

doi:10.3788/gzxb20144312.1231001

基于晶格效应的光子晶体带隙特性研究

骆岩红^{1,2}, 赵寰宇³, 李公平¹

(1 兰州大学 核科学与技术学院, 兰州 730000)

(2 西北民族大学 电气工程学院, 兰州 730030)

(3 北京交通大学 工程力学研究所, 北京 100044)

摘 要:对 10 种类型阿基米德晶格按不同晶格点阵进行分类, 利用平面波展开法数值计算了光子晶体的能带结构, 讨论归一化半径对其带隙的影响, 比较了低频带隙相对宽度值. 计算结果表明: 单胞含多个“原子”的类正方晶格和类三角晶格光子晶体均存在 TM 模各向同性带隙和低频带隙, 还容易产生 TE 模和 TM 模的完全带隙, 进一步分析发现(3².4.3.4)晶格和(3.6.3.6)晶格打开 TM 模的低频第 1 带隙下边界值为最小; 选择合适归一化半径分别为 0.2 和 0.26, 类正方晶格和类三角晶格光子晶体都能够得到较宽 TM 模低频带隙的最大值, (3².4.3.4)晶格和(3.6.3.6)晶格获得低频带隙为最宽. 典型复式晶格空气环/硅光子晶体能够获得较宽的完全带隙. 研究结果为设计新型光学器件提供了理论依据.

关键词:光子晶体; 类正方晶格; 类三角晶格; 带隙; 归一化半径; 平面波展开法

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)12-1231001-9

Investigation of Photonic Band Gaps of Two-dimensional Photonic Crystals Based on Lattice Configurations

LUO Yan-hong^{1,2}, ZHAO Huan-yu³, LI Gong-ping¹

(1 The School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

(2 College of electrical engineering, Northwest University for Nationalities, Lanzhou 730030, China)

(3 Institute of Engineering Mechanics, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Ten types of two-dimensional Archimedean lattices were classified by square-like lattices and triangle-like lattices. Then the properties of photonic band gaps in the photonic crystals were studied by the plane wave expansion method. The effect of the normalized radius on the band gaps is discussed, and the band gap widths of above photonic crystals of lower frequency were compared. The numerical results show that the photonic crystals with square-like lattices and triangle-like lattices have some isotropic band gaps and lower frequency band gaps for the TM modes, the complete band gaps for the TE and TM modes were produced easily. The lower boundary values of first band gap for the TM modes are analyzed is minimal for the (3².4.3.4) and (3.6.3.6) lattices by analysis. The maximum values of those band gaps for the TM modes in the square-like lattices and triangle-like lattices are obtained if choosing an appropriate normalized radius 0.2 and 0.26, and the typical photonic crystal with compound lattice has complete band gap. The research can pave a way in the design of new optical devices.

Key words: Photonic crystals; Square-like lattices; Triangle-like lattices; Band gaps; Normalized radius; Plane wave expansion method

OCIS Codes: 160.5293; 160.5298; 160.1190

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 11302021, 11202021)、中央高校基本科研业务费专项资金(Nos. 31920130016, 2014JBM097)和北京交通大学人才基金(No. 2014RC001)资助

第一作者:骆岩红(1973-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向 CT 图像处理技术及电磁波在人工周期结构中传播. Email: luoyh_l@163.com

通讯作者:赵寰宇(1978-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为声子/光子晶体及声学超材料. Email: zhaohy@bjtu.edu.cn

收稿日期:2014-03-13; **录用日期:**2014-08-07

www.photon.ac.cn

0 引言

波是一种信息载体,具有传播速度快、信息载量大和能量损耗低等优点.光子晶体作为一种人工设计和制备的周期结构带隙材料^[1-2],可以实现对光波的捕获和调控.带隙是光子晶体的主要特征之一,光波的频率位于带隙内被禁止传播.依据这一特征,光子晶体在光的波导、耦合器、波束分离器、滤波器、超透镜、二极管和光存储等方面都有着重要应用价值^[3-7].影响光子晶体带隙的主要因素有结构参数和材料参数^[8].材料参数包括相对介电常数和磁性常数等^[9-10];结构参数包括填充比、晶格点阵形式和散射体形状等^[11-16].因此,晶格点阵对调控光子晶体带隙的宽度和位置起着关键的作用,为设计不同频段光波器件提供了新的思路.

目前,二维光子晶体的研究主要集中于布拉伐格子(Bravais lattice),如正方晶格、三角晶格和蜂窝晶格^[17-18],但是对单胞含多个“原子”的二维阿基米德晶格光子晶体带隙特性未展开深入研究.1619年,Kepler首次完整地描述了由正凸多边形组成棋盘状11种类型二维阿基米德晶格(Archimedean lattices),它们是由不同正凸多边形以相互边到边重合的方式完全排列在一个顶点周围组成,该晶格点阵排列采用数学中的Grünbaum-Shephard表示方法^[19].由于阿基米德晶格具有严格的周期性、高阶局部对称性和类似准晶体性

质^[12-20],比布拉伐格子存在更多的晶格类型.因此,引入该类型晶格光子晶体,利用其带隙调控光波的传播特性,丰富了研究光传播的手段.1996年,Anderson等^[17]分析了三角晶格和正方晶格光子晶体的带隙性质,发现三角晶格能够获得较宽的高频带隙.随后,Garcia-Adeva^[9]研究了(3.4.6.4)晶格(Kagomé晶格)光子晶体的能带结构,讨论了介电常数对带隙的影响.韩昌盛等^[21]仅仅研究了散射体形状和旋转角度对(4.8²)晶格光子晶体带隙的影响.对于(3².4.3.4)晶格光子晶体^[12,22],研究表明其容易产生带隙和实现光波的自准直传输.Ueda等^[23]对(4².8)晶格、(6³)晶格和(4.6.12)晶格光子晶体的带隙进行了研究,但是没有清晰阐述影响带隙的因素.

本文首先对单胞含多个“原子”的10种类型二维阿基米德晶格按正方点阵和三角点阵进行分类,然后利用平面波展开法数值计算该晶格类型硅/空气光子晶体的能带结构^[23-24],分析其带隙性质,讨论归一化半径对带隙的影响,比较了不同晶格类型低频带隙分布特征,并讨论了典型复式晶格光子晶体的完全带隙性质.

1 模型建立

图1给出了10种类型二维阿基米德晶格光子晶体的示意图及其第一布里渊区.

