

doi:10.3788/gzxb20154406.0623001

# 铜币形空气孔二维三角晶格光子晶体的完全光子带隙

李传起, 范庆斌, 杨梦婕, 张秀容

(广西师范大学 电子工程学院, 广西 桂林 541004)

**摘 要:**采用平面波展开法,研究铜币形空气孔二维三角晶格光子晶体的完全带隙随结构参量变化的规律.研究表明:铜币形散射子结合了空气孔型和介质柱型两种光子晶体的优点,有利于获得更宽的完全带隙.该光子晶体大完全带隙对由制备工艺上引起的材料掺杂和空气孔半径的偏离具有一定的稳定性.为了获得完全带隙,组成光子晶体的两种介质要有足够大的介电常数对比度,铜币形空气孔二维三角晶格光子晶体在  $\epsilon=11.8$  时出现完全带隙.对参量分组优化发现,在  $\epsilon=22.75, R=0.483 \mu\text{m}, d=0.195 \mu\text{m}, \varphi=90^\circ, G=1.3$  时,完全带隙的宽度  $\Delta\omega a / 2\pi c$  获得最大值 0.136 1,带隙率为 33.55%

**关键词:**光子晶体;完全带隙;平面波展开法;带隙率;散射子

中图分类号:O439

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)06-0623001-6

## Complete Photonic Band Gaps of Two-Dimensional Triangular Lattice Photonic Crystals Based on Copper-Coin-Shaped Air Hole

LI Chuan-qi, FAN Qing-bin, YANG Meng-jie, ZHANG Xiu-rong

(Department of Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract:** Plane wave expansion method has systematically studied the complete Photonic Band Gap (PBG) of copper-coin-shaped triangular lattice Photonic Crystal (PC). The results demonstrate that the copper-coin-shaped scatterers is a combination of the air hole type and dielectric rod type of PCs, which in favor of obtain a wider complete PBG width. The width of the complete PBG has certain stability to deviation of doped material and the air hole radius caused by the preparation process. The two types of dielectric of which the PC are composed must have sufficiently large dielectric constant ratio to get the complete bandgap. The copper-coin-shaped triangular lattice PC begins to appear complete bandgap when the  $\epsilon=11.8$ . By grouping optimization of parameters, the widest complete PBG of  $\Delta\omega a / 2\pi c$  is 0.136 1 with  $\Delta\omega/\omega_{\text{mid}}$  of 33.55% when  $\epsilon$  is 22.75,  $R$  is 0.483  $\mu\text{m}$ ,  $d$  is 0.195  $\mu\text{m}$ ,  $\varphi$  is  $90^\circ$  and  $G$  is 1.3.

**Key words:** Photonic crystal; Complete photonic band gap; Plane wave expansion method; Gap-midgap ratio; Scatterers

**OCIS Codes:** 160.5298; 230.5298; 160.5293

## 0 引言

光子晶体是一种介电常数呈周期性分布的人工微结构,其最根本的特征就是“光子禁带”(Photonic Band Gap, PBG),即频率落在禁带范围内的电磁波均不能通过光子晶体.光子晶体不同于以往利用全反射原理来引导光传输,而是利用光子禁带和光子局域特性来

控制光子流.近几年,基于光子晶体的新控光机制在光通信器件领域得到了很大的发展,如光子晶体滤波器组成的波分复用器<sup>[1-2]</sup>、光子晶体光纤<sup>[3-4]</sup>、光子晶体功率分配器<sup>[5]</sup>、光子晶体发光二极管<sup>[6]</sup>等,这些应用都是基于光子晶体的带隙特性,光子带隙越宽,器件性能越稳定.因此,理论研究光子晶体的带隙特性,设计具有更宽带隙的光子晶体受到了人们的广泛关注.

**基金项目:**广西高校自然科学基金重点项目(No. 201202ZD010)和桂林市科学研究与技术开发计划课题(No. 20120104-18)资助

**第一作者:**李传起(1964-),男,教授,博士,主要研究方向为光纤通信 OCDMA 网络技术. Email:lcq@gxnu.edu.cn

**通讯作者:**范庆斌(1988-),男,硕士研究生,主要研究方向为光子晶体及其应用. Email:fqb880812@126.com

**收稿日期:**2015-01-05; **录用日期:**2015-03-10

<http://www.photon.ac.cn>

三维光子晶体具有很好的带隙特性,在各个方向上都能控制光子流,但是工艺制造困难.相反,二维光子晶体结构简单、易制备,使得大多数研究者致力于研究二维光子晶体光学器件.

