

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461. 2013.02.013

十重准晶光子晶体结构带隙特性的研究

高净节, 孙晓红

(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: 利用平面波展开法对十重准周期光子晶体 (QPC) 的带隙特性进行了研究。讨论了十重 QPC 的第一带隙宽度随介电常数对比度、介质柱填充因子的变化规律, 发现带隙宽度和介电常数存在线性关系, 并且存在最佳的填充因子。通过比较 TE 和 TM 模式的带隙, 发现 TM 偏振模式下的带隙更宽。并比较了十重 QPC 与八重 QPC 的带隙特性, 发现十重准晶光子晶体更容易产生带隙。

关键词: 光子晶体; 十重准晶; 平面波展开法; 带隙特性

中图分类号: O431.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-5461(2013)02-0207-06

Investigation of band gap characteristics of the ten-fold photonic quasicrystal

GAO Jing-jie, SUN Xiao-hong

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

Abstract: The photonic band-gap characteristics of ten-fold quasi-periodic photonic crystal (QPC) are explored by using plane wave expansion method. The variation of the first band-gap is discussed with the dielectric constant and filling factor. It is found that there exists a linear relationship between the band-gap width and dielectric constant and there is an optimal filling factor. By comparing the band-gap of TE and TM mode, it is found that TM mode has a wider band. Furthermore, a comparison between ten-fold and eight-fold QPC proves that it is easier to produce band-gap for the ten-fold QPC.

Key words: photonic crystals; ten-fold photonic quasicrystal; plane wave expansion method; band gap characteristics

1 引 言

自 1987 年 Yablonovitch^[1] 和 John^[2] 各自独立提出光子晶体的概念以来, 人们不管是在理论上还是在应用上对光子晶体的研究都取得了很大进展, 而对光子晶体的应用都是建立在光子晶体带隙特性等一系列性质基础上的。目前大量的理论和实验都证明了, 光子带隙材料不仅局限于周期性排列的晶体结构中, 也同样在准晶结构存在^[3,4,7,10,11], 甚至在带隙性能上准晶还优于光子晶体^[3,12], 具有更广阔的前景。准晶

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11104251)、河南省高校青年教师资助计划基金项目 (2009GGJS-012)

作者简介: 高净节 (1985 -), 研究生, 主要从事十重准晶方面研究。 **E-mail:** gaojingjie2000@163.com

导师简介: 孙晓红 (1971 -), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光子晶体超能材料、光传感、电转换的聚合物液晶等方面的研究工作。 **E-mail:** iexhsun@zzu.edu.cn

收稿日期: 2012-03-28; **修改日期:** 2012-06-11

光子晶体 (PQCs) 也就是由介电材料呈准晶结构排列所形成的光子带隙材料, 二维的 PQCs 主要有五重、七重、八重、十重、十二重等结构 [8,12], 目前人们对八重和十二重准晶光子晶体已多有研究 [4,10,11], 但对十重的准周期光子晶体鲜有报道。而十重准周期光子晶体因本身具有高对称性, 和其他的准晶结构相比具有更加光滑的透射谱, 即带隙是光滑的 [8], 因此本文将主要讨论十重准晶光子晶体的不同参数对带隙的影响, 并与八重的准晶光子晶体带隙特性进行比较。

2 十重准晶结构模型

所谓准晶就是准周期结构的晶体 [9], 是具有旋转对称性和长程指向性, 但没有平移周期性的晶体。大量研究表明 [5,6], 大多数的准晶光子晶体, 如八重, 十重, 十二重等都有很宽的带隙 [4,7,10,11], 研究准晶光子晶体的带隙特性也就显得尤为重要。

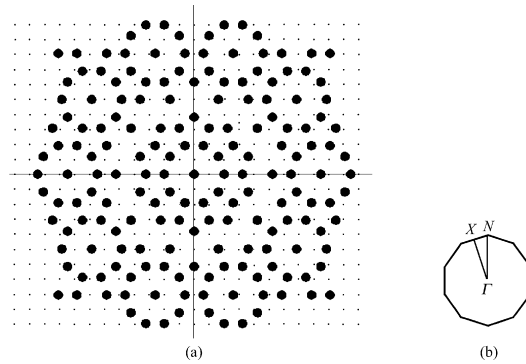


Fig.1 (a) Ten-fold QPC structure, (b) The irreducible Brillouin zone

本文所构建的十重准晶结构模型如图 1(a) 所示。它先由边长相等的两种不同结构的菱形 (内角分别为 36° 和 144° 及 72° 和 108°) 在空间按照一定的规律堆砌, 然后在拼砌图案的菱形顶角上放置介质柱, 这样即构成二维的十重介质柱准晶结构 [12], 然后对具有如上结构的材料分析其光子带隙特性。

