

# 二维光子晶体点群对称对不可约布里渊区的影响

许振龙<sup>1,2</sup> 吴福根<sup>3</sup> 郭钟宁<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 广东工业大学机电工程学院, 广东 广州 510006; <sup>2</sup> 湄洲湾职业技术学院, 福建 莆田 351254)  
<sup>3</sup> 广东工业大学实验教学部, 广东 广州 510006

**摘要** 采用平面波展开法,研究了二维光子晶体点群对称对不可约布里渊区的影响。在单柱体二维光子晶体单胞中增加一个柱体,设计成不同点群对称操作数的对称结构,计算了最低 5 条能带的本征频率值在第一布里渊区的分布图。结果表明:在计算二维光子晶体的能带结构时,如果光子晶体的点群对称操作数为  $n$ ,所取的不可约布里渊区应为整个第一布里渊区的  $1/n$ 。

**关键词** 物理光学;不可约布里渊区;平面波展开法;光子晶体;点群对称

**中图分类号** O734 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.0726002

## Effects of Point Group Symmetry on Irreducible Brillouin Zone in Two-Dimensional Photonic Crystals

Xu Zhenlong<sup>1,2</sup> Wu Fugen<sup>3</sup> Guo Zhongning<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Electro Mechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China  
<sup>2</sup> Meizhouwan Vocational Technology College, Putian, Fujian 351254, China  
<sup>3</sup> Department of Experiment Education, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China

**Abstract** By using the plane-wave expansion method, the effect of point group symmetry on irreducible Brillouin zone in two-dimensional photonic crystals is studied. Additional cylinder in unit cell of single-cylinder two-dimensional photonic crystal is designed as symmetrical structures with different operation numbers of symmetry, eigen-frequencies of the five lowest energy bands in the Brillouin zone are calculated. The results show that in the calculation of two-dimensional photonic crystal band structure, if the photonic crystal point group symmetry operation number is  $n$ , the irreducible Brillouin zone should be  $1/n$  of the whole first Brillouin zone.

**Key words** physical optics; irreducible Brillouin zone; plane-wave expansion method; photonic crystals; point group symmetry

**OCIS codes** 260.1180; 160.4760

## 1 引 言

1987 年, Yablonovitch<sup>[1]</sup> 和 John<sup>[2]</sup> 从不同的角度几乎同时提出了光子晶体的概念,从而打开了一个崭新的研究领域。光子晶体的应用主要基于光子带隙的存在<sup>[3~5]</sup>。产生光子带隙的瓶颈之一是光子晶体布里渊区高对称点出现的简并态,改变光子晶

体的对称性使简并态分立从而得到光子带隙是科学家们的共识,因而科学家们设计各种光子晶体结构对光子带隙进行优化。基于这个理念,有多种方法被用于改变光子晶体对称性,如在二维晶格单胞的中心插入一个小柱体<sup>[6]</sup>,降低散射体的对称性<sup>[7]</sup>,采用不同的晶格结构<sup>[8]</sup>,使标准的晶格发生形变<sup>[9]</sup>,在

**收稿日期:** 2012-01-11; **收到修改稿日期:** 2012-02-15

**基金项目:** 国家自然科学基金(10674032)和广东省自然科学基金(6021480)资助课题。

**作者简介:** 许振龙(1976—),男,博士研究生,讲师,主要从事光子晶体及声子晶体等方面的研究。

E-mail: zhenlongxu@sohu.com

**导师简介:** 吴福根(1963—),男,博士,教授,主要从事光子晶体及声子晶体等方面的研究。E-mail: wufugen@21cn.com

单个柱体的单胞中任意位置增加一个柱体<sup>[10]</sup>等。光子晶体散射体可以设计,并且散射体的取向和配置也可随意改变,使得晶体的对称性不同于晶格,晶体的不可约布里渊区发生变化。

董华锋等<sup>[11]</sup>将对称性较低的椭圆介质柱作为散射体,随着柱体取向的改变,不可约布里渊区也在变化。当晶体的对称性低于其晶格的对称性时,晶体的不可约布里渊区扩大为整个第一布里渊区。Nojima 等<sup>[12]</sup>认为引进了第二个柱体使系统变得极不对称,所以需要计算整个布里渊区才能得到准确的带结构。本文进一步研究了单柱体二维光子晶体单胞中增加一个柱体时最低 5 条能带的本征频率值在第一布里渊区的分布。结果表明:在计算二维光子晶体的能带结构时,如果光子晶体的点群对称操