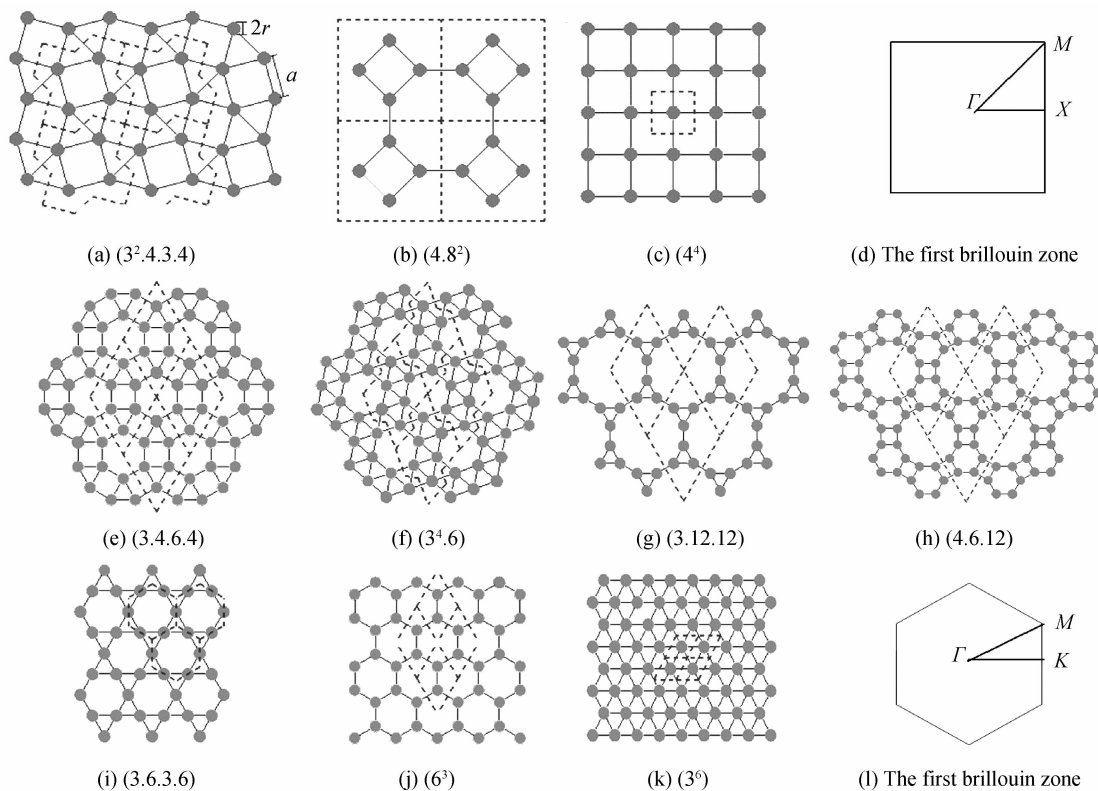


图1 10种类型二维阿基米德晶格光子晶体示意图及第一布里渊区

Fig. 1 Ten types of lattice structure and first Brillouin zone of photonic crystals with the two-dimensional Archimedean lattices

从图中可以看出,介电常数为 $\epsilon=12$ 的圆形硅柱按不同晶格类型周期排列于空气中,组成单胞含多个“原子”的复式晶格光子晶体. 相邻圆形硅柱中心距离为 a , 半径为 r , 如图 1(a), 其余晶格的几何参数与其相同. 在图 1(a)~(c)中, $(3^2.4.3.4)$ 晶格和 (4.8^2) 晶格的单胞均含有 4 个“原子”, 选取 4 个硅柱视为一组, 构成一个虚线多边形单胞, 可简化其按正方点阵排列, 与单胞含 1 个“原子”的 (4^4) 晶格(通常称为正方晶格)排列方式相同, 且它们有相同的正方形第一布里渊区, 如图 1(d). 而 $(3^2.4.3.4)$ 晶格和 (4.8^2) 晶格称为类正方晶格, 它们的晶格常数分别为 $\sqrt{2+\sqrt{3}}a$ 和 $(\sqrt{2}+1)a$, 其相应的填充率最大值分别为 84.2% 和 53.9%.

观察图 1(e)~(k)可知, $(3.4.6.4)$ 晶格、 $(3^4.6)$ 晶格和 $(3.12.12)$ 晶格的虚线多边形单胞都含 6 个“原子”; $(4.6.12)$ 晶格、 $(3.6.3.6)$ 晶格和 (6^3) 晶格分别含有 12 个“原子”、3 个“原子”和 2 个“原子”; 可选取 6 个硅柱、12 个硅柱、3 个硅柱和 2 个硅柱视作一组, 它们可以简化为三角点阵排列. 因此, 这六种晶格称为类三角晶格, 与单胞含 1 个“原子”的 (3^6) 晶格有相同排列方式, 且其都有相同的正六边形第一布里渊区, 如图 1(l). 其中 (6^3) 与 (3^6) 晶格通常分别称蜂窝晶格和三角晶格. 上述六种类三角晶格光子晶体相应的晶格常数分别为 $(\sqrt{3}+1)a$ 、 $7\sqrt{3}a$ 、 $(2\sqrt{2+\sqrt{3}}\cos(\pi/12))a$ 、 $(2\sqrt{2+\sqrt{3}}\cos(\pi/12)+1)a$ 、 $2a$ 和 $\sqrt{3}a$, 它们的填充率最大值分别为 72.9%、77.8%、39.1%、48.6%、68.02%、60.46%. 由晶格分析可知, 阿基米德晶格中的 $(3^3.4^2)$ 晶格排列分布是长方点阵分布^[19].

2 数值计算结果与分析

结构因子是求解光子晶体能带结构的关键因素, 根据其定义和傅里叶平移原理, 可推导 10 种类型晶格的结构因子^[25-26]. 用平面波展开法数值计算这些类型晶格硅/空气光子晶体的能带结构, 如图 2 和图 4. 归一化频率为 $\omega a/2\pi c$, c 为真空中的光速.

2.1 类正方晶格硅/空气光子晶体

图 2 给出了归一化半径 $r/a=0.2$ 的类正方晶格光子晶体能带结构, 阴影区域表示 TM 模带隙. 从图中可看出, 对于光波(或电磁波)的 TM 模沿着光子晶体的两个高对称方向(即第一布里渊区的 ΓX 和 ΓM 方向)传播, 在归一化频率约为 0.35, $(3^2.4.3.4)$ 晶格、 (4.8^2) 晶格、 (4^4) 晶格光子晶体的带隙相对变化分别低于 0.24%、13.2% 和 10.3%. 由此可看出单胞含 4 个“原子”的 $(3^2.4.3.4)$ 晶格容易得到各向同性带隙, 表明其具有高阶局部对称性和类准晶性质, 带隙频率范围与波传播方向无关, 仅依赖相邻“原子”—散射体距离^[17,21]. 由图 2 可知, $(3^2.4.3.4)$ 晶格相比其它两种晶格容易打开较宽低频带隙.