光在二维光子晶体中的传播可以分为两种偏振波:横电波(TE)和横磁波(TM).目前,大多数光子晶体器件采用的是偏振光(TE或TM),如能设计对两种偏振光同时具有光子带隙的光子晶体结构,将为非偏振光器件的设计打下基础.一般情况下,比较容易得到TE偏振波或TM偏振波产生的光子带隙,然而,想要使得两种偏振波同时存在的光子带隙且带隙重合却比较困难.研究表明,当两种介质的介电常数对比度比较高时,降低光子晶体结构的对称性可以获得更宽的完全带隙.降低光子晶体结构对称性的方法有多种形状散射子的混合或复合<sup>[7-9]</sup>,改变散射子结构<sup>[10-11]</sup>、改变晶格结构<sup>[12-20]</sup>、使用各向异性介质材料<sup>[21-23]</sup>等.然而降低散射子对称性经常使得光子晶体结构复杂化<sup>[10]</sup>,不利于工艺制备.为了降低散射子的对称性,同时考虑光子晶体结构需简单易实现,Kurt等<sup>[24]</sup>提出了空气环结构,该结构由圆形空气孔与圆形介质柱复合而成,对正方晶格和三角晶格空气环光子晶体研究发现该复合结构可以得到更宽的完全带隙.随后,Zhang等<sup>[25]</sup>将圆形空气孔与方形柱进行复合,构造了类空气环结构.但仅仅研究了 $\epsilon=16$ 时的带隙特性,获得的最大完全带隙

宽度为 $0.082(\Delta\omega a/2\pi c)$ ,没有系统的研究介质介电常数、空气孔半径 $R$ 、方形柱旋转角 $\varphi$ 与宽度 $d$ 以及长宽的比例系数 $G$ 对完全带隙特性的影响.空气孔内嵌入方形介质柱呈铜币形状,称它为铜币形散射子.

本文采用平面波展开法,研究铜币型散射子结构参量对完全带隙特性的影响.研究表明,铜币形空气孔二维三角晶格光子晶体可以获得更宽的完全带隙,而且,该光子晶体完全带隙宽度对由制备工艺上引起的材料掺杂及空气孔半径的偏离具有一定的稳定性.通过对参量的分组优化,获得了一组完全带隙最大的结构参量.

## 1 模型与算法

通常,圆形空气孔二维三角晶格光子晶体可以得到完全带隙,但是宽度有限,通过在圆柱形空气孔中内嵌方形介质柱的复合方式构造的铜币形空气孔光子晶体,不仅可以获得更宽的完全带隙,而且在几何参量的设计上也具有很大的灵活性.图1为铜币形空气孔三角晶格光子晶体结构示意图.空气孔半径为 $R$ ,空气孔内的方形介质柱宽度为 $d$ ,长度为 $G \times d$ ( $G$ 为长与宽的比例系数),散射子旋转角为 $\varphi$ (设 $\varphi$ 沿顺时针方向为正),空气介电常数为 $\epsilon_0=1$ ,介质介电常数为 $\epsilon$ ,晶格常数为 $a$ (本文中 $a=1\mu\text{m}$ ).

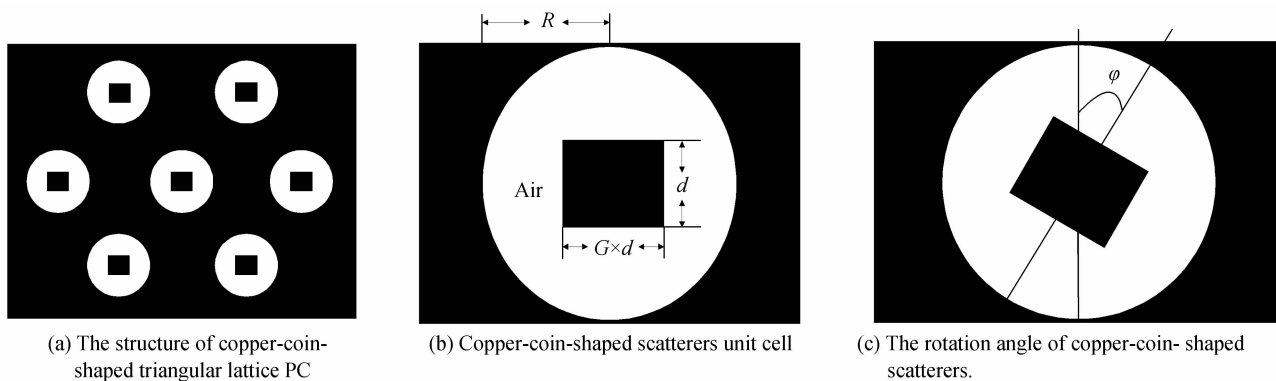


图1 铜币形空气孔三角晶格光子晶体模型

Fig. 1 The model of triangular lattice PC of copper-coin-shaped air hole

铜币形空气孔三角晶格光子晶体的带隙结构受到五个因素的影响:介质介电常数;空气孔归一化半径( $R/a$ );方形介质柱的归一化宽度( $d/a$ );方形介质柱的长与宽的比例系数 $G$ ;散射子旋转角 $\varphi$ .