作数为  $n$ ,所取的不可约面积应为整个第一布里渊区的  $1/n$ 。

## 2 模型和方法

对于二维光子晶体,当电磁波沿垂直于光子晶体轴向传播时,电磁场分解为  $E$  和  $H$  两种偏振模式的线性叠加,它们的场矢量分别平行和垂直于柱体的轴向。研究的模型二维方形晶格的光子晶体如图 1(a)所示,由无限多个方形介质柱体( $\epsilon_a = 12.8$ )置于空气( $\epsilon_b = 1.0$ )基体中。图 1(b)为第一布里渊区,网格部分为不可约布里渊区。在本文中,用  $M$ 、 $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ 、 $X$ 、 $X_1$ 、 $Y$ 、 $Y_1$ 、 $\Gamma$  等来表示第一布里渊区的对称点,用  $MX$ 、 $MY$  等来表示对称轴。

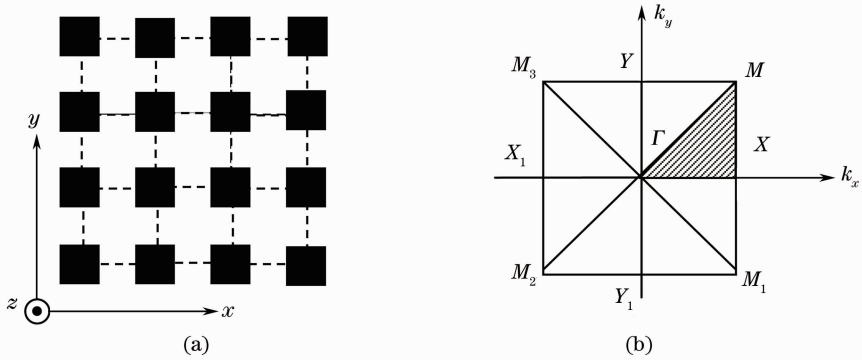


图 1 (a)二维方形晶格结构的光子晶体模型;(b)二维方形晶格结构的光子晶体的第一布里渊区

Fig. 1 (a) Two-dimensional photonic crystal model in square lattice; (b) first Brillouin zone of two-dimensional photonic crystal with square lattice

由于  $E$  偏振模式的带隙容易出现在高介电常数的介质孤立分布的结构中,仅考虑  $E$  偏振模式,其本征频率值用平面波展开法<sup>[13-15]</sup>计算。 $E(\mathbf{r})$  偏振模式可以根据布洛赫原理进行傅里叶展开,对  $E(\mathbf{r})$  的麦克斯韦方程最终可以化简为对  $E(\mathbf{G})$  求本征值问题:

$$\sum_{\mathbf{G}'} |\mathbf{k} + \mathbf{G}| |\mathbf{k} + \mathbf{G}'| \epsilon^{-1}(\mathbf{G} - \mathbf{G}') E(\mathbf{G}') = (\omega/c)^2 E(\mathbf{G}), \quad (1)$$

式中  $\mathbf{k}$  为布洛赫波矢, $\mathbf{G}$  为二维倒格子, $\epsilon^{-1}(\mathbf{G})$  为介电函数  $\epsilon^{-1}(\mathbf{r})$  的倒格子展开。本征频率值在第一布里渊区的分布,选用  $101 \times 101$  个波矢  $\mathbf{k}$  进行计算。

## 3 结果和分析

为了研究二维光子晶体散射体配置对不可约布里渊区的影响,设计了不同点群对称操作数目的光子晶体。

首先,在单胞的中心处插入方形柱体,模型如

图 2(a)所示,其中  $L_1 = 0.20a$ 、 $L_2 = 0.20a$ 。这种配置下光子晶体的点群对称具有 8 个对称操作。图 2(b)~(f)为最低 5 条能带本征频率值在第一布里渊区分布等高线图,分别为图 2(b)能带 1、图 2(c)能带 2、图 2(d)能带 3、图 2(e)能带 4、图 2(f)能带 5。在等高线图中越亮的地方本征频率值越低,越暗的地方本征频率值越高,为了便于区分,最亮的点即本征频率值最低的,用黑圈表示;最暗的点即本征频率值最高的,用白圈表示。图 3、4、5 中的等高线图类同,将不再重复说明。在带 1 和带 5 的分布图中,极大值点在第一布里渊区中心  $\Gamma$  点,极小值点在四个顶角  $M$ 、 $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  点。在带 2、3、4 中极小值点在中心,而极大值点在 4 个顶角。显然,在第一布里渊区内本征频率值分布具有 8 个对称操作。本征频率极值点都在对称点上。这种情况下,不可约布里渊区只要取整个布里渊区的八分之一,而且沿着基本三角形区域  $\Gamma MX$  边沿计算就可以得到整