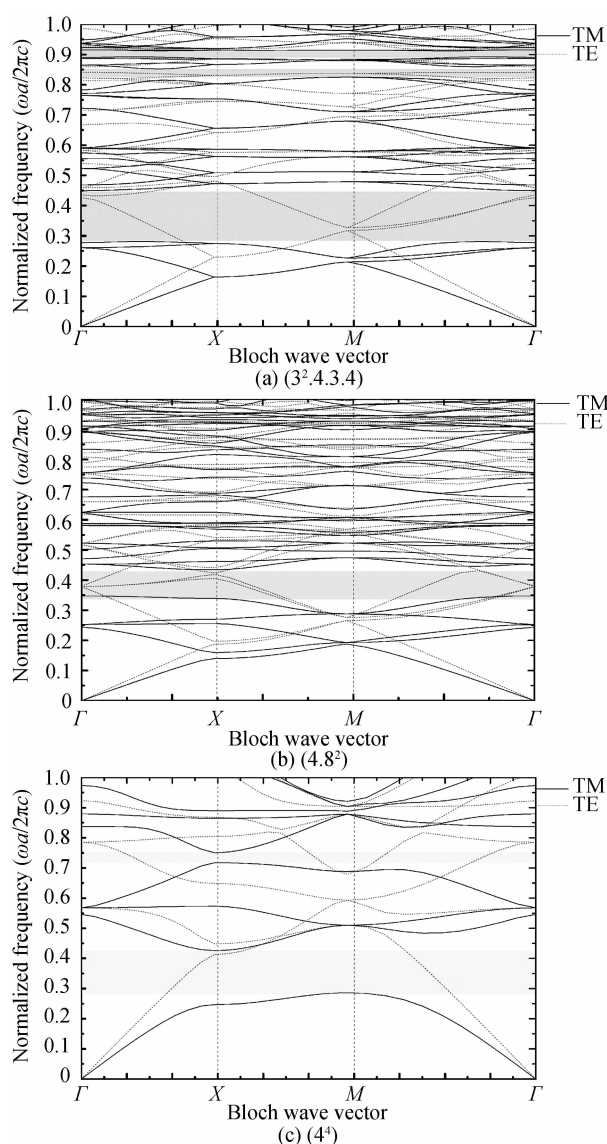


图 2 类正方晶格硅/空气光子晶体的能带结构
Fig. 2 Band structures of Si-air photonic crystals with square-like lattices

图 3 为类正方晶格硅/空气光子晶体的归一化频率和归一化半径的关系曲线, 其中阴影区域表示 TM 模和 TE 模带隙频率范围. 由图可知, 随着归一化半径的增大, TM 模和 TE 模带隙都向低频方向移动, 而这三种类晶格容易得到 TM 模带隙. 对于 $(3^2.4.3.4)$ 晶格较小的归一化半径值(或低填充率)存在 TM 模较宽第 1 带隙, 而其余的 TM 模带隙相对较窄, 该晶格也能够获得窄带宽的 TE 模带隙. 对于 (4.8^2) 晶格, 可以形成 9 个窄带宽的 TM 模带隙, 但其具有较宽 TE 模带隙. 对于 (4^4) 晶格, TM 模第 1 和第 2 带隙带隙小于 $(3^2.4.3.4)$ 晶格相应的带隙, 并大于 (4.8^2) 晶格的带隙, 但该晶格 TE 模带隙很窄. 从图 3 明显观察到 $(3^2.4.3.4)$ 晶格比 (4^4) 晶格能够产生较宽的 TM 模带隙, (4.8^2) 晶格有多个较窄的 TM 带隙; 在归一化半径 $0.26 < r/a < 0.44$ 范围, $(3^2.4.3.4)$ 晶格和 (4.8^2) 晶格可以同时产生 TE 模和 TM 模带隙, 进而形成完全带隙, 而 (4^4) 晶

格几乎不存在完全带隙. 由此表明, 单胞含 4 个“原子”类正方晶格容易得到完全带隙.

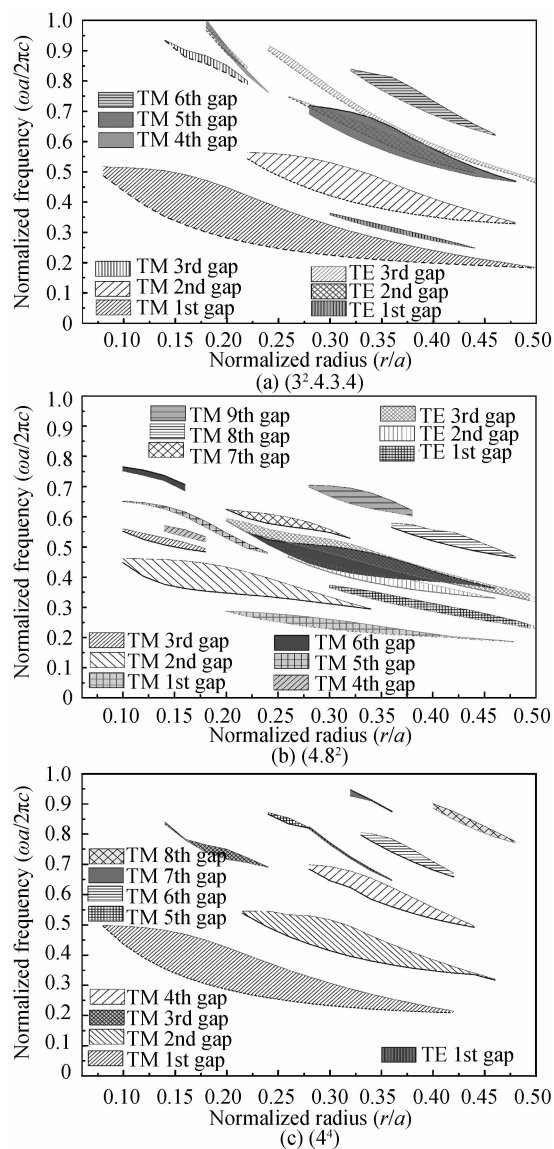
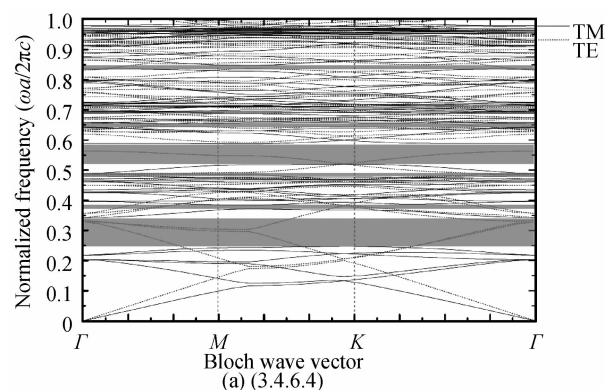