二维光子晶体的光子带隙可以采用平面波展开法计算.根据麦克斯韦方程组,可得二维光子晶体中电场和磁场满足方程<sup>[26]</sup>

$$\nabla \times (\nabla \times E(r)) = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \epsilon(r) E(r) \quad (1)$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\epsilon(r)} \nabla \times H(r)\right) = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 H(r) \quad (2)$$

式中 $c$ 为真空中的光速, $\omega$ 为电磁波频率.

利用布洛赫(Bloch)定理把相对介电常数和电场或磁场进行平面波展开,结合光子晶体介电常数的周期性分布,可化简为两个独立的本征方程<sup>[27]</sup>

$$\sum_{G'} (k+G)(k+G') \eta_{G-G'} E(k+G') = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 E(k+G) \quad (3)$$

$$\sum_{G'} (k+G)(k+G') \eta_{G-G'} H(k+G') = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 H(k+G) \quad (4)$$

求解式(3)、(4),即可得到二维光子晶体的光子能带结构。

利用平面波展开法,计算铜币形空气孔三角晶格光子晶体带隙结构,通过改变  $\epsilon, R, d, G, \varphi$  来研究结构参量对光子晶体完全带隙的影响。

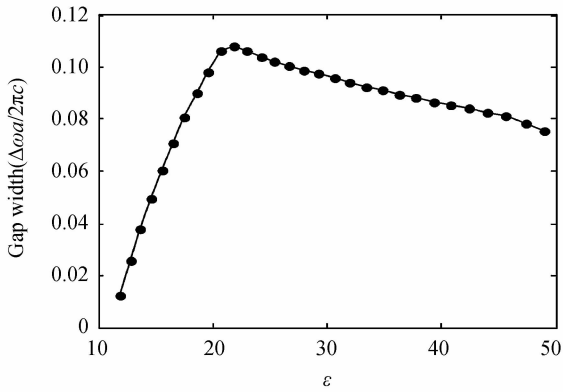
## 2 计算结果与分析

### 2.1 $\epsilon, R, d$ 依次改变对完全带隙的影响

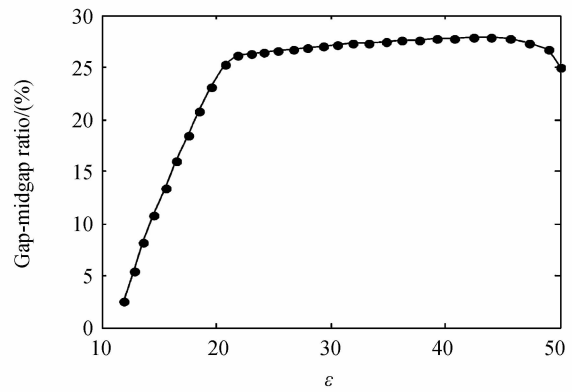
首先,考虑不同介电常数对完全带隙宽度和带隙率(完全带隙宽度与中心频率之比:  $\Delta\omega/\omega_{mid}$ )的影响。取  $R=0.48 \mu\text{m}, d=0.2 \mu\text{m}, G=1, \varphi=0^\circ$ ,介电常数从1开始以1为步长增加至50,采用平面波展开法计算得到铜币形光子晶体完全带隙特性如图2,其中图2(a)为光子晶体完全禁带宽度随介电常数的变化情况,可以看出:当  $\epsilon \leq 11.8$  时,不存在完全禁带,这表明介质与空气的介电常数差不够大,难以形成完全带隙;当

$\epsilon=22.0$  时,完全带隙宽度达到最大值  $0.1079(\Delta\omega a / 2\pi c)$ 。从图(b)看出:当  $11.8 \leq \epsilon \leq 22.0$  时,带隙率随着介电常数的增加而迅速上升;当  $22.0 \leq \epsilon \leq 44.0$  时,带隙率平缓而略有上升,在一个大的介电常数范围内,铜币形光子晶体能保持较高的带隙率,这是因为随着介电常数的增大,光子晶体完全带隙向低频方向移动的幅度稍大于完全带隙宽度减小的幅度。同时,大的介电常数范围仍能保持高的带隙率,不仅使得光子晶体材料掺杂工艺上的偏差具有一定的稳定性,而且可供光子晶体选择的材料种类也比较多。