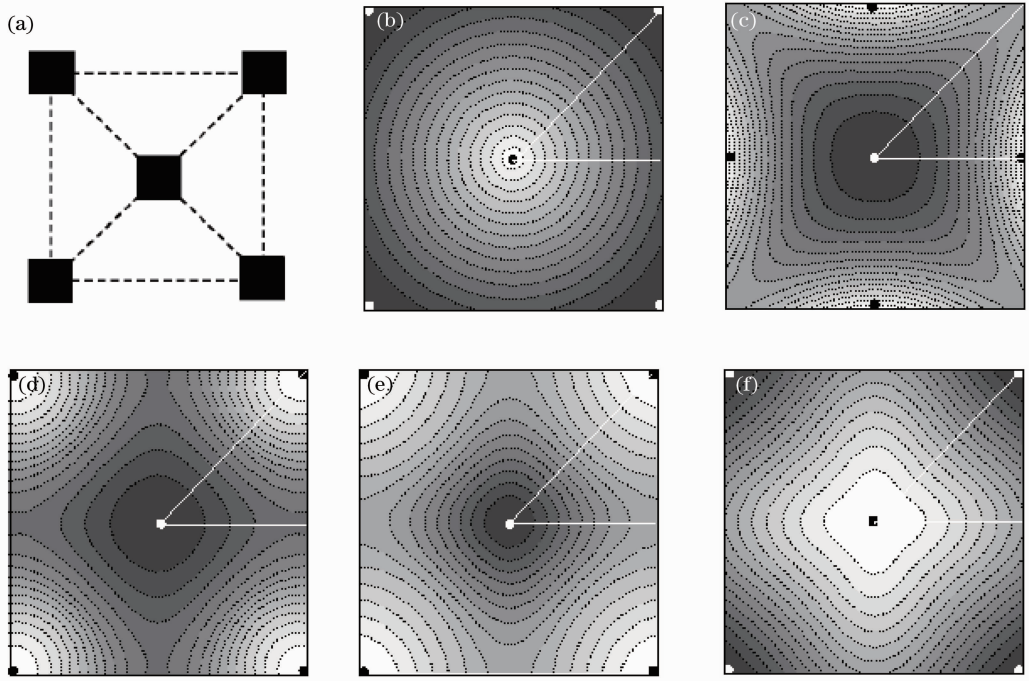


图 2 (a)在单胞的中心处插入方形柱体的二维光子晶体模型;(b)~(f)为最低 5 条能带本征频率值在第一布里渊区分布等高线图,分别为(b)能带 1、(c)能带 2、(d)能带 3、(e)能带 4、(f)能带 5

Fig. 2 (a) Two-dimensional photonic crystals model with a square cylinder placed into the center of the unit cell; (b)~(f) contours of eigen-frequencies of the lowest five energy bands in the first Brillouin zone, (b) band 1, (c) band 2, (d) band 3, (e) band 4, (f) band 5

