

介质环型三重晶格光子晶体的带隙

刘紫雁, 唐吉玉, 刘娟, 陈彦, 董贵仁, 何右青

华南师范大学物理与电信工程学院, 广东 广州 510006

摘要 提出一种介质环型三重晶格光子晶体结构,并研究了其完全带隙。利用 Rsoft 软件研究了各参数对完全带隙的影响规律,进而优化了介质环型结构。结果表明,随着介质环介电常数的增大,光子晶体完全带隙先增大后减小;随着介质环内径和外径的比值增大,完全带隙先增大后减小。当介质环的介电常数为 14.71,内径和外径的比值为 0.42 时,获得的最大完全带隙为 0.168。

关键词 材料; 三重晶格光子晶体; 平面波展开法; 完全带隙; 介质环型

中图分类号 O734 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.111603

Band Gap of Triple Lattice Photonic Crystals with Dielectric Ring Shape

Liu Ziyan, Tang Jiyu, Liu Juan, Chen Yan, Dong Guiren, He Youqing

*School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University,
Guangzhou, Guangdong 510006, China*

Abstract One triple lattice photonic crystal with a dielectric ring shape is proposed and its complete band gap is studied. By using the Rsoft software, the influence rules of each parameter on the complete band gap are studied. On this basis, the dielectric ring shaped structure is optimized. The results show that, with the increase of the dielectric constant of the dielectric ring, the complete band gap of the photonic crystal first increases and then decreases. With the increase of the ratio of inner diameter to outer diameter of the dielectric ring, the complete band gap first increases and then decreases. When the dielectric constant of the dielectric ring is 14.71 and the ratio of inner diameter to outer diameter is 0.42, the maximum complete band gap reaches 0.168.

Key words materials; triple lattice photonic crystal; plane wave expansion method; complete band gap; dielectric ring shape

OCIS codes 160.5298; 160.5293; 160.4670

1 引言

单式晶格结构光子晶体由单个简单晶格组成,二重晶格光子晶体是两种形状散射体相互嵌套而成,三重晶格光子晶体是三种形状散射体相互嵌套而成^[1]。与二重晶格光子晶体结构相比,三重晶格光子晶体结构具有较差的对称性。文献[2]表明,散射体形状对称性越差,耦合度越低,能带简并态就越少,带隙条数就越多,越容易产生完全带隙^[3]。本文研究了最基础的三角形、圆形、正方形三重晶格光子晶体^[4]。

为降低光子晶体结构对称性,可以使用各向异性介质材料代替各向同性介质材料,或采用复合结构等。本文在不增加介质柱形状复杂度的基础上,采用介质环型结构,降低了对称性,进而容易获得较宽的完全带隙。

本文利用 Rsoft 模拟软件,系统研究了介质环型三重晶格光子晶体的完全带隙随结构参数的变化规律,对该三重晶格光子晶体结构进行了优化,提出了一种获得较宽完全带隙的方法。

收稿日期: 2017-04-13; **收到修改稿日期:** 2017-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(61271127)

作者简介: 刘紫雁(1993—),女,硕士研究生,主要从事光子晶体性质方面的研究。E-mail: 2696705221@qq.com

导师简介: 唐吉玉(1965—),女,副教授,硕士生导师,主要从事固体的性质计算与模拟方面的研究。

E-mail: 195866901@qq.com(通信联系人)

2 基本原理

利用传统平面波展开法计算光子晶体中的光传播。相比其他能带结构计算方法,平面波展开法具有使用领域广泛、算法简单等优点。运用麦克斯韦方程组进行求解,得到电磁波电场强度 $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ 、磁场强度 $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ 应满足的方程为

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

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

式中 \mathbf{r} 为圆柱坐标系中的位置矢量; $c = (\epsilon_0 \mu_0)^{-1/2}$ 为真空中的光速, ϵ_0 为真空介电常数, μ_0 为真空磁导率; ω 为电磁波频率; $\epsilon(\mathbf{r})$ 为介质的介电常数。再代入(1)、(2)式,得到

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = - \left[\frac{ic}{\omega \epsilon(\mathbf{r})} \right] \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}). \quad (3)$$