图 3 硅/空气光子晶体归一化带隙和归一化半径的关系曲线
Fig. 3 Normalized gap width versus the normalized radius for Si-air photonic crystals

2.2 类三角晶格硅/空气光子晶体

半径为 $r/a=0.26$ 时, 类三角晶格硅/空气光子晶

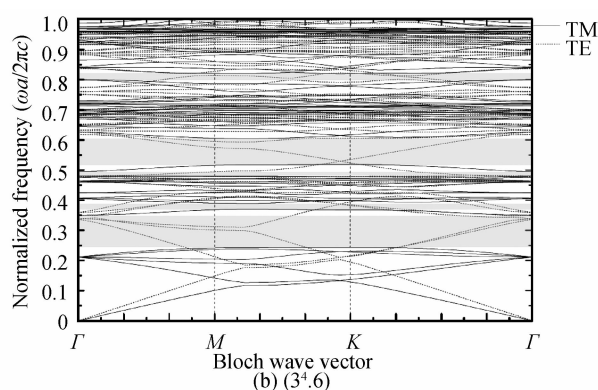


体能带结构如图 4, 阴影区域为 TM 模带隙. 由图可知, 当 TM 模态光波沿着光子晶体的两个高对称方向 (即第一布里渊区的 ΓM 和 ΓK 方向) 传播, 归一化频率约为 0.3, (3.4.6.4) 晶格、(3⁴.6) 晶格、(3.12.12) 晶格、(4.6.12) 晶格和 (3.6.3.6) 晶格光子晶体的带隙相对变化分别低于 3.65%、0.37%、0、6.61% 和 0.25%. 这表明单胞含 6 个、12 个和 3 个“原子”的类三角晶格光子晶体容易形成各向同性带隙, 这些带隙能够减弱光波传播的敏感性, 且其带宽仅仅与相邻“原子”一散射体距离相关^[17,21]. 而熟悉的 (3⁶) 晶格和 (3⁶) 晶格很难具有这种带隙性质. 从图 4(e) 看出, (3.6.3.6) 晶格、(4.6.12) 晶格分别在归一化频率 0.2334 和 0.2564 打开第 1 带隙的下边界, 其余 5 种晶格在归一化频率 0.24 附近形成第 1 带隙的下边界. 进一步分析, 类三角晶格硅/空气光子晶体打开低频带隙下边界值比较接近. 观察图 4 可发现, 除了熟悉的 (3⁶) 晶格外, 类三角晶格中的 (3⁴.6) 晶格和 (3.6.3.6) 晶格硅/空气光子晶体可得到较宽低频带隙.

为了分析类三角晶格硅/空气光子晶体带隙性质, 归一化频率 $\omega a/2\pi c$ 和归一化半径 r/a 的曲线如图 5 所示, 图中阴影区域表示 TM 模和 TE 模的带隙频率范围. 观察图中带隙曲线的变化可发现, 随着归一化半径增加, 类三角晶格硅/空气光子晶体 TM 模和 TE 模带隙都向低频方向移动, 但容易获得 TM 模较宽带隙.

在图 5(a) 和 (b) 中, (3.4.6.4) 晶格、(3⁴.6) 晶格硅/空气光子晶体 TM 模带隙的数量、频率范围和归一化半径关系变化趋势相似, 而它们不方便形成 TE 模和 TM 模的完全带隙.

从图 5(c) 和 (d) 看出, (3.12.12) 晶格硅/空气光子晶体存在 5 个 TM 模很窄带隙, (4.6.12) 晶格硅/空气光子晶体有 11 个 TM 模较窄带隙, 这表明单胞含有 12 个“原子”的晶格可打开更多带隙. 由于 (3.12.12) 晶格和 (4.6.12) 晶格硅/空气光子晶体具有低填充率, 它们分别在归一化半径 $0.24 < r/a < 0.44$ 和 $0.28 < r/a < 0.44$ 范围内同时产生 TE 模和 TM 模的完全带隙.