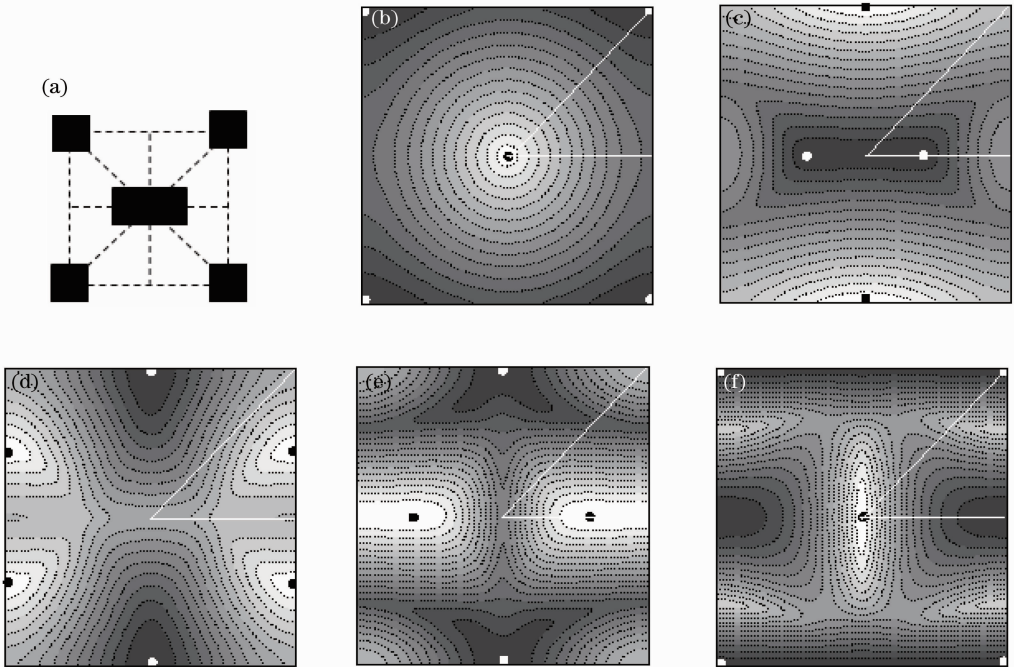


图 3 (a)在单胞的中间处插入长方形柱体的二维光子晶体模型;(b)~(f)为最低 5 条能带本征频率值在第一布里渊区分布等高线图,分别为(b)能带 1、(c)能带 2、(d)能带 3、(e)能带 4、(f)能带 5

Fig. 3 (a) Two-dimensional photonic crystals model with a rectangular cylinder placed into the center of the unit cell; (b)~(f) contours of eigen-frequencies of the lowest five energy bands in the first Brillouin zone, (b) band 1, (c) band 2, (d) band 3, (e) band 4, (f) band 5

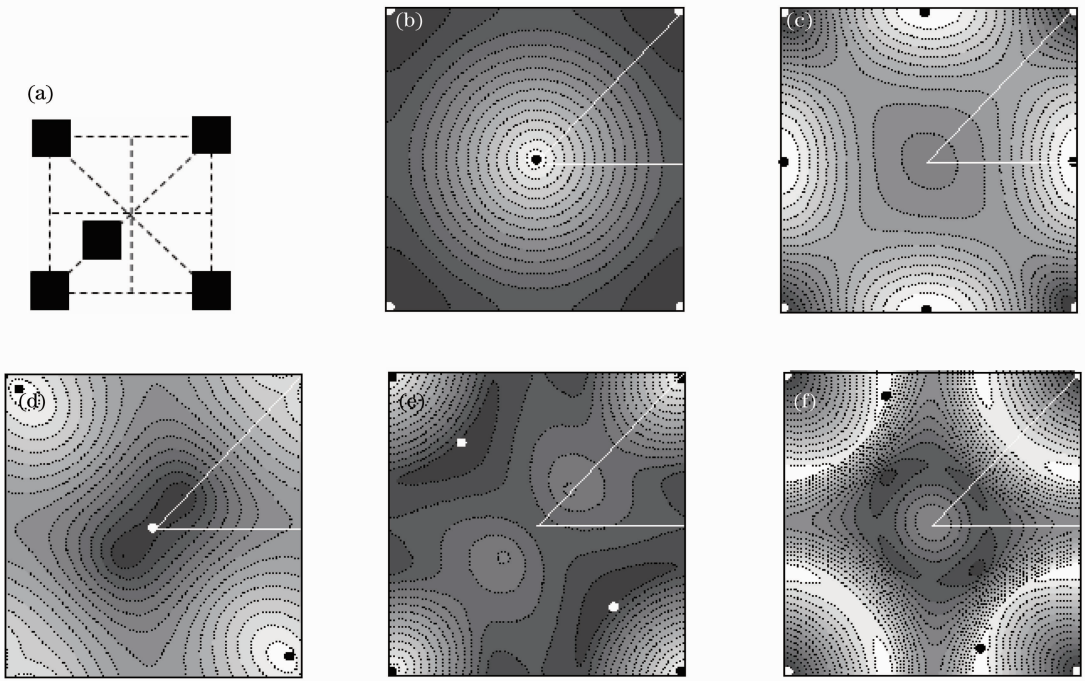


图 4 (a)在单胞的 $(0.24a, 0.24a)$ 处增加一个方形柱体的二维光子晶体模型;(b)~(f)为最低 5 条能带在第一布里渊区的本征频率值等高线图,分别为(b)能带 1,(c)能带 2,(d)能带 3,(e)能带 4,(f)能带 5