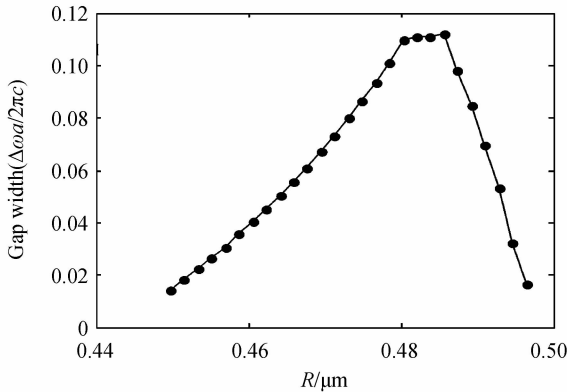
选定  $\epsilon=22, d=0.2 \mu\text{m}, G=1, \varphi=0^\circ$ ,计算光子晶体完全带隙随半径  $R$  的变化情况如图2(c),当  $0.478 \leq R \leq 0.487$  时,完全带隙宽度达到最大值,并且在这个范围内保持平坦,使得铜币形光子晶体对制备工艺引起的半径偏离具有一定的稳定性。选定  $\epsilon=22, R=0.48 \mu\text{m}, G=1, \varphi=0^\circ$ ,计算铜币内的方形柱宽度对完全带隙的影响如图2(d),当  $d=0.23 \mu\text{m}$  时,光子晶体完全带隙宽度达到最大值  $0.118(\Delta\omega a / 2\pi c)$ 。



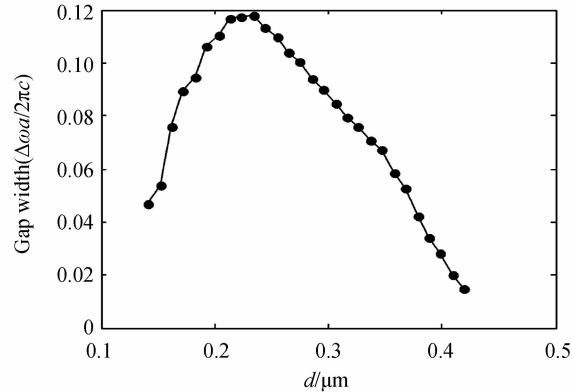
(a) The width of the complete PBG varies as the dielectric constant( $\epsilon$ ) when  $R=0.48\mu\text{m}, d=0.2 \mu\text{m}, G=1, \varphi=0^\circ$



(b) The gap-midgap ratio( $\Delta\omega/\omega_{mid}$ ) of the complete PBG varies as the dielectric constant( $\epsilon$ ) when  $R=0.48 \mu\text{m}, d=0.2 \mu\text{m}, G=1, \varphi=0^\circ$



(c) The width of the complete PBG varies as the radius of the air hole when  $\epsilon=22\mu\text{m}, d=0.2 \mu\text{m}, G=1, \varphi=0^\circ$



(d) The width of the complete PBG varies as the width of square column when  $\epsilon=22 \mu\text{m}, R=0.48 \mu\text{m}, G=1, \varphi=0^\circ$

图2 结构参量对完全带隙的影响

Fig. 2 The effect of structure parameters to complete PBG

## 2.2 几何参量 $R$ 、 $d$ 、 $G$ 、 $\varphi$ 的分组优化

影响铜币形三角晶格光子晶体完全带隙宽度的几何参量有 4 种,将这 4 种参量分成两组,第一组:方形介质柱的比例系数  $G$  和散射子旋转角  $\varphi$ ,通过同时改变  $G$  和  $\varphi$  的值,寻找获得更大完全带隙的参量组合;第二组:空气孔归一化半径( $R/a$ )和方形介质柱的归一化宽度( $d/a$ ),在优化后的  $G$  和  $\varphi$  中,同时改变  $R$  和  $d$  的值,从而得到优化的几何结构.