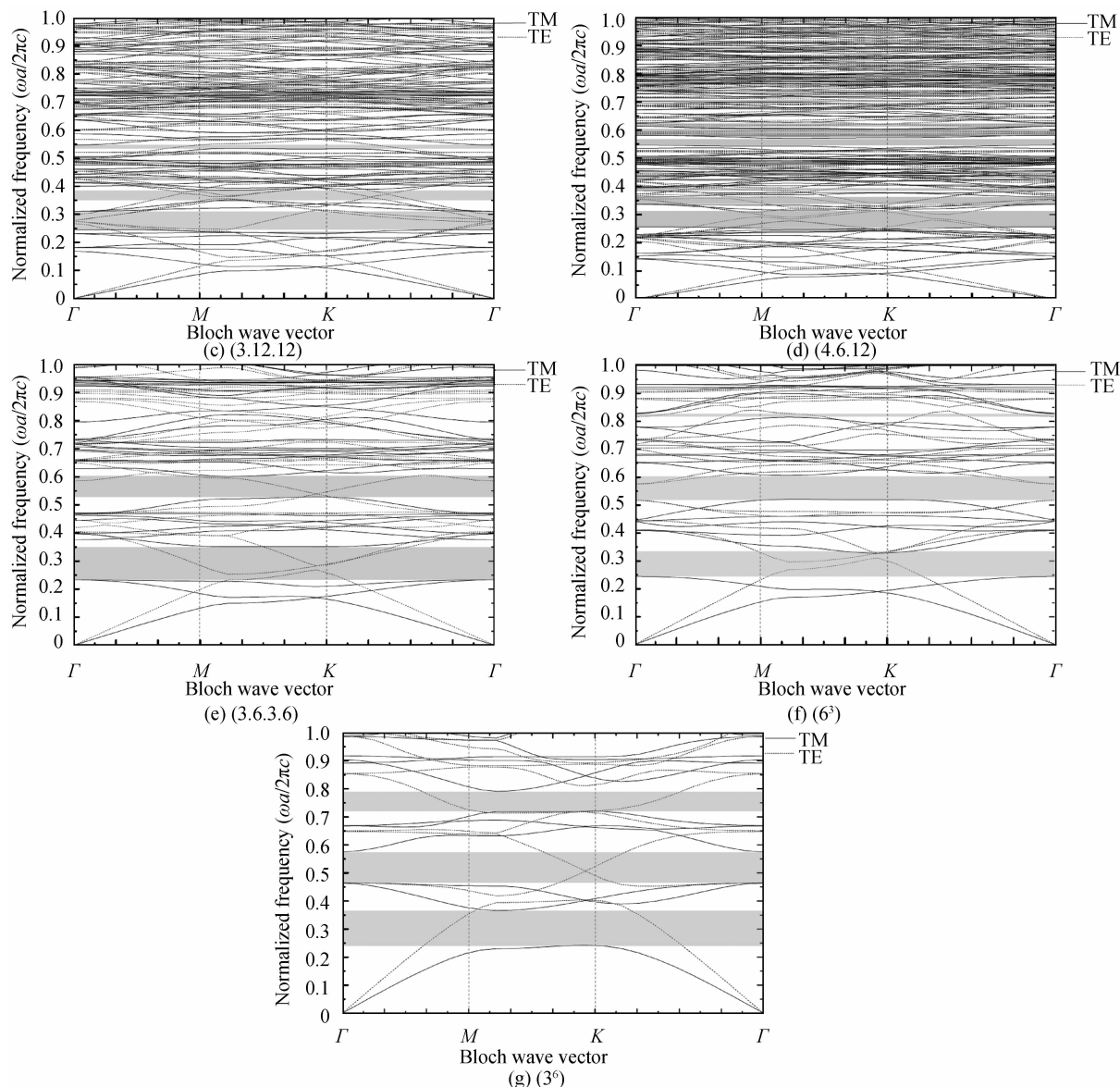


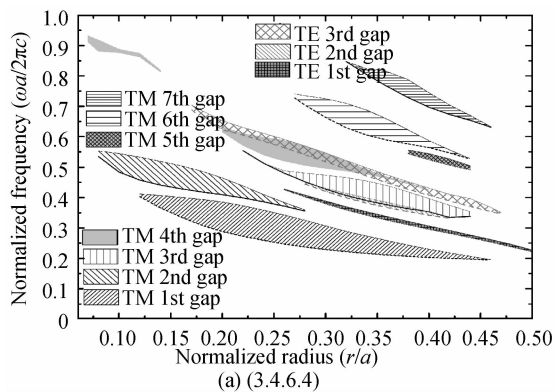
图4 类三角晶格硅/空气光子晶体的能带结构

Fig. 4 Band structures of Si-air photonic crystals

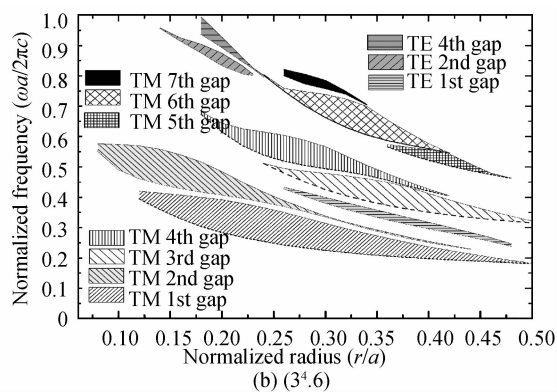
观察图 5(e)和(f)可知, (6^3) 晶格比 $(3, 6, 3, 6)$ 晶格容易得到较多 TM 模带隙, 且带隙相对较窄, 而 $(3, 6, 3, 6)$ 存在较宽带隙. 图 5(f)明显表明, (6^3) 晶格在归一化半径 $0.19 < r/a < 0.44$ 内产生 TE 模和 TM

模的较宽完全带隙.

高填充率的 (3^6) 晶格可形成较宽 TM 模带隙和较窄 TE 模带隙, 但该晶格硅/空气光子晶体不易产生两个偏振 TE 和 TM 模态的完全带隙, 如图 5(g).