3 模拟结果与讨论

3.1 平面展开法 (PWM)

本文采用平面波展开法对十重准晶带隙特性进行研究 [8], 平面波展开法是一种采用矢量分析带隙的方法, 图 1(b) 为十重光子晶体的不可约布里渊区。根据 Maxwell 方程推出表征光子晶体的本征方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\omega^2}{c^2} H = 0, \quad (1)$$

为了解决这个等式, 我们对 $\frac{1}{\varepsilon(\rho)}$ 和 $H(\rho, \omega)$ 做傅里叶变化, 其解析表达式 [9] 为

$$\frac{1}{\varepsilon(\rho)} = \sum_{g_i} \tilde{\varepsilon}(g_i) \exp(g_i \rho), \quad (2)$$

$$H(\rho, \omega) = \sum_{g_i} A(\mathbf{k}, g_i) \exp((\mathbf{k} + g_i) \rho), \quad (3)$$

g_i 是晶体的倒晶格向量, \mathbf{k} 是在 $x-y$ 平面的波矢, 磁场 H 是 Bloch 波, \mathbf{k} 总是被选择在倒晶格的第一布里渊区。当我们把这些解析式代入公式 (1), 得出

$$\sum_{G'_i} (\mathbf{k} + \mathbf{g}_i)(\mathbf{k} + \mathbf{g}'_i)\tilde{\varepsilon}(\mathbf{g}_i - \mathbf{g}'_i)A(\mathbf{k}, \mathbf{g}'_i) = \frac{w^2}{c^2}A(\mathbf{k}, \mathbf{g}_i), \quad (4)$$

公式 (4) 可以得出一个对称矩阵形式的标准特征值，它可以解决数值计算得到的带隙结构 $\omega(\mathbf{k})$ 和对应任何相应模场中的 \mathbf{k} 值。

假设样品包含图 1 所示的样品范围，以空气介质为背景，半径为 r 的圆形介质柱构成的十重准晶光子晶体为研究对象，入射波为 TM 波，填充因子 f 为 0.2，介电常数 ε 为 1.9，带隙宽度 0.5694~0.7293，中心频率为 0.6398。计算的带隙特性如图 2。

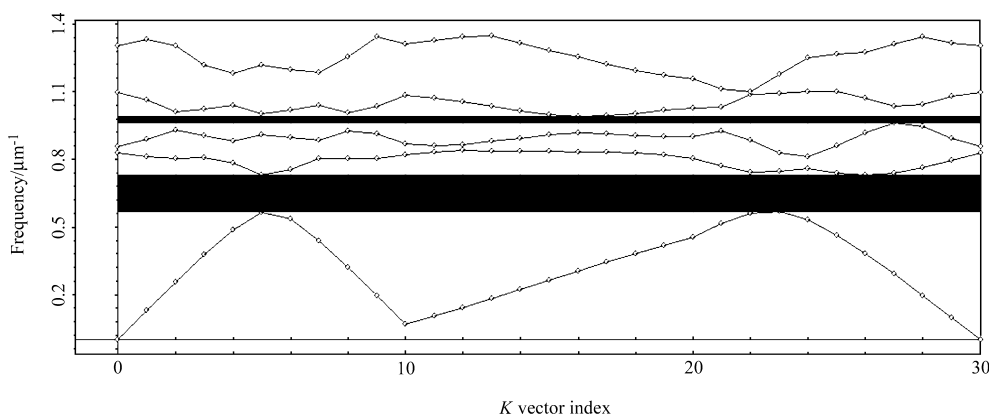


Fig.2 The band gap figure of ten-fold QPC

以下将考察介电常数 ε ，介质柱填充比的变化对十重准晶光子晶体带隙的影响。

3.2 带隙随介电常数变化的规律

如图 3 所示，横坐标是介电常数 ε ，纵坐标是第一带隙频率宽度和中心频率的比值。在填充比相同的情况下，第一带隙相对较宽，而当介电常数大于 7 时，第一带隙的宽度开始减少。我们可以看到十重准晶光子晶体的光子带隙随着介电常数存在线性关系，这种现象在光子晶体中同样存在。