Fig. 4 (a) Two-dimensional photonic crystals model with a square cylinder placed into the position  $(0.24a, 0.24a)$  of the unit cell; (b)~(f) contours of eigen-frequencies of the lowest five energy bands in the first Brillouin zone, (b) band 1, (c) band 2, (d) band 3, (e) band 4, (f) band 5

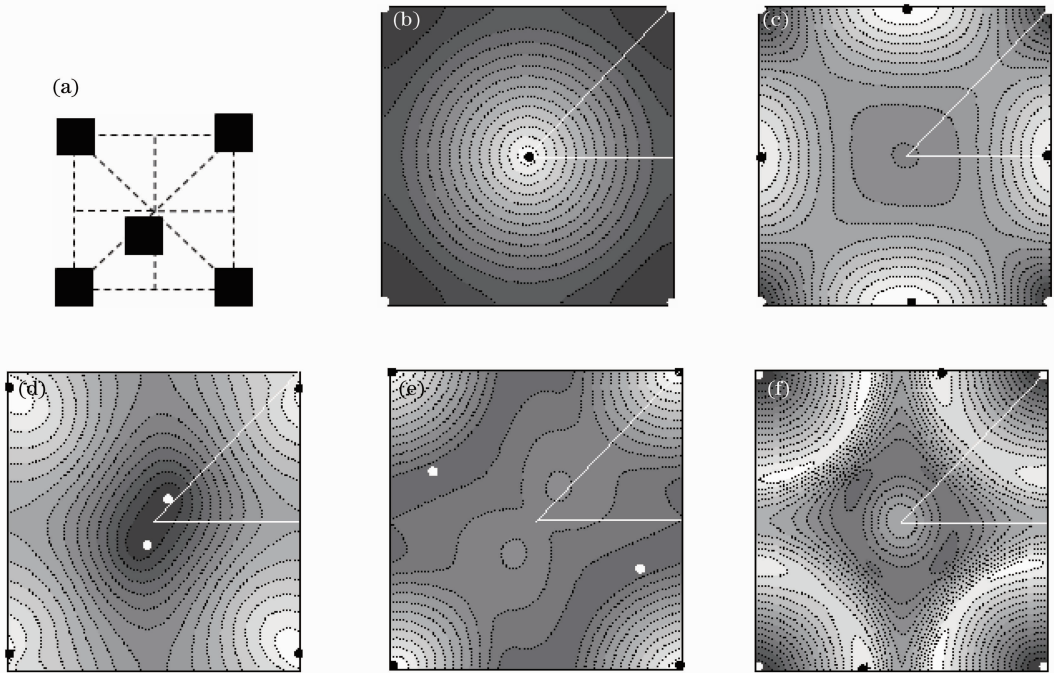


图 5 (a)在单胞的中 $(0.25a, 0.40a)$ 间处插入方形柱体的二维光子晶体模型;(b)~(f)为最低 5 条能带在第一布里渊区的本征频率值等高线图,分别为(b)能带 1,(c)能带 2,(d)能带 3,(e)能带 4,(f)能带 5

Fig. 5 (a) Two-dimensional photonic crystals model with a square cylinder placed into the position  $(0.25a, 0.40a)$  of the unit cell; (b)~(f) contours of eigen-frequencies of the lowest five energy bands in the first Brillouin zone, (b) band 1, (c) band 2, (d) band 3, (e) band 4, (f) band 5