(a) $(3,4,6,4)$



(b) $(3^4,6)$

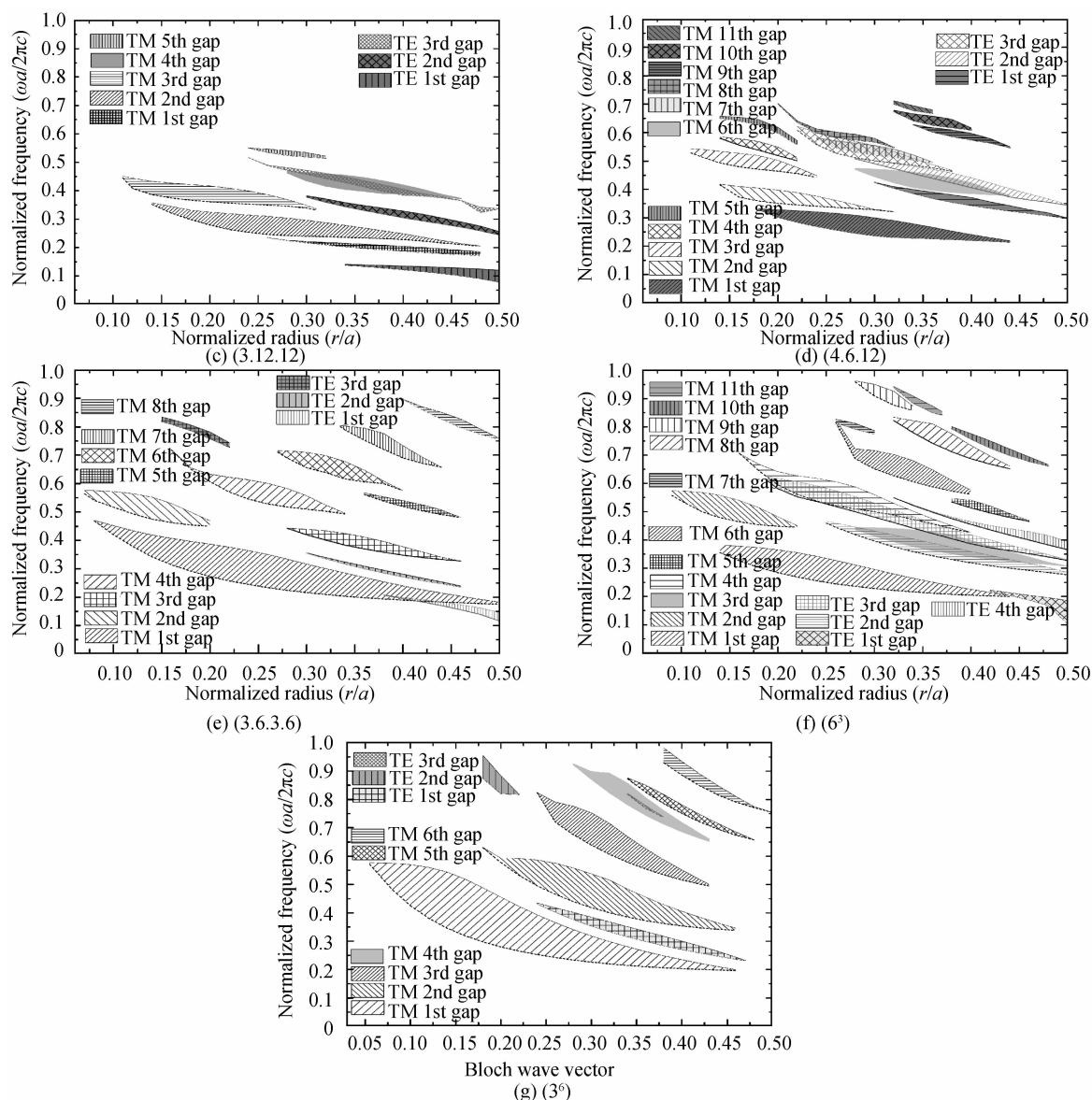


图5 硅/空气光子晶体归一化带隙和归一化半径的关系曲线

Fig. 5 Normalized gap width versus the normalized radius for Si-air photonic crystals

2.3 两种类型复式晶格光子晶体带隙的比较

利用归一化半径 r/a 和带隙相对宽度 $\Delta\omega/\omega_g$ 关系曲线^[8,22]能够很好地表征光子晶体带隙的性质,其中 $\Delta\omega$ 、 ω_g 分别为带隙的带宽和中心频率.在图6(a)中,对较低频 TM 模带隙进行分析,随着归一化半径增大, $(3^2.4.3.4)$ 晶格第 1 带隙、 (4.8^2) 晶格第 2 带隙和 (4^4) 晶格第 1 带隙相对带宽先增大后减小.当 $r/a=0.2$ 时, $(3^2.4.3.4)$ 晶格和 (4^4) 晶格的带隙相对宽度取得最大值;当 $r/a=0.18$ 时, (4.8^2) 晶格的带隙相对宽度达到最大值.由此可见,单胞分别含 1 个“原子”的 (4^4) 晶格和含 4 个“原子”的类正方晶格,它们在归一化半径 $r/a=0.2$ 附近,带隙相对宽度可以得到最大值,而 $(3^2.4.3.4)$ 晶格比其它两种晶格容易获得较宽的带隙.

考虑带隙相对宽度 $\Delta\omega/\omega_g$ 能够反映带隙特性,对

类三角晶格硅/空气光子晶体的 TM 模带隙进行深入讨论.从图6(b)中可看出,类三角晶格带隙相对带宽先增大后减小.当归一化半径为 $r/a=0.26$ 时, $(3.4.6.4)$ 晶格、 $(3^4.6)$ 晶格、 $(3.6.3.6)$ 晶格的第 1 带隙和 $(3.12.12)$ 晶格的第 2 带隙相对宽度取得最大值; (6^3) 晶格、 (3^6) 晶格第 1 带隙相对宽度分别在归一化半径为 0.24 和 0.18 时得到最大值; $(4.6.12)$ 晶格的第 1 带隙相对宽度在归一化半径为 0.3 时取得最大值.观察图6(b)可发现,在 $r/a=0.26$ 附近,单胞含 6 个“原子”、3 个“原子”和 2 个“原子”的类三角晶格硅/空气光子晶体带隙相对宽度达到最大值,也就是说容易得到较宽带隙,并且 $(3.6.3.6)$ 晶格、 $(3^4.6)$ 晶格、 $(3.4.6.4)$ 晶格、 (6^3) 晶格和 $(3.12.12)$ 晶格带隙相对宽度值依次减小,这表明带隙带宽逐渐变窄.当 $r/a=0.26$ 时, $(3.6.3.6)$ 晶格和 (3^6) 晶格硅/空气光子晶体

带隙相对宽度值近似相等,这表明它们能得到几乎相同带隙频率范围如图 6 (b),并且可用低填充率(3.6.3.6)晶格代替高填充率(3^6)晶格,有利于优化设计轻质化光子晶体光波器件。

图 6 给出了类三角和类正方晶格硅/空气光子晶体 TM 模低频带隙相对宽度和归一化半径曲线。当归一化半径为 0.26 和 0.2 时,这两种类型光子晶体的带隙能够达到较大的值。从图中明显看出,($3^2.4.3.4$)晶格、($3.6.3.6$)晶格、(4^4)晶格、(34.6)晶格和($3.4.6.4$)晶格的带隙相对宽度值减小,它们的带隙逐渐变窄。这说明不同晶格类型的光子晶体可得到不同带宽的带隙,进一步丰富调控光波传播的方法。

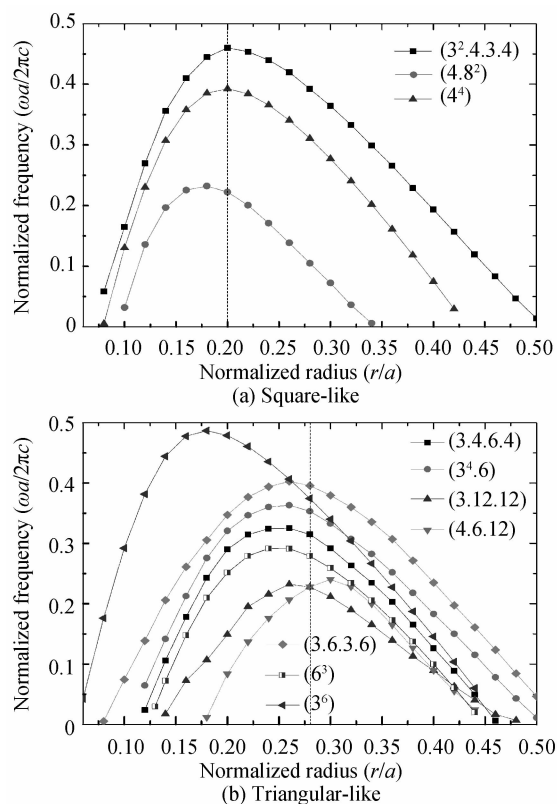


图 6 低频带隙相对宽度和归一化半径的对比曲线

Fig. 6 Relative widths of the normalized band gaps of photonic crystals in lower frequency ranges versus normalized radius