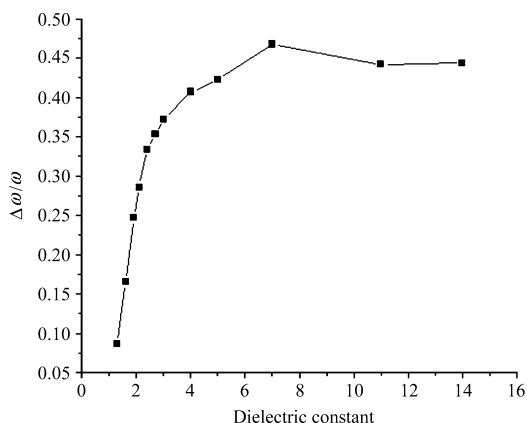


Fig.3 The variation of the first band-gap with the dielectric constant

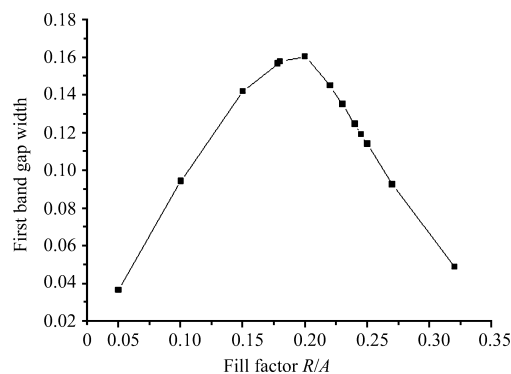


Fig.4 The band-gap versus the filling factors

3.3 带隙随介质柱填充比变化的规律

介质柱填充因子 (填充比) 是将十重准晶结构的介电常数设置为一个固定值 f ，入射波长为 λ ，改变这种结构的介质柱填充比，进行不断的优化，得到表 1 的数据，第一行表示的是填充比的变化，第 2，3，4 行分别表示的是第一，二，三带隙的宽度。对数值模拟结果进行分析，当填充比为 0.18 的时候出现第二

个带隙, 当填充比为 0.22 时出现第三个带隙, 而当填充比为 0.23 时三个带隙都为最大值, 当填充比为 0.24 时减少为两个带隙, 填充比为 0.245 时, 减少为一个带隙, 随着填充比的增加, 带隙宽度变窄, 由此可以看出对于某一个介电常数, 存在最佳填充因子^[3]。而我们所模拟的介电常数的最佳填充因子为 0.23, 图 4 为第一带隙随填充因子改变的变化曲线。

Table 1 The band-gap versus the fill factors

填充比	0.05	0.1	0.15	0.178	0.18	0.2	0.22	0.23	0.24	0.245	0.25	0.27	0.32
第一带隙宽度	0.0365	0.09427	0.142	0.1567	0.1578	0.16	0.145	0.1351	0.1246	0.1191	0.114	0.0925	0.0488
第二带隙宽度					0.1113	0.027	0.0247	0.0233	0.0122				
第三带隙宽度							0.0122	0.0108					

因此我们可以知道在其他外界条件不变的情况下, 随着填充比的改变, 对于某一介电常数的十重准晶光子晶体, 带隙宽度会随着填充比的改变而改变, 存在最佳填充因子。

3.4 两种偏振模式下十重准晶的带隙特性

通过比较图 5 各图, 我们看到在十重准晶光子晶体结构中, 填充因子为 0.2, 介电常数为 1.9, 入射波分别为 TM 模、TE 模以及两种偏振状态下出现完全带隙的情况, 我们看到 TM 偏振模式下的带隙比 TE 偏振模式的带隙更宽。