个第一布里渊区的极大值点和极小值点,也就可以正确得到光子晶体的能带结构。

接着,在单胞的中心处插入一长方形柱体,其中  $L_1 = 0.20a$ , 中心处长方形柱体的边长分别为  $0.20a$  和  $0.54a$ , 模型如图 3(a) 所示。这种配置下光子晶体的点群对称具有 4 个对称操作。图 3(b)~(f) 为最低五条能带本征频率值在第一布里渊区分布等高线图,分别为图 3(b) 能带 1、图 3(c) 能带 2、图 3(d) 能带 3、图 3(e) 能带 4、图 3(f) 能带 5。在带 1 和带 5 的分布图中,极小值点在第一布里渊区中心  $\Gamma$  点,极大值点在四个顶角  $M, M_1, M_2, M_3$  点。在带 2 的分布图中,极大值点分别在对称轴  $\Gamma X$  和  $\Gamma X_1$  上,两个极小值点分别位于  $Y$  和  $Y_1$  点。在带 3 的分布图中,极大值在  $Y$  和  $Y_1$  点,4 个极小值点分别位于对称轴  $MX, M_1 X, M_2 X, M_3 X$  上。在带 4 的分布图中,极大值在  $Y$  和  $Y_1$  点,而 4 个极小值点分别在对称轴  $\Gamma X$  和  $\Gamma X_1$  上。在第一布里渊区内本征频率值分布具有四个对称操作,而且极值点都在对称点上。这种情况下,不可约面积要取整个布里渊区的四分之一(如  $\Gamma XMY$ ) 才可以得到整个第一布里渊区的极大值点和极小值点,才可以得到正确的光子晶体的能带结构。

然后在单胞  $(0.24a, 0.24a)$  位置处插入一方形柱体,其中  $L_1 = 0.20a, L_2 = 0.20a$ , 模型如图 4(a) 所示。这种配置下光子晶体的点群对称只具有 2 个对称操作。图 4(b)~(f) 为最低 5 条能带本征频率值在第一布里渊区的等高线图,分别为图 3(b) 能带 1、图 3(c) 能带 2、图 3(d) 能带 3、图 3(e) 能带 4、图 3(f) 能带 5。在带 1 的分布图中,极小值点在中央  $G$ , 极大值点在 4 个顶角  $M, M_1, M_2, M_3$  点。在带 2 的分布图中,极大值在 4 个顶角  $M, M_1, M_2, M_3$  点,而 4 个极小值点分别位于  $X, X_1, Y$  和  $Y_1$  点。在带 3 的分布图中,极大值点在中央  $\Gamma$ , 而两个极小值点分别位于对称轴  $M_1\Gamma, M_3\Gamma$  上。在带 4 的分布图中,4 个极小值在 4 个顶角  $M, M_1, M_2, M_3$  点,而两个极大值点分别位于对称轴  $M_1\Gamma, M_3\Gamma$  上。在带 5 的分布图中,4 个极大值在 4 个顶角  $M, M_1, M_2, M_3$  点,而且首次发现了两个极小值点并不在对称点,而是在  $M_1\Gamma X$  和  $M_1\Gamma X_1$  区域中上,  $\omega_5^{\min} = 0.932, \omega_4^{\max} = 0.938$ 。发现在第一布里渊区内本征频率值分布具有两个对称操作。但极值点不全都在高对称点上。这种情况下,不可约布里渊区要取整个布里渊区的二分之一(如  $MM_1M_2$ ) 才可以得到整个第一布里渊区的极大值点和极小值点,才可以正确得到光子晶体的

能带结构。

最后,在单胞  $(0.25a, 0.40a)$  位置处插入一方形柱体,其中  $L_1 = 0.20a, L_2 = 0.20a$ , 模型如图 5(a) 所示。这种配置下光子晶体的点群对称只具有 1 个对称操作。图 5(b)~(f) 为最低 5 条能带本征频率值在第一布里渊区的等高线图,分别为图 5(b) 能带 1、图 5(c) 能带 2、图 5(d) 能带 3、图 5(e) 能带 4、图 5(f) 能带 5。在带 1 的分布图中,极小值点在中央  $\Gamma$ , 极大值点在 4 个顶角  $M, M_1, M_2, M_3$  点。在带 2 的分布图中,极大值在 4 个顶角  $M, M_1, M_2, M_3$  点,而 4 个极小值点分别位于  $X, X_1, Y$  和  $Y_1$  点。在带 3 的分布图中,两个极大值点并不在高对称点上,而是在对称轴  $MM_2$  的两侧,  $\omega_3^{\max} = 0.864$ , 而 4 个极小值点分别位于对称轴  $MX, M_1 X, M_2 X, M_3 X_1$  线上。在带 4 的分布图中,4 个极小值在 4 个顶角  $M, M_1, M_2, M_3$  点,  $\omega_4^{\min} = 0.683, \omega_4^{\max} = 0.934$ , 而两个极大值点分别位于  $M_1\Gamma X$  和  $M_1\Gamma X_1$  区域中。在带 5 的分布图中,4 个极大值在 4 个顶角  $M, M_1, M_2, M_3$  点,两个极小值点在  $MY$  和  $M_2 Y_1$  线上,  $\omega_5^{\min} = 0.935$ 。发现在第一布里渊区内频率本征值分布极值点不全都在对称点上,而且不同能带极值点在不同区域,图 5(d) 应取遍  $Y\Gamma X M$  或  $Y_1\Gamma X_1 M_2$  区域,图 5(e) 应取遍  $M_3\Gamma X_1$  或  $M_1\Gamma X$  区域,根据本征频率值在整个第一布里渊区的分布,只有取遍整个布里渊区才确信可以正确得到光子晶体的能带结构。