2.4 典型复式晶格光子晶体带隙性质分析

依据归一化半径对不同类型硅/空气光子晶体的影响,设计 TE 模和 TM 模重叠的完全带隙具有重要的应用价值。因此,通过构造简单散射体单元产生光子晶体的完全带隙。把内径 r_1 和外径 r_2 的空气环按周期结构嵌入硅基体中,组成空气环/硅光子晶体。其几何参数为:内径 $r_1=0.05a$,外径 $r_2=0.48a$, a 为相邻空气环的中心距离。利用平面波展开法数值计算了($3^2.4.3.4$)和(4^4)晶格空气环/硅光子晶体能带结构,如图 7。从图中可看出,对于相同的归一化半径值,含多“原子”的($3^2.4.3.4$)晶格存在较宽的完全带隙,但

(4^4)晶格没出现带隙,这也表明复式晶格方便产生完全带隙。

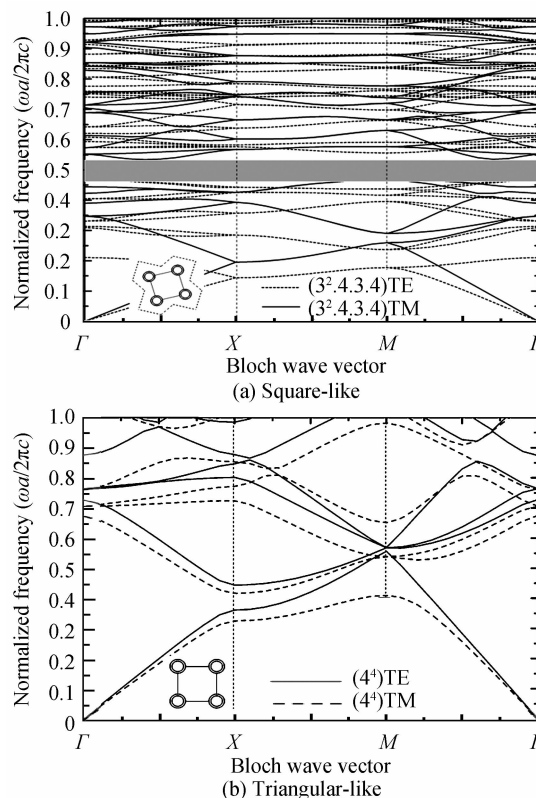


图 7 空气环/硅光子晶体的能带结构

Fig. 7 Band structures of air ring-Si photonic crystals

由于空气环/硅光子晶体同时具有介质柱型和空气孔型光子晶体的特点,介质柱型光子晶体有利于产生 TM 模带隙,而空气孔型光子晶体有利于产生 TE 模带隙。所以,通过调节空气环的内径和外径,可获得完全带隙^[16]。采用空气环/硅光子晶体归一化半径的值,利用平面波展开法数值分析了($3.6.3.6$)晶和(6^3)晶格能带结构,如图 8。从图中可知,($3.6.3.6$)晶格光子晶体存在完全带隙,(6^3)晶格没有完全带隙,但其带隙带宽小于相应($3^2.4.3.4$)晶格光子晶体。虽然它们的归一化半径相同,但是其晶体填充率不同,这是引起带隙差异的因素。

对于单胞含多个“原子”的 10 种类型二维阿基米德晶格光子晶体,若单胞引入多个“原子”组成复式晶格,可以晶体结构的对称性,提高能带的简并态,能够打开完全带隙。由于单胞中“原子”的数量和不同的几何形式,导致晶体的填充率存在差异,进而影响带隙的位置和带宽,但是介质柱型光子晶体在相同归一化半径值的附近,可以获得 TM 模带隙的最大值。与单胞含 1 个“原子”具有高对称性的(3^6)晶格和(4^4)晶格相比较,含多个“原子”的复式晶格容易打开较宽的低频带隙,数值计算结果也证实这一特性。另外,对于空气环/硅复式晶格光子晶体,能够打开较宽的完全带隙。

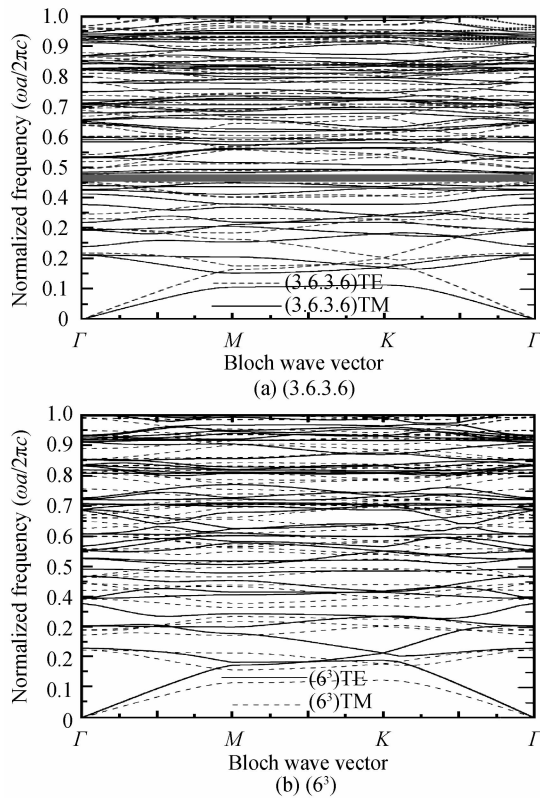


图8 空气环/硅光子晶体的能带结构

Fig. 8 Band structures of air ring-Si photonic crystals

3 结论

基于晶格效应,利用平面波展开法研究了类正方晶格和类三角晶格硅/空气光子晶体的带隙性质,可得

1) 对于类正方晶格硅/空气光子晶体, $(3^2, 4, 3, 4)$ 晶格比 $(4, 8^2)$ 晶格和 (4^4) 晶格更容易得到光子晶体的 TM 模各向同性带隙,该晶格也能够打开较宽低频 TM 模带隙,而 $(3^2, 4, 3, 4)$ 晶格和 $(4, 8^2)$ 晶格可产生 TE 模和 TM 模的较宽完全带隙。

2) 对于类正方晶格硅/空气光子晶体的 TM 模带隙,随着归一化半径增大,其低频带隙的相对带宽先增大后减小,在 $r/a=0.2$ 附近,带隙相对宽度可产生最大值, $(3^2, 4, 3, 4)$ 晶格比其它两种晶格容易获得较宽带隙。

