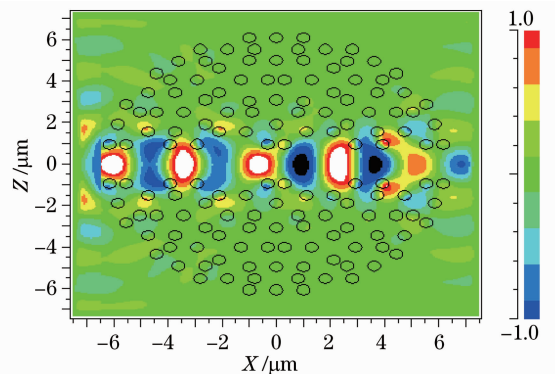


图 11 引入线缺陷后的光场传播图
Fig. 11 Light field propagation when introducing line defect

在完整的十重准晶光子晶体中引入线缺陷后,会形成十重准晶波导结构,在原来很宽的带隙中引入一个波导导模,频率和此导模一致的光子被限制在波导内部,实现低损耗传输,其他频率的光子则不能通过。这种改变准晶结构的模式被广泛用于滤波器等电子器件中。

除了以上几种引入缺陷的方式外,还可以引入 T 型线缺陷,用来设计光分波器。如今广泛应用的是以光子晶体为基础结构的光分波器^[14],下面说明十重准晶光子晶体有同样功能。如图 12 所示,在十重准晶结构中引入 T 型线缺陷,可以使光路发生改变,从光场传播图可以看出光路沿着 T 型波导传输,从中间分开往上下两边传输,并且能量几乎均匀分割。此结构可以应用在光分波器中,从而实现以十重准晶为基础的光分波器。

5 结 论

通过在十重准晶光子晶体中引入各种不同的缺陷可以得出不同的结果,与文献[13]中提到的光子晶体有同样的性质。引入线缺陷可以形成波导,在原来的带隙中出现导模,使和形成的导模有相同频率的光可以被限制在波导中传播,减小传输损耗。引入点缺陷可以形成微腔,在原带隙中出现一个或多个共振模,并且有很高的品质因子,频率位于共振模处的光子被限制在微腔中。这些性质可以被很好地应用于激光器、强光

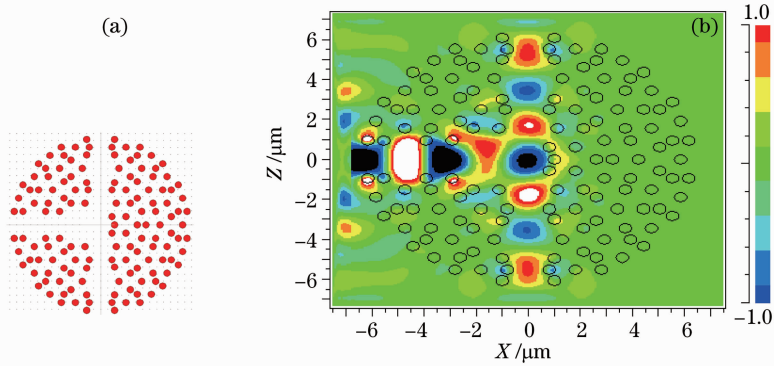


图 12 (a) 引入 T 型缺陷的十重准晶结构示意图;(b) 当引入 T 型缺陷时的光场传播图

Fig. 12 (a) Schematic of the ten-fold PQC with T-shaped defect; (b) light-field propagation when introducing T-shaped defect
 介质耦合器、滤波器、低阈值半导体激光器和光开关等电子器件中,应用前景非常广阔。

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 Qu Lianjie, Yang Yuede, Huang Yongzhen. Slow-light characteristics of photonic crystal waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0113002
 曲连杰, 杨跃德, 黄永箴. 光子晶体波导慢光特性研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0113002
- 4 Zhang Changxin, Xu Xingsheng. High transmission and low group velocity of a photonic crystal coupled-cavity waveguide [J]. *Spectroscopy & Spectral Analysis*, 2012, **32**(5): 1339~1344
 张昌莘, 许兴盛. 高透射率慢光速的光子晶体耦合腔波导的研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, **32**(5): 1339~1344
- 5 Li Zhiyuan, Gan Lin. Two-dimensional silicon photonic crystal slab devices [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900119
 李志远, 甘霖. 二维硅基平板光子晶体器件 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900119
- 6 Zang Kekuan, Sun Xiaohong, Li Dahai *et al.*. Simulation of optical communication apparatus based on the Comsol software [J]. *Electro Optic Technology Application*, 2010, **25**(5): 51~53
 臧克宽, 孙晓红, 李大海等. 基于 Comsol 软件的光子晶体通信器件模拟 [J]. *光电技术应用*, 2010, **25**(5): 51~53
- 7 Zhang Wei, Wang Zhiyong, Wang Wenzhao *et al.*. Investigation on a novel photonic crystal structure with-dispersion free slow light based on line-defect of quadrate air holes [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1006006
 张伟, 王智勇, 王文超等. 基于方形孔线缺陷的新型光子晶体零色散慢光结构研究 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1006006
- 8 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
- 9 Z. Feng, X. Zhang, Y. Q. Wang *et al.*. Negative refraction and imaging using 12-fold symmetry quasicrystals [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(24): 247402
- 10 Jianling Yin, Xuguang Huang, Songhao Liu *et al.*. Photonic bandgap properties of 8-fold symmetric photonic quasicrystals [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **269**(2): 385~388
- 11 P. N. Dyachenko, V. S. Pavelyev, V. A. Soifer. Graded photonic quasicrystals [J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(12): 2178~2180
- 12 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, 刘颂豪等. 结构无序对 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
- 13 P. N. Dyachenko, Y. V. Miklyaev. Band structure calculation of 2D photonic pseudo quasicrystals obtainable by holographic lithography [C]. *SPIE*, 2006, **6182**: 61822I
- 14 Y. S. Chan, C. T. Chan, Z. Y. Liu. Photonic band gaps in two dimensional photonic quasicrystals [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **80**(5): 956~959
- 15 Lü Dongni, Shen Hongjun, Yu Jianli. The study on high Q factor and high transmission efficiency of two-dimensional photonic crystal coupled cavity waveguide [J]. *Chinese J. Luminescence*, 2012, **33**(11): 1241~1246
 吕冬妮, 沈宏君, 余建立. 高品质因子和高传输效率的二维光子晶体耦合腔波导研究 [J]. *发光学报*, 2012, **33**(11): 1241~1246