

Suzuki晶格光子晶体的光子带结构

王道斌, 侯尚林, 任国栋, 雷景丽

(兰州理工大学 物理系, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 系统地研究了 Suzuki晶格光子晶体能带结构, 包括介质中周期排列的空气孔光子晶体和空气中周期排列的介质柱光子晶体。采用平面波展开法计算了空气孔和介质柱半径及折射率对光子带隙的影响。结果发现介质中周期排列的空气孔光子晶体主要形成 TM 模光子禁带, 空气中周期排列的介质柱光子晶体主要形成 TE 模光子禁带, 只有介质折射率较大时两类光子晶体才能够形成完全带隙。介质中周期排列的空气孔光子晶体能带结构中沿 ΓX_1 和 $X_1 M$ 方向出现了群速度接近于零的色散曲线, 而在另一类光子晶体中并未出现这种情况, 在其它晶格类型的光子晶体中也未发现这种情况。

关键词: Suzuki晶格; 光子带隙; 平面波展开法; 缺陷模

中图分类号: O431.1; O734 **PACC:** 4220 文献标识码: A

1 引言

自从 E. Yablonovitch 和 S. John^[1-5] 提出光子晶体这种新颖的人工电磁材料后, 大量的研究工作集中在了这一新领域。由于介质周期性排列, 在光子晶体中形成了光子带隙, 利用光子带隙可以有效地控制光在光子晶体中的运动, 因此无论在理论方面还是在实验方面光子晶体都引起人们极大的兴趣。由于具有如此优良的光学特性, 所以光子晶体展现出了非常广阔的应用前景。利用光子晶体已经设计和研制出许多新型的光子器件, 如光子晶体波导^[6]、光子晶体激光器^[7]、光子晶体光纤^[8]、光子晶体滤波器^[9]、光子晶体光开关^[10]等, 更多新颖的器件正在研究开发当中。

光子晶体展现出的奇异性主要来源于它特殊的光子能带结构。具有什么样的光子能带结构与光子晶体的晶格类型紧密相关, 人们对具有六角晶格、四方晶格以及蜂窝状晶格的光子晶体能带结构进行了大量的计算研究。Suzuki晶格是一种建立在六角晶格基础之上的一种特殊的晶格类型, 本来是在研究声波在声子晶体中的传播情况时引入的^[11-13], 后来人们将其引入光子晶体中。本文使用平面波展开法系统地研究了具有 Suzuki

晶格的二维光子晶体带结构, 包括介质中周期排列的空气孔光子晶体和空气中周期排列的介质柱光子晶体。为了简便起见, 我们将前一种记为 I 型光子晶体, 第二种记为 II 型光子晶体。

2 计算结果

2.1 晶格结构

Suzuki晶格二维光子晶体的结构如图 1(a) 所示。

对于 I 型光子晶体, 图 1(a) 中浅色部分代表空气孔, 深色部分代表介质。对于 II 型光子晶体, 图 1(a) 中浅色部分代表介质柱, 深色部分代表空气。这种晶格是在六角晶格的基础上移去一部分散射子构成的, 移去的散射子恰好构成一个矩形网格。Suzuki晶格在 X 方向上的晶格常数为 $2a$, 而在 Z 方向上的晶格常数为 $\sqrt{3}a$, a 为六角晶格的晶格常数。

2.2 光子带结构

2.2.1 介质中周期排列的空气孔光子晶体

首先我们使用平面波展开法计算了 I 型光子晶体禁带宽度随空气孔半径的变化规律。空气孔的最小半径取为 $0.1a$, 最大半径为 $0.5a$, 半径每隔 $0.002a$ 计算一个禁带宽度。计算时介质材料

收稿日期: 2007-11-13 修订日期: 2008-01-25

基金项目: 甘肃省自然科学基金资助项目 (3ZS062-B25-036)