首先讨论第一组几何参量的优化.由于空气孔内的介质柱横截面为方形,方形长与宽的比例系数为  $G$ ,通过调整  $G$  和  $\varphi$  的大小来降低结构的对称性<sup>[28]</sup>,从而找到比较合适的比例系数和旋转角.由于散射子的旋转对称性, $\varphi$  的取值只需定在  $(0^\circ, 90^\circ)$ ,取  $\epsilon=23$ , $R=0.48 \mu\text{m}$ , $d=0.2 \mu\text{m}$ ,旋转角度  $\varphi$  分别为  $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ$  时,采用平面波展开法计算得到  $\varphi$  和  $G$  对完全带隙的影响如图 3(a)、(b),可以

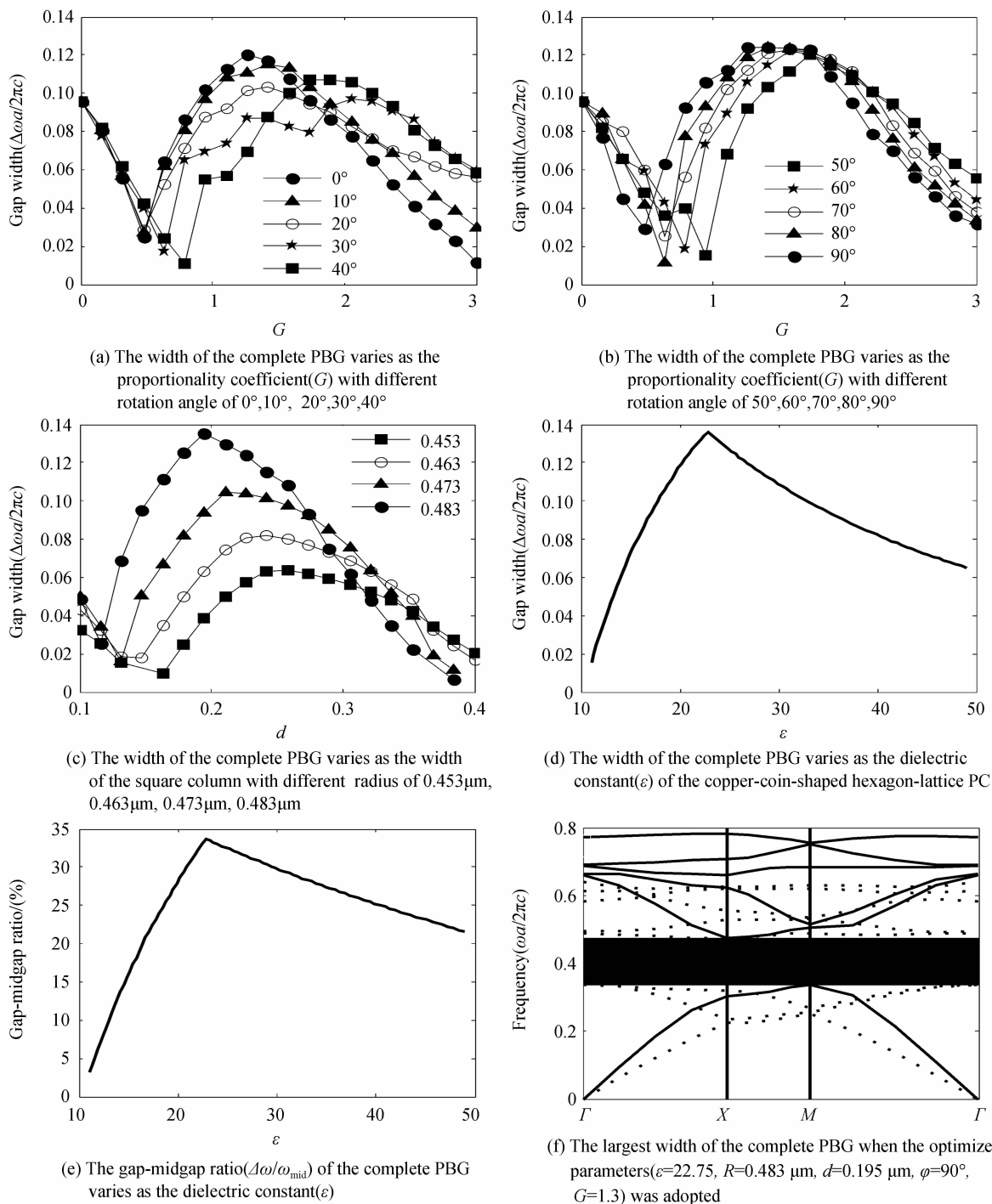


图 3 结构参数的优化和优化后的完全带隙

Fig. 3 The optimization of structure parameters and the optimized complete PBG

看出:当  $G$  为 0 时,光子晶体完全带隙宽度能达到  $0.095(\Delta\omega a / 2\pi c)$ ,这是因为铜币形散射子此时不存在方形介质柱,相当于空气孔型二维三角晶格光子晶体.当  $1 \leq G \leq 1.8$  时,在  $0^\circ \sim 40^\circ$  范围内,随着旋转角的增大,光子晶体完全带隙的宽度递减;在  $50^\circ \sim 90^\circ$  范围内,随着旋转角的增大,光子晶体完全带隙的宽度在递增;当  $\varphi=90^\circ, G=1.3$  时,光子晶体完全带隙宽度获得最大值  $0.1241(\Delta\omega a / 2\pi c)$ ,比空气孔型二维三角晶格光子晶体完全带隙更宽.