3) 对于类三角晶格硅/空气光子晶体,单胞含 6 个、12 个和 3 个“原子”的类三角晶格光子晶体容易形成各向同性 TM 模带隙, $(3, 6, 3, 6)$ 晶格能够得到低频较宽 TM 模带隙,与 $(3^4, 6)$ 晶格光子晶体的低频 TM 模带隙变化趋势相似; $(3, 12, 12)$ 晶格、 $(4, 6, 12)$ 晶格和 (6^3) 晶格硅/空气光子晶体容易形成 TE 模和 TM 模完全带隙;高填充率的 (3^5) 晶格可形成较宽 TM 模带隙。

4) 对于类三角晶格硅/空气光子晶体的低频 TM 模带隙,随着归一化半径增大,它的相对带宽先增大后

减小;在归一化半径为 $r/a=0.26$ 附近,含多个“原子”的光子晶体容易获得带隙相对宽带的最大值,并且 $(3, 6, 3, 6)$ 晶格可以打开较宽的带隙频率范围。

5) 单胞含多“原子”复式晶格空气环/硅光子晶体有利于产生完全带隙。

针对 10 种类型阿基米德晶格硅/空气光子晶体的带隙及其点阵形式的研究和分析为调控光波的传播器件提供了一种技术途径,可用于设计新型光开关、滤波器和波分复用器等,具有广阔的工程应用前景。

参考文献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Physical Review Letter*, 1987, **58**(20):2059-2062.
- [2] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. *Physical Review Letter*, 1987, **58**(23):2486-2489.
- [3] NODAS, CHUTINAN A, IMADA M. Trapping and emission of photons by a single defect in a photonic bandgap structure [J]. *Nature*, 2000, **407**:608-610.
- [4] TOKUSHIMA M, KOSAKA H, TOMITA A, *et al.* Lightwave propagation through a 120° sharply bent single-line-defect photonic crystal waveguide[J]. *Applied Physics Letters*, 2000, **76**(8):952-954.
- [5] TANG Fa-ling, LIU Gui-qiang, LI Lei, *et al.* Three Channels Wavelength Division Multiplexing of Two-dimensional Triangular Lattice Photonic Crystals [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(12):1470-1473.
唐发林, 刘桂强, 黎磊, 等. 二维三角晶格光子晶体三通道解分光复用器[J]. *光子学报*, 2012, **41**(12):1470-1473.
- [6] LUC, HU X, ZHANG Y, *et al.* Ultralow power all-optical diode in photonic crystal heterostructures with broken spatial inversion symmetry [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **99**(5):051107.
- [7] HSUC W, ZHEN B, LEE J, *et al.* Observation of trapped light within the radiation continuum [J]. *Nature*, 2013, **499**:188-191.
- [8] ZHOU X Z, WANG Y S, ZHANG C Z. Effect of material parameters on elastic band gaps of two-dimensional solid phononic crystals[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, **106**(1):014903.
- [9] GARCIA-ADEVA A J. Band gap atlas for photonic crystals having the symmetry of the kagomé and pyrochlore lattices[J]. *New Journal of Physics*, 2006, **8**:86.
- [10] YANG Y, POO Y, WU R X, *et al.* Experimental demonstration of one-way slow wave in waveguide involving gyromagnetic photonic crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **102**(23):231113.
- [11] 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.
- [12] JOVANOVIĆ D, GAJIC R, HINGERL K. Refraction and band isotropy in 2D square-like Archimedean photonic crystal lattices [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(6):4048-4058.
- [13] WANG R, 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.
- [14] 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. 基于太极形介质柱六角光子晶体禁带特性研究[J]. 物理学报, 2013, **62**(8):084213.
- [15] SHENG J J, HE X D, LIU R B, *et al.* Effects of symmetry breaking of scatterers on photonic band gap in hexangular-lattice photonic crystal [J]. *Optics Communications*, 2013, **303**(15):8-12.
- [16] 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**(8):084213.
- [17] ANDERSON C M, GIAPIS K P. Larger two-dimensional photonic band gaps [J]. *Physical Review Letter*, 1996, **77**(14):2949-2952.
- [18] GAJIC R, MEISELS R, KUCHAR F, *et al.* All-angle left-handed negative refraction in kagomé and honeycomb lattice photonic crystals[J]. *Physical Review B*, 2006, **73**(16):165310.
- [19] MIKHAEL J, ROTH J, HELDEN L, *et al.* Archimedean-like tiling on decagonal quasicrystalline Surfaces [J]. *Nature*, 2008, **454**:501-504.
- [20] DAVID S, CHELNOKOV A, LOURTIOZ J M. Wide angularly isotropic photonic bandgaps obtained from two-dimensional photonic crystals with Archimedean-like tilings [J]. *Optics Letters*, 2000, **25**(14):1001-1003.
- [21] HAN Chang-sheng, YANG Yi-biao, WANG Yun-cai, *et al.* Bandgap characteristics of two-dimensional archimedes (4.8^2) compound lattice photonic crystals with dielectric rods [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(6):0616003.
韩昌盛,杨毅彪,王云才,等. 二维介质柱型 Archimedes (4.8^2) 复式晶格光子晶体禁带特性研究[J]. 光子学报, 2014, **43**(6):0616003.
- [22] ZHONG Qi, HAN Kui, SHENG Xiao-peng, *et al.* Polarization-indepent self-collimation bends and beam splitters in $3^2, 4, 3, 4$ Archimedean photonic crystals [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(10):7060-7065.
钟琪,韩奎,沈晓鹏,等. Archimedes $3^2, 4, 3, 4$ 结构光子晶体中与偏振无关的自准直分束器[J]. 物理学报, 2010, **59**(10):7060-7065.
- [23] UEDA K, DOTERA T, GEMMA T. Photonic band structure calculations of two-dimensional Archimedean tiling patterns [J]. *Physical Review B*, 2007, **75**(19):195122.
- [24] YABLONOVITCH E, GMITTER T J, LEUNG K M. Photonic band structure: the face-centered-cubic case employing nonspherical atoms[J]. *Physical Review Letter*, 1991, **67**(17):2295-2298.
- [25] ZHAO Huan-yu, LUO Yan-hong, CHEN A-li. Properties of acoustic band structure of phononic crystal with square-like Archimedean lattices [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2012, **41**(1):243-247.
赵寰宇,骆岩红,陈阿丽. 类正方阿基米德格子声子晶体的声学能带结构特性[J]. 人工晶体学报, 2012, **41**(1):243-247.
- [26] 赵寰宇. 二维阿基米德格子声子晶体特性研究[D]. 北京:北京工业大学, 2011.