作者简介: 王道斌 (1976-), 男, 甘肃兰州人, 主要从事光子晶体、半导体光电子器件的研究。

Email: cougarlk@lut.cn

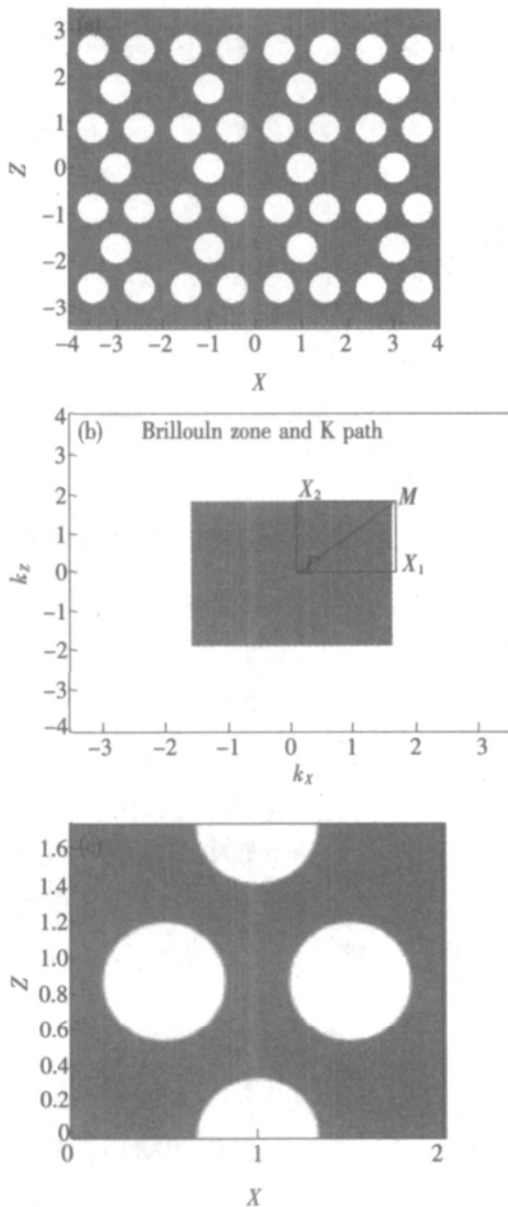


图 1 (a) Suzuki 晶格示意图; (b) 第一布里渊区; (c) 初基原胞

Fig 1 (a) Schematic plot of the Suzuki phase lattice; (b) Two-dimensional Brillouin zone with symmetry points; (c) The unit cell

的介电系数分别取为 $\epsilon = 16.2, 11.9, 10.1, 9.0$ 对应的是 Ge, Si, InP 以及 ZnO 材料, 结果如图 2 所示。

图 2 横坐标是以 a 为标准的归一化空气孔半径值, 纵坐标是归一化频率。图中浅色的线代表 TM 模式, 磁场方向指向空气孔的轴向, 深色的线代表 TE 模式, 电场方向指向空气孔的轴向, 它们的交叠部分代表完全禁带。

从计算结果可以看出, I 型 Suzuki 晶格光子晶体中出现的主要是 TM 模光子禁带, TE 模光子禁带只在很小范围内出现。对于折射率较大的 Ge 材料, TE 模光子禁带出现的范围相对较大, 因此在高能带处形成了完全带隙。对于折射率较小