在  $\epsilon=23$  时,取第一组几何参量的优化值  $\varphi=90^\circ, G=1.3$ ,同时改变空气孔归一化半径 ( $R/a$ ) 和方形介质柱的归一化宽度 ( $d/a$ ),找到最佳的  $R, d$  组合参量.当铜币形空气孔半径分别为  $0.453 \mu\text{m}, 0.463 \mu\text{m}, 0.473 \mu\text{m}, 0.483 \mu\text{m}$  时,运用平面波展开法计算得到  $R$  和  $d$  对完全带隙的影响如图 3(c),可以看出:随着铜币形空气孔半径的增大,完全带隙宽度大幅度上升,当  $R=0.483 \mu\text{m}, d=0.195 \mu\text{m}$  时,完全带隙宽度达到最大值  $0.1355$ .

取经过优化的几何参量  $R=0.483 \mu\text{m}, d=0.195 \mu\text{m}, \varphi=90^\circ, G=1.3$ ,计算介质介电常数变化对完全带隙的影响如图 3(d)、(e),可以看出:当  $\epsilon=22.75$  时,完全带隙宽度有最大值  $0.1361$ ,其带隙率为  $33.55\%$ .采用平面波展开法计算该最大完全带隙如图 3(f),实线代表横电波(TE)的能带结构,虚线代表横磁波(TM)的能带结构,黑色填充区域即为 TE 和 TM 的交叠区域,交叠范围介于  $0.3375(\Delta\omega a / 2\pi c) \sim 0.4736(\Delta\omega a / 2\pi c)$ ,中心位于  $0.4056(\Delta\omega a / 2\pi c)$ .

综上所述,光子晶体要获得完全带隙必须有足够大的介电常数比,如在  $\epsilon=11.8$  时才开始出现完全带隙,最大完全带隙是在介质介电常数  $\epsilon=22.75$  时获得的.当几何参量取  $R=0.48 \mu\text{m}, d=0.2 \mu\text{m}, G=1, \varphi=0^\circ$  时,工艺上比较容易实现,且光子晶体完全带隙对由制备工艺上引起的材料掺杂及空气孔半径的偏离具有一定的稳定性;当几何参量取  $R=0.483 \mu\text{m}, d=0.195 \mu\text{m}, \varphi=90^\circ, G=1.3$  时,完全带隙的宽度达到最大值  $0.1361(\Delta\omega a / 2\pi c)$ ,带隙率为  $33.55\%$ ,但对结构参量的要求比之前高,增加了工艺的复杂度.本文研究的铜币形空气孔三角晶格光子晶体之所以能获得如此大的完全带隙,究其原因有 2 点:1)以空气为背景的介质柱型光子晶体容易形成 TM 的带隙结构,以介质为背景的空气孔型光子晶体容易形成 TE 的带隙结构<sup>[26]</sup>.铜币形空气孔三角晶格光子晶体综合了这两种光子晶体类型的特点,容易同时形成 TM 和 TE 的带隙结构.2)空气孔与方形介质柱相结合,方形柱几何参量的变化进一步降低了光子晶体结构的对称性,再加介质与空气形成的高介电常数差,共同增强了散射子对光的散射能力,从而有利于完全带隙的形成.由表 1

可以看出:本文研究的铜币形空气孔二维三角晶格光子晶体完全带隙宽度与目前所报道的最大带隙几乎相等,但是带隙率却是它的 2.56 倍,比目前所报道的最高带隙率  $31.87\%$  高出 1.68 个百分点,意味着本文所设计的完全带隙是处于低频段的超大带隙,更适用于光通信器件.由于本文研究的是在  $x-y$  平面内的光子带隙,各向异性介质确在平面内有  $\epsilon_x = \epsilon_y = 23.04$  (材料参量见文献[22-23]),接近于本文最大完全带隙所需要的介电常数值,因此,确介质可以作为该结构的备选材料之一.