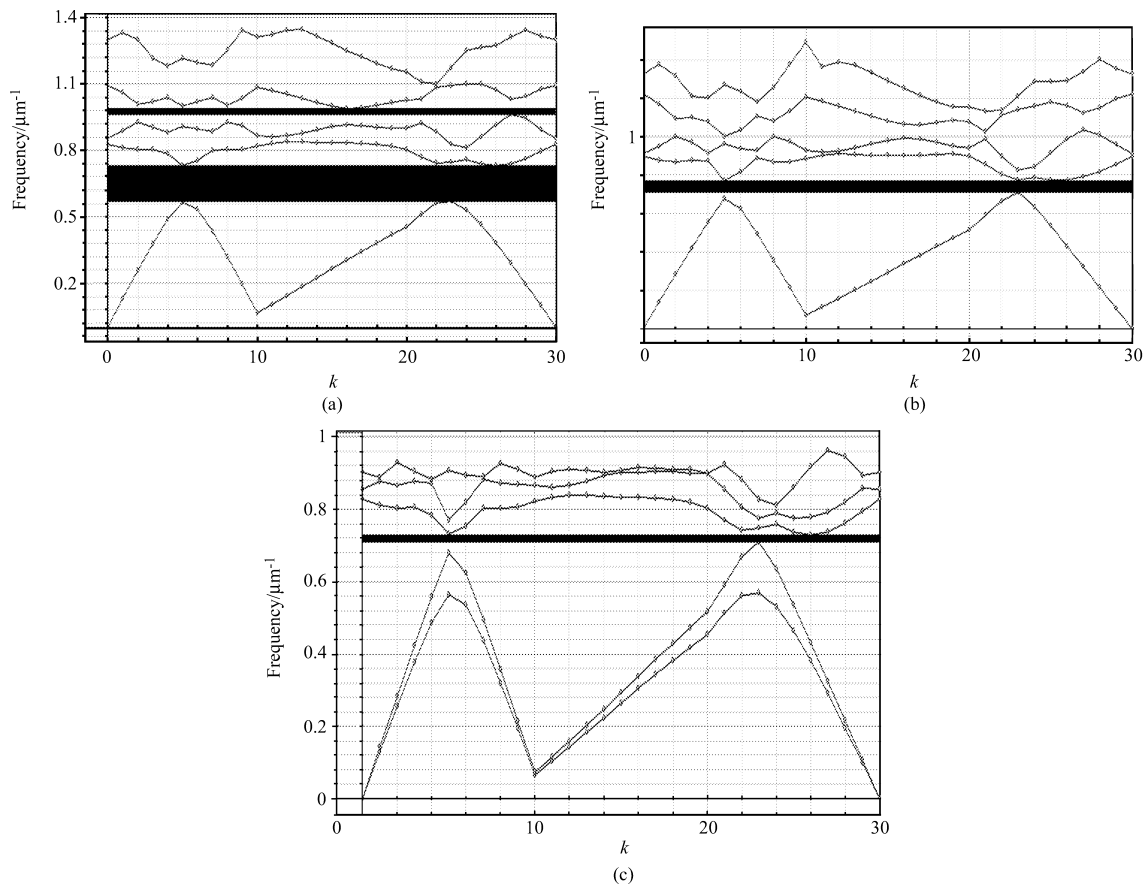


Fig.5 The band-gap characteristics of ten-fold QPC (a) TM mode, (b) TE mode, (c) complete band gap of two polarization mode

3.5 八重准晶与十重准晶的比较

如图 6 所示, 在 4 层介质柱、介电常数 2.4、填充比为 0.2 的结构中, 八重准晶 TM 模的带宽为 0.069883, 中心频率为 0.45153, 而对于十重准晶的带宽则为 0.14909, 中心频率为 0.6707。当介电常数为 1.8 的时候, 八重准晶 TM 模已无带隙, 而十重准晶的带隙为 0.16037, 中心频率为 0.6495, 该结果如图 7(a) 和 (b) 所示。

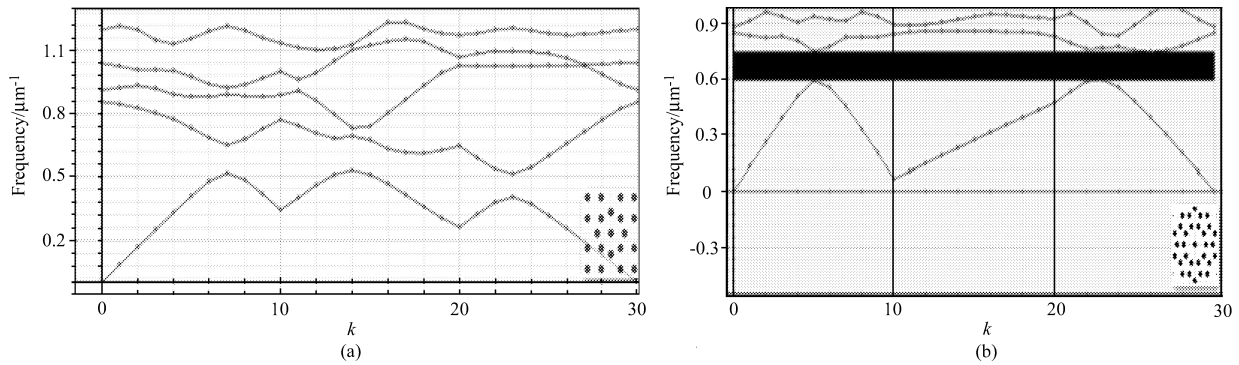


Fig.6 The band-gap diagram of (a) eight-fold QPC, (b) ten-fold QPC for the four-layer material system with $\varepsilon=2.4$ and $f=0.2$