将(3)式展开为一系列的平面波,将(1)式转换为一系列线性方程组,再通过计算机求解,得到与波矢相关的允许频率模式^[2]。

3 模拟计算与分析

3.1 介质柱型三重晶格光子晶体的模拟计算与分析

利用 Rsoft 软件进行模拟,采用在空气背景中填充 Ge 柱的介质柱结构,设计的光子晶体结构如图 1(a) 所示^[5],空气的介电常数为 1.00,半导体材料 Ge 的介电常数 ϵ 为 16.03,光子晶体的晶格常数设为 $1.00 \mu\text{m}$,填充比(体积分数)设为 0.18。通过模拟计算,该结构的带隙如图 1(b) 所示,可以看出,横电(TE)带隙有 4 条,最大带隙为 0.146,对应带隙中心频率为 0.285 Hz;横磁(TM)带隙只有 3 条,最大带隙为 0.725,对应带隙中心频率为 0.518 Hz。当 TE 带隙和 TM 带隙重合时,会产生完全带隙,其最大完全带隙为 0.092,对应的完全带隙中心频率为 0.492 Hz。

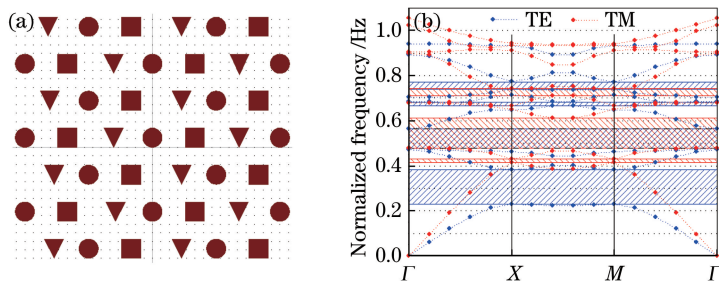


图 1 介质柱型三重晶格光子晶体的(a)结构及(b)其带隙示意图

Fig. 1 (a) Structure and (b) band gap diagram of triple lattice photonic crystal with dielectric column shape

3.2 介质环型三重晶格光子晶体的模拟计算与分析

为进一步降低散射体对称性,设计了一种由介质环型和空气孔型两种光子晶体周期性镶嵌而成的新结构,如图 2(a) 所示。其中介质环型结构可降低结构的对称性,且易于形成 TM 模式带隙;空气孔型易于形成 TE 模式带隙。图 2 (b) 所示为介质环型结构三重晶格光子晶体散射体的几何结构。内置孔和背景材料均为空气,介质环材料为 Ge,介质环内半径 r 与外半径 R 的比值为 0.50,晶格常数以及其他条件保持不变。

如图 2(c) 所示,TE 带隙有 4 条,最大带隙为 0.163,对应带隙中心频率为 0.549 Hz;TM 带隙只有 4 条,最大完全带隙为 0.179,对应带隙中心频率为 0.561 Hz。可以看出,带隙发生重合,因而产生完全带隙,最大完全带隙为 0.159,相对应中心频率为 0.551 Hz。

对比图 2(b) 和图 1(b) 模拟计算结果可得,介质环型结构比介质柱型结构三重晶格光子晶体具有更宽的完全带隙,最大带隙增加了 72.826%。

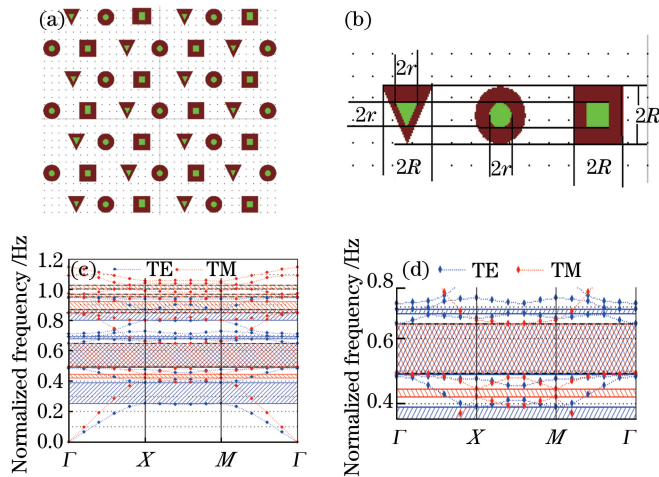


图2 介质环型三重晶格光子晶体的(a)结构图、(b)散射体结构、(c)带隙以及(d)完全带隙

Fig. 2 (a) Structural diagram, (b) scatterer structure, (c) band gap, and (d) complete band gap of triple lattice photonic crystal with dielectric ring shape