表 1 二维光子晶体完全带隙宽度和带隙率的对比  
Table 1 Comparison of the complete PBG width and the gap-midgap ratios for two-dimensional photonic crystals

	$\epsilon/\epsilon_0$	$\Delta\omega a / 2\pi c$	$\Delta\omega/\omega_{\text{mid}}$
Present	22.75	0.136 1	33.55%
[9]	23.04	-	31.87%
[10]	17	0.054 1	-
[11]	12.25	0.087 2	18.2%
[15]	11.4	0.136 4	13.1%
[16]	11.4	0.067	-
[18]	13	0.106 7	24.21%
[19]	11.4	0.115 8	-

### 3 结论

本文采用平面波展开法,研究了铜币形空气孔三角晶格光子晶体中介质介电常数,空气孔半径  $R$ ,方形柱旋转角  $\varphi$  与宽度  $d$  以及长宽的比例系数  $G$  对完全带隙特性的影响,并将四个几何参量进行分组优化,得到最优参量组合.研究表明,铜币形空气孔三角晶格光子晶体可以获得更大的完全带隙;同时,完全带隙对由制备工艺上引起的材料掺杂及空气孔半径的偏离具有一定的稳定性.当  $\epsilon=22.75, R=0.483 \mu\text{m}, d=0.195 \mu\text{m}, \varphi=90^\circ, G=1.3$  时,完全带隙的宽度获得最大值  $0.1361(\Delta\omega a / 2\pi c)$ ,带隙率为  $33.55\%$ .本文设计的大带隙光子晶体结构为非偏振光子晶体器件的研究提供了参考.

#### 参考文献

- [1] BOUAMAMI S, NAOUM R. Compact WDM demultiplexer for seven channels in photonic crystal[J]. *Optik*, 2013, **124** (2013): 2373-2375.
- [2] LI Xu, LE Zi-chun. The design and simulation of wavelength division demultiplexer based on photonic crystal micro-cavity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(S1): 0123003.  
李旭,乐孜纯.光子晶体微腔稀疏波分解复用器的设计与模拟[J]. *光子学报*, 2014, **43**(S1): 0123003.
- [3] FOKOUA E N, RICHARDSON D J, POLETTI F. Impact of structural distortions on the performance of hollow-core photonic bandgap fibers[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(3): 2735-2744.
- [4] CHEN Zhe, XIE Jun-xin, LUO Yun-han, et al. Determination of azimuth angle of photonic crystal fiber by characteristic analysis of side transmission images[J]. *Acta*