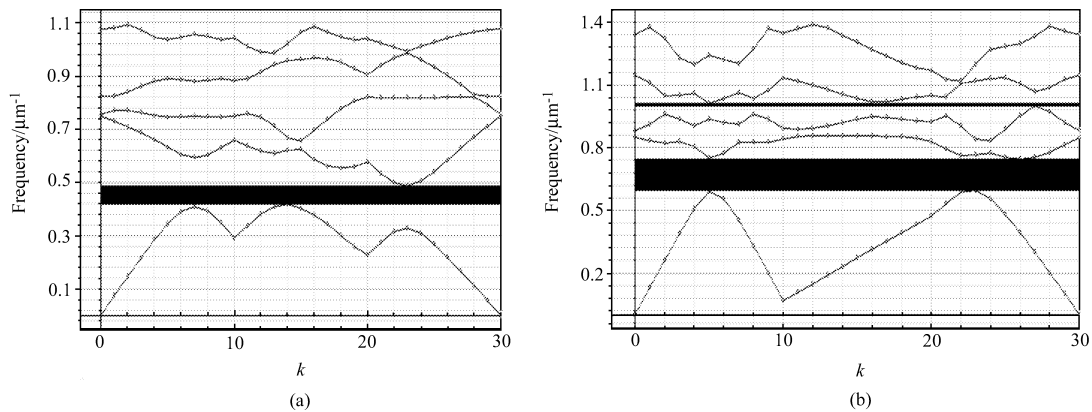


Fig.7 The band-gap diagram of (a) eight-fold QPC, (b) ten-fold QPC for the four-layer material system with $\varepsilon=1.8$ and $f=0.2$

对某种给定准晶结构的光子晶体, 产生光子带隙的介电常数存在阈值^[3]。对于八重准晶的光子晶体, 当介电常数低于 1.8 时, 在本模拟条件 TM 模式下已经没有带隙了, 而对于十重准晶光子晶体在介电常数很小的时候就有了带隙^[5~7]。我们知道, 光子在光子晶体中穿过的时候, 六角形结构的光子晶体比方形结构的光子晶体更容易得到带隙, 是因为六角形比方形具有更好的周期性和旋转对称性。同理, 十重准晶光子晶体比八重准晶结构更容易出现带隙的原因是因为十重准晶结构有更好的对称性。

4 结 论

从以上的数值模拟可以看出, 十重准晶光子晶体的光子带隙随着介电常数存在线性关系, 我们可以知道在其他外界条件不变的情况下, 随着填充比的改变, 对于某一介电常数的十重准晶光子晶体, 带隙宽度会随着填充比的改变而改变, 存在最佳填充比。对于相同结构的十重准晶和八重准晶, 十重准晶比八重准晶的带隙更宽, 且光子带隙的阈值更低, 更容易产生带隙。

参考文献 :

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [2] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [3] Yin J L, Huang X G. Properties and applications of photonic quasicrystals [J]. *Laser and Opto-electronics Progress*, 2010, 47: 011601.
- [4] Yin J L, Huang X G. Effect of structure disorder on band gap of eight-fold photonic quasicrystals [J]. *Chinese Journal of Lasers* (中国激光), 2007, 34(8): 1077-1080(in Chinese).
- [5] Zoorob M E, Chariton M D B, Parker G J, *et al.* Complete and absolute photonic band gaps in highly symmetric photonic quasicrystals embedded in low refractive index materials [J]. *Mater. Sci. Eng.*, 2000, B74(1-3): 168-174.
- [6] Romero-Vivas J, Chigrin D, Lavrinenko A. *et al.* Resonant add-drop filter based on a photonic quasi-crystal [J]. *Opt. Expr.*, 2005, 13(3): 826-835.
- [7] Dyachenko P N, Miklyaev Y V. Band structure calculation of 2D photonic pseudo quasicrystals obtainable by holographic lithography [C]. *SPIE*, 2006, 6182: 61822I.
- [8] Kaliteevski M A, Brand S. Two-dimensional Penrose-tiled photonic quasicrystals: from diffraction pattern to band structure [J]. *Nanotechnology*, 2000, 11: 274-280.
- [9] Feng Z, Zhang X, Wang Y Q, *et al.* Negative refraction and imaging using 12-fold symmetry quasicrystals [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 94(24): 247402.
- [10] Feng Z, Zhang X, *et al.* Negative refraction and imaging using 12-fold-symmetry quasicrystal structures [J]. *Phys.*, 2006, 35(1): 10-13.
- [11] Sun X H, Tao X M. Electrically switchable polymer dispersed liquid crystal photonic crystals [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (量子电子学报), 2010, 27(4): 424-429 (in Chinese).
- [12] Liu G B, *et al.* Fabricating two dimensional photonic crystal by prism holographic interference method [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (量子电子学报), 2012, 29(2): 215-223 (in Chinese).