3.3 介质环型三重晶格光子晶体的优化

相比普通介质柱结构,介质环型三重晶格光子晶体的完全带隙、带隙中心频率以及最大带隙主要由介电常数 ϵ ^[6] 和 r/R 决定。因此,需要研究这两个参数对介质环型三重晶格光子晶体完全带隙的影响,进一步选取最优值,进而优化结构。

采用控制变量策略^[7],分别研究 ϵ 和 r/R 对完全带隙的影响。首先控制 r/R 不变,设置 ϵ 的变化范围为 $0 \sim 30.00$, ϵ 对最大完全带隙的影响如图 3(a)所示^[8],其中蓝色表示 TE 模式带隙,红色表示 TM 模式带隙,绿色表示完全带隙。从图 3(b)可以看出,随着 ϵ 的增加,完全带隙先增大,达到峰值后减小。峰值出现在 ϵ 为 14.71 处,此时完全带隙达到最大值 0.162,对应带隙中心频率为 0.571 Hz。

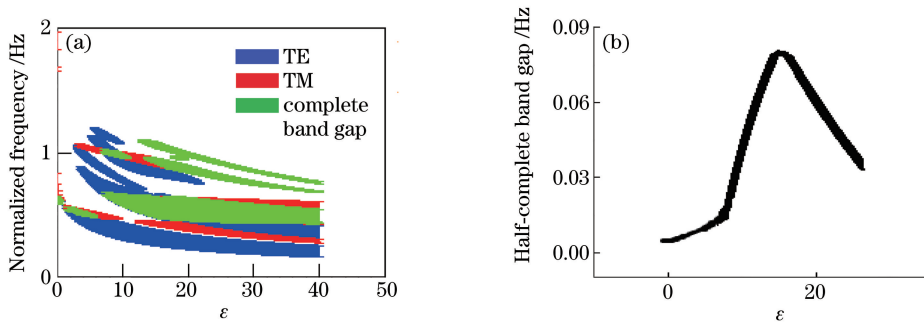


图3 (a)带隙和(b)完全带隙随 ϵ 的变化

Fig. 3 (a) Band gap and (b) complete band gap versus ϵ

ϵ 固定为 14.71,模拟计算 r/R 对最大完全带隙的影响,结果如图 4 所示^[9]。可以看到,随着 r/R 的增加,完全带隙先增大,达到最大值后逐渐减小。当 r/R 为 0.42 时,完全带隙达到最大值 0.168,对应完全带隙中心频率为 0.600 Hz。

通过上面的计算,得到最佳参数:内置介质柱材料介电常数 ϵ 为 14.71, r/R 为 0.42。最佳参数下的 TE/TM 模式结构和完全带隙图如图 5 所示,最大完全带隙为 0.168。

4 结 论

提出了一种增加完全带隙的方法,即将介质柱型三重光子晶体结构改为介质环型三重光子晶体结构。将两者的完全带隙进行对比,发现介质环型结构能够获得更优异的完全带隙。

进一步对介质环型结构进行优化,利用 Rsoft 软件模拟研究了各参数对介质环型结构完全带隙的影响

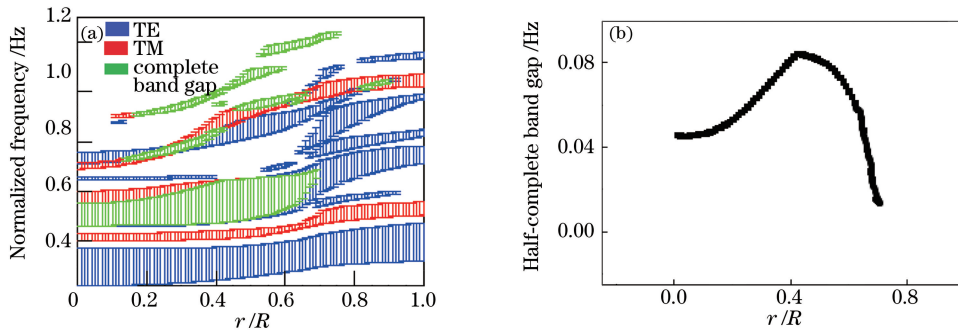
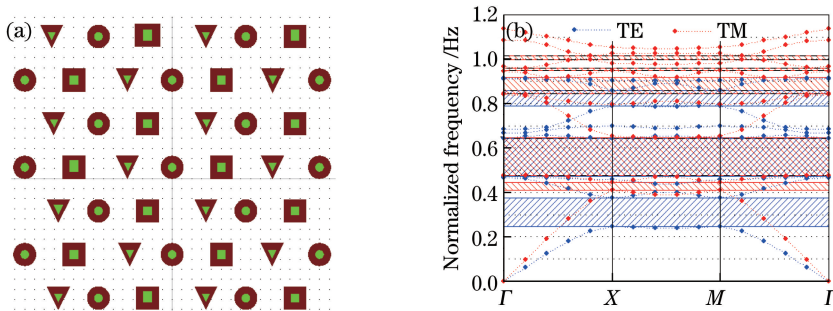
图4 (a)带隙和(b)完全带隙随 r/R 的变化Fig. 4 (a) Band gap and (b) complete band gap versus r/R 