- Photonica Sinica*, 2014, **43**(6): 0606001.  
陈哲, 谢俊辛, 罗云瀚, 等. 确定光子晶体光纤轴向方位角的侧视光强特征法[J]. 光子学报, 2014, **43**(6): 0606001.
- [5] LI Lei, LIU Gui-qiang, CHEN Yuan-hao, *et al.* Photonic crystal three-wavelength power splitter based on directional coupling[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(2): 167-170.  
黎磊, 刘桂强, 陈元浩, 等. 光子晶体定向耦合三波长功分器[J]. 光子学报, 2013, **42**(2): 167-170.
- [6] CAI Jun-an, QIN Zhi-xin. Enhancement of deep-UV light extraction efficiency from bulk AlGaIn with photonic crystals fabricated by nanoimprint lithography[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, **35**(8): 998-1002.  
蔡钧安, 秦志新. 纳米压印制备的光子晶体结构对 AlGaIn 材料深紫外出光效率的提高[J]. 发光学报, 2014, **35**(8): 998-1002.
- [7] ZHU N, WANG J, CHENG C, *et al.* Research of band gap properties based on two-dimensional photonic crystal with mixed shapes of rods[J]. *Optik*, 2013, **124**(2013): 309-312.
- [8] WANG X H, GU B Y, LI Z Y, *et al.* Large absolute photonic band gaps created by rotating noncircular rods in two-dimensional lattices[J]. *Physical Review B*, 1999, **60**(16): 11417-11421.
- [9] LIU Hui, LIU Dan, ZHAO Heng, *et al.* Study on complete photonic band gaps of two-dimensional air annular photonic crystals[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(19): 194208.  
刘会, 刘丹, 赵恒, 等. 空气环型二维光子晶体完全带隙特性研究[J]. 物理学报, 2013, **62**(19): 194208.
- [10] SHEN Juan-juan, HE Xing-dao, LIU Bin, *et al.* Photonic band gaps of two-dimensional hexagon-lattice photonic crystals based on Taiji-shaped dielectric rods [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(8): 084213.  
沈娟娟, 何兴道, 刘彬, 等. 基于太极形介电柱六角光子晶体禁带特性研究[J]. 物理学报, 2013, **62**(8): 084213.
- [11] SUSAN N. Large absolute and polarization-independent photonic band gaps for various lattice structures and rod shapes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, **91**(6): 3501-3510.
- [12] ZENG Jun, PAN Jie-yong, DONG Jian-wen, *et al.* Band gap characteristics of compound structure composed of lattices with different periodic constants[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(6): 2785-2788.  
曾隽, 潘杰勇, 董建文, 等. 大小周期正方格子复合结构的光子带隙特性[J]. 物理学报, 2006, **55**(6): 2785-2788.
- [13] ANDERSON C M, GIAPIS K P. Larger two-dimensional photonic band gaps[J]. *Physical Review Letters*, 1996, **77**(14): 2949-2952.
- [14] CHOU Gao-xin, LIN Fang-lei, LI Yong-ping. Implementation of complete two-dimensional bandgap in photonic crystals of square Bravais lattice using complex unit cell[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(3): 600-603.  
仇高新, 林芳蕾, 李永平. 利用复式晶胞实现二维正方形布拉菲格子光子晶体的完全带隙[J]. 物理学报, 2003, **52**(3): 600-603.
- [15] FENG Shang-shen, SHEN Lin-fang, HE Sai-ling. A two-dimensional photonic crystal formed by a triangular lattice of square dielectric rods with a large absolute band gap[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(5): 1540-1545.  
冯尚申, 沈林放, 何赛灵. 大带隙二维正方介电柱三角晶格光子晶体[J]. 物理学报, 2004, **53**(5): 1540-1545.
- [16] ZHONG Kai, ZHANG Hui-yun, ZHANG Yu-ping, *et al.* Optimal design based on a two-dimensional photonic crystal of hexagonal lattice with a large complete band gap[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(12): 7029-7033.  
钟凯, 张会云, 张玉萍, 等. 基于六角结构二维光子晶体绝对带隙的优化设计研究[J]. 物理学报, 2007, **56**(12): 7029-7033.
- [17] WANG R Z, WANG X H, GU B Y, *et al.* Effects of shapes and orientations of scatterers and lattice symmetries on the photonic band gap in two-dimensional photonic crystals[J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, **90**(9): 4307-4313.
- [18] CHERN R L, CHANG C C, CHANG C C, *et al.* Large full band gaps for photonic crystals in two dimensions computed by an inverse method with multigrid acceleration [J]. *Physical Review E*, 2003, **68**(2): 026704.
- [19] SHEN L F, HE S L, XIAO S S. Large absolute band gaps in two-dimensional photonic crystals formed by large dielectric pixels[J]. *Physical Review B*, 2002, **66**(16): 165315.
- [20] QIU G X, LIN F L, LI Y P. Complete two-dimensional bandgap of photonic crystals of a rectangular Bravais lattice [J]. *Optical Communication*, 2003, **219**(2003): 285-288.
- [21] FENG Shang-shen, SHEN Lin-fang, HE Sai-ling. A two-dimensional anisotropic photonic crystal with a large absolute band gap[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(2): 235-238.  
冯尚申, 沈林放, 何赛灵. 一种具有大带隙的各向异性二维光子晶体结构[J]. 光子学报, 2003, **32**(2): 235-238.
- [22] LI Z Y, WANG J, GU B Y. Creation of partial band gaps in anisotropic photonic-band-gap structures [J]. *Physical Review B*, 1998, **58**(7): 3721-3729.
- [23] LI Z Y, GU B Y, YANG G Z. Large Absolute Band gap in 2D anisotropic photonic crystals [J]. *Physical Review Letters*, 1998, **81**(12): 2574-2577.
- [24] KURT H, CITRIN D S. Annular photonic crystals[J]. *Optical Express*, 2005, **13**(25): 10316-10326.
- [25] ZHANG Y R, KONG L K, FENG Z H, *et al.* PBG structures of novel two-dimensional annular photonic crystals with triangular lattice[J]. *Optoelectronics Letters*, 2010, **16**(4): 281-283.
- [26] JOANNOPOULOS J D, JOHNSON S G, WINN J N, *et al.* Photonic crystals: molding the flow of light [M]. Second Edition. Princeton and Oxford: Princeton University Press, 2008: 1-75.
- [27] LIU Jian-jun, FAN Zhi-gang, XIAO hao-su, *et al.* Photonic band gap in Ge-based two-dimensional triangular lattice photonic crystals [J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves*, 2012, **31**(1): 35-41.  
刘建军, 范志刚, 肖昊苏, 等. Ge 基二维三角晶格光子晶体的光子带隙[J]. 红外与毫米波学报, 2012, **31**(1): 35-41.
- [28] LU Hui, TIAN Hui-ping, LI Chang-hong, *et al.* Large absolute band gaps of 2D photonic crystals [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6): 1414-1418.  
鲁辉, 田慧平, 李长红, 等. 大带隙二维光子晶体结构的研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(6): 1414-1418.