从理论上做进一步论述,设  $\psi_{nk}(r)$  为光子晶体哈密顿量  $H$  的本征函数,本征值为  $E_n(k)$ , 则有

$$H\psi_{nk}(r) = E_n(k)\psi_{nk}(r). \quad (2)$$

假定  $\alpha$  为光子晶体所属点群的任一对称操作,  $\alpha^{-1}$  表示  $\alpha$  的逆操作。引入点群对称操作算符  $T(\alpha)$ , 对于任意函数  $f(r)$ , 有  $T(\alpha)f(r) = f(\alpha^{-1}r)$ 。由于光子晶体的晶格对称性,  $T(\alpha)$  和  $H$  是对易的:

$$T(\alpha)H\psi_{nk}(r) = HT(\alpha)\psi_{nk}(r), \quad (3)$$

$$T(\alpha)\psi_{nk}(r) = \psi_{nk}(\alpha^{-1}r). \quad (4)$$

根据布洛赫函数

$$\psi_{nk}(r) = \exp(ikr)\mu_{nk}(r), \quad (5)$$

则有

$$\psi_{nk}(\alpha^{-1}r) = \exp(i\mathbf{k}\alpha^{-1}r)\mu_{nk}(\alpha^{-1}r). \quad (6)$$

又由于晶体点群操作保持点乘积不变:

$$\mathbf{A}\mathbf{B} = \alpha^{-1}(\mathbf{A}\mathbf{B}) = \alpha^{-1}\mathbf{A}\alpha^{-1}\mathbf{B}, \quad (7)$$

$$\alpha\mathbf{A}\mathbf{B} = \alpha\alpha^{-1}\mathbf{A}\alpha^{-1}\mathbf{B} = \mathbf{A}\alpha^{-1}\mathbf{B}, \quad (8)$$

则有

$$k\alpha^{-1}r = \alpha kr. \quad (9)$$

所以

$$\exp(i\mathbf{k}\alpha^{-1}\mathbf{r})\mu_{n\mathbf{k}}(\alpha^{-1}\mathbf{r}) = \exp(i\alpha\mathbf{k}\mathbf{r})\mu_{n\mathbf{k}}(\alpha^{-1}\mathbf{r}) = \exp(i\alpha\mathbf{k}\mathbf{r})\mu'_{n,\alpha\mathbf{k}}(\mathbf{r}). \quad (10)$$

因此有

$$T(\alpha)\psi_{n\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = \exp(i\alpha\mathbf{k}\mathbf{r})\mu'_{n,\alpha\mathbf{k}}(\mathbf{r}), \quad (11)$$

也就是说  $T(\alpha)$  作用于布洛赫函数的结果是把简约波矢  $\mathbf{k}$  变换到  $\alpha\mathbf{k}$ 。所以有  $E_n(\mathbf{k}) = E_n(\alpha\mathbf{k})$ 。在  $\mathbf{k}$  空间,  $E_n(\mathbf{k})$  具有与晶体点群完全相同的对称性。这样就可以在晶体能带计算和表述中把第一布里渊区分成若干个等价的区域, 只取其中一个就足够了。因而需要计算的等价区域和点群对称的操作数成反比。

根据上面的讨论分析, 可以得到, 在计算二维光子晶体的带隙和能带结构时, 如果光子晶体的点群对称操作数为  $n$ , 所取的不可约布里渊区应为整个第一布里渊区的  $1/n$ 。