图5 优化后的介质环型三重晶格光子晶体的(a)结构及(b)其带隙示意图

Fig. 5 (a) Structure and (b) band gap diagram of optimized triple lattice photonic crystal with dielectric ring shape

规律。结果表明,介质环型三重晶格光子晶体完全带隙随着介质环材料介电常数的增大,先增大后减小。同时,随着介质环的内径和外径比值 r/R 的增大,完全带隙先增大后减小。当介质环材料的介电常数为 14.71、介质环内径和外径比值为 0.42 时,获得最大完全带隙为 0.168。该结构与介质柱型结构相比,完全带隙变化幅度较大,该研究结果为设计一种拥有更宽完全带隙的三重晶格光子晶体结构提供了参考。

参 考 文 献

- [1] Sun Hui, Chen Heming. Study on characteristics of defect modes of square point defect based on triple lattice photonic crystal[J]. Computer Technology and Development, 2015, 25(2): 181-184.
孙会, 陈鹤鸣. 三重晶格光子晶体方形点缺陷缺陷模式特性研究[J]. 计算机技术与发展学报, 2015, 25(2): 181-184.
- [2] Yin Jianling, Huang Xuguang, Liu Songhao, *et al.* Effect of the structure shape on the 8-fold photonic quasicrystals [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(2): 567-571.
殷建玲, 黄旭光, 刘颂豪, 等. 介质柱形状对准晶光子晶体带隙特性的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(2): 567-571.
- [3] 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.
- [4] Li X J, Yang Y B, Han P D, *et al.* Numerical simulation of absolute photonic band gaps for two-dimensional photonic crystals with the rotational square lattice[J]. Optoelectronics Letters, 2010, 6(5): 359-362.
- [5] Wang Jie, Zhu Na, Cheng Chao, *et al.* Properties of band gap research based on two-dimensional photonic crystal with mixed shapes of rods[J]. Optoelectronic Technology, 2011, 31(2): 121-124.
汪杰, 朱娜, 成超, 等. 混合柱形二维光子晶体禁带特性研究[J]. 光电子技术, 2011, 31(2): 121-124.
- [6] Ye Jun, Zhuang Fei. The relationship between photonic band gap and D-value of dielectric constant [J]. Journal of Hangzhou Teachers College (Natural Science Edition), 2006, 5(5): 400-402.
叶军, 庄飞. 光子晶体光子带隙与介电常数差的关系[J]. 杭州师范学院学报(自然科学版), 2006, 5(5): 400-402.
- [7] Liu Yang, Tang Jiyu, Wang xi, *et al.* Optimal design of photonic band gap in Ge-based tetragonal lattice 2D photonic

- crystal[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2014, 4(35): 491-495.
- 刘洋, 唐吉玉, 王茜, 等. Ge 基二维正方晶格光子晶体带隙优化设计[J]. 发光学报, 2014, 4(35): 491-495.
- [8] Chen Yan, Tang Jiyu, Liu Yang, *et al.* Study on absolute bandgap of two-dimensional triangular photonic crystal based on metal oxide[J]. Laser and Infrared, 2015, 45(6): 702-705.
- 陈彦, 唐吉玉, 刘洋, 等. 二维三角型金属氧化物光子晶体全带隙研究[J]. 激光与红外, 2015, 45(6): 702-705.
- [9] Han Lihong, Liu Liming, Yu Zhongyuan, *et al.* Effects of filling ratio and lattice points direction on two-dimensional triangular-lattice photonic crystal band gap characteristics[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0116003.
- 韩利红, 刘立明, 俞重远, 等. 填充比和格点方向对二维三角晶格光子晶体带隙的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0116003.