## 4 结 论

采用平面波展开法, 研究了二维光子晶体点群对称对不可约布里渊区的影响。在单柱体二维光子晶体单胞中增加一个柱体, 设计成不同点群对称操作数的对称结构, 计算了最低 5 条能带的本征频率值在第一布里渊区的分布图。结果表明: 在计算二维光子晶体的能带结构时, 如果光子晶体的点群对称操作数为  $n$ , 所取的不可约布里渊区应为整个第一布里渊区的  $1/n$ 。对于具有较高对称性的光子晶体, 计算能带结构时只要沿着不可约布里渊区边沿就可以得到整个第一布里渊区的极值点, 而对于较低对称性的光子晶体则必须取遍整个不可约布里渊区才可以得到极值点, 才可以得到正确的光子晶体的能带结构。

## 参 考 文 献

- 1 Eli Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **50**(20): 2059~2062
- 2 Sajeev John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 3 Huang Aiqin, Zheng Jihong, Xu Banglian *et al.*. Influence of structural parameters of tunable triangular lattice photonic crystal on photonic band gap [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(s1): s100202
- 黄爱琴, 郑继红, 徐邦联等. 可调谐液晶三角格子光子晶体结构参数的变化对光子带隙的影响[J]. *光学学报*, 2011, **31**(s1):

s100202

- 4 Liu Lingyu, Tian Huiping, Xu Pan *et al.*. Study on characteristics of quasi-fractal photonic crystal based on Sierpinski gasket structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0316003
- 刘凌宇, 田慧平, 许攀等. 基于 Sierpinski 地毯结构的类分形光子晶体特性研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0316003
- 5 Feng Shuai, Yang Yuping, Wang Yiquan. Absolute photonic band gap of the two-dimensional hollow-dielectric triangular-lattice photonic crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1173~1177
- 冯帅, 杨玉平, 王义全. 二维空心介质柱型三角晶格光子晶体的完全光子禁带 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1173~1177
- 6 Zhang Jing, He Ying, Li Chunfang *et al.*. Guided modes in a four-layer slab waveguide with the LHM core [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2673~2680
- 张静, 何英, 李春芳等. 包含左手材料的四层平板波导中的光导模 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2673~2680
- 7 Zhuang Fei, He Sailing, He Jiangping *et al.*. Large complete band gap of photonic crystal consisting of anisotropic elliptic cylinders [J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(2): 0355~0361
- 庄飞, 何赛灵, 何江平等. 大带隙的二维各向异性椭圆介质柱光子晶体 [J]. *物理学报*, 2002, **51**(2): 0355~0361
- 8 Zeng Jun, Pan Jieyong, Dong Jianwen *et al.*. Band gap characteristic s 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
- 9 N. Susa. Large absolute and polarization-independent photonic band gaps for various lattice structures and rod shapes [J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, **91**(6): 3501~3506
- 10 S. Nojima, T. Mizoi. Photonic band gaps tuned by atomic configurations in binary-compound photonic crystals [J]. *Phys. Rev. B*, 2005, **71**(19): 193106
- 11 Dong Huafeng, Wu Fugen, Xu Zhenlong *et al.*. Research on the irreducible Brillouin zone and band structure of two-dimensional photonic crystals [J]. *Scientia Sinica Phys., Mech. & Astron.*, 2011, **41**(6): 775~780
- 董华锋, 吴福根, 许振龙等. 二维光子晶体不可约布里渊区及其能带结构的研究 [J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2011, **41**(6): 775~780
- 12 Shunji Nojima, Yusuke Kamakura. Irreducible first Brillouin-zone for two-dimensional binary-compound photonic crystals [J]. *J. Phys. Soc. Jpn.*, 2008, **77**(3): 034403
- 13 Rongzhou Wang, Xuehua Wang, Benyuan Gu *et al.*. Effects of shapes and orientations of scatterers and lattice symmetries on the photonic band gap in two-dimensional photonic crystals [J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, **90**(9): 4307~4313
- 14 Guo Hao, Wu Ping, Yu Tianbao *et al.*. Design of large separating angle ultracompact multiway beam splitter based on photonic crystal ring resonators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1501~1505
- 郭浩, 吴评, 于天宝等. 光子晶体环形谐振腔大角度超微多路光分束器的设计 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1501~1505
- 15 Yanfang Feng, Fugen Wu, Huilin Zhong *et al.*. Defect modes created by an elliptic defect in two-dimensional triangular photonic crystals [J]. *Solid State Commun.*, 2007, **142**(4): 223~227

栏目编辑: 韩峰