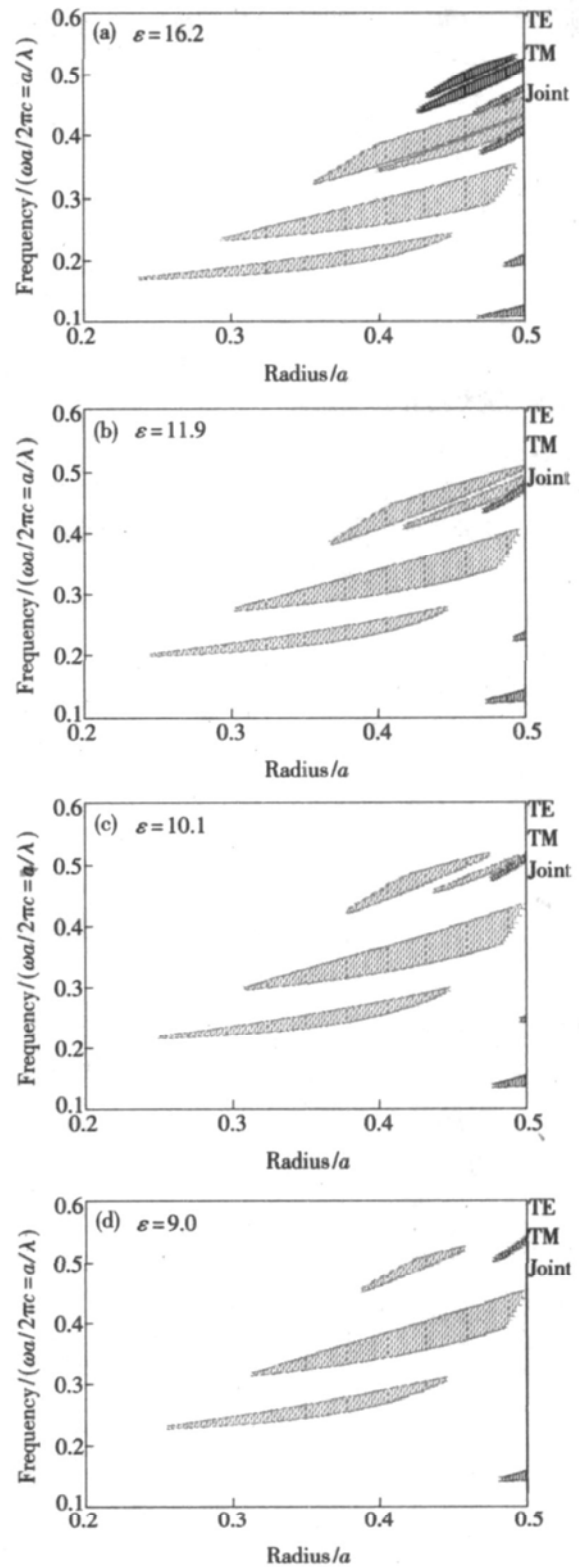


图 2 I 型光子晶体光子带隙与空气孔半径的关系 (a) $\epsilon = 16.2$ (b) $\epsilon = 11.9$ (c) $\epsilon = 10.1$ (d) $\epsilon = 9.0$

Fig 2 Gap maps for the periodic array of air holes in a dielectric background (a) $\epsilon = 16.2$ (b) $\epsilon = 11.9$ (c) $\epsilon = 10.1$; (d) $\epsilon = 9.0$

的 Si, InP 以及 ZnO 材料, TE 模光子禁带只在极小的范围内出现, 因此没有完全带隙形成。我们也对 InP 材料制作的 I 型六角、正方以及蜂窝形晶格光子晶体做了计算, 结果发现三种晶格中都

出现了大量的 TE 模光子禁带, 并且均形成了完全禁带。

计算结果显示, 四种材料制作的 I 型 Suzuki 晶格光子晶体中出现的 TM 模光子禁带随空气孔半径的变化规律非常相似。对于 $\epsilon=16.2$ 当空气孔半径 $r=0.238a$ 时 I 型 Suzuki 晶格光子晶体中出现第一个 TM 模光子禁带, 禁带中点对应频率为 $0.17112a/\lambda$ 对于 $\epsilon=11.9$ 当空气孔半径 $r=0.246a$ 时出现第一个 TM 模光子禁带, 禁带中点对应频率为 $0.20024a/\lambda$ 对于 $\epsilon=10.1$ 当空气孔半径 $r=0.25a$ 时出现第一个 TM 模光子禁

带, 禁带中点对应频率为 $0.2175a/\lambda$ 对于 $\epsilon=9.0$ 当空气孔半径 $r=0.256a$ 时出现第一个 TM 模光子禁带, 禁带中点对应频率为 $0.23107a/\lambda$ 。折射率越小, I 型 Suzuki 晶格光子晶体中开始出现 TM 模光子禁带对应的空气孔半径就越大, 光子禁带对应频率就越高。

2.2.2 空气中周期排列的介质柱光子晶体

同样, 我们使用平面波展开法计算了 II 型光子晶体禁带宽度随介质柱半径的变化规律, 计算时介质柱半径以及折射率的取值和前面一样, 结果如图 3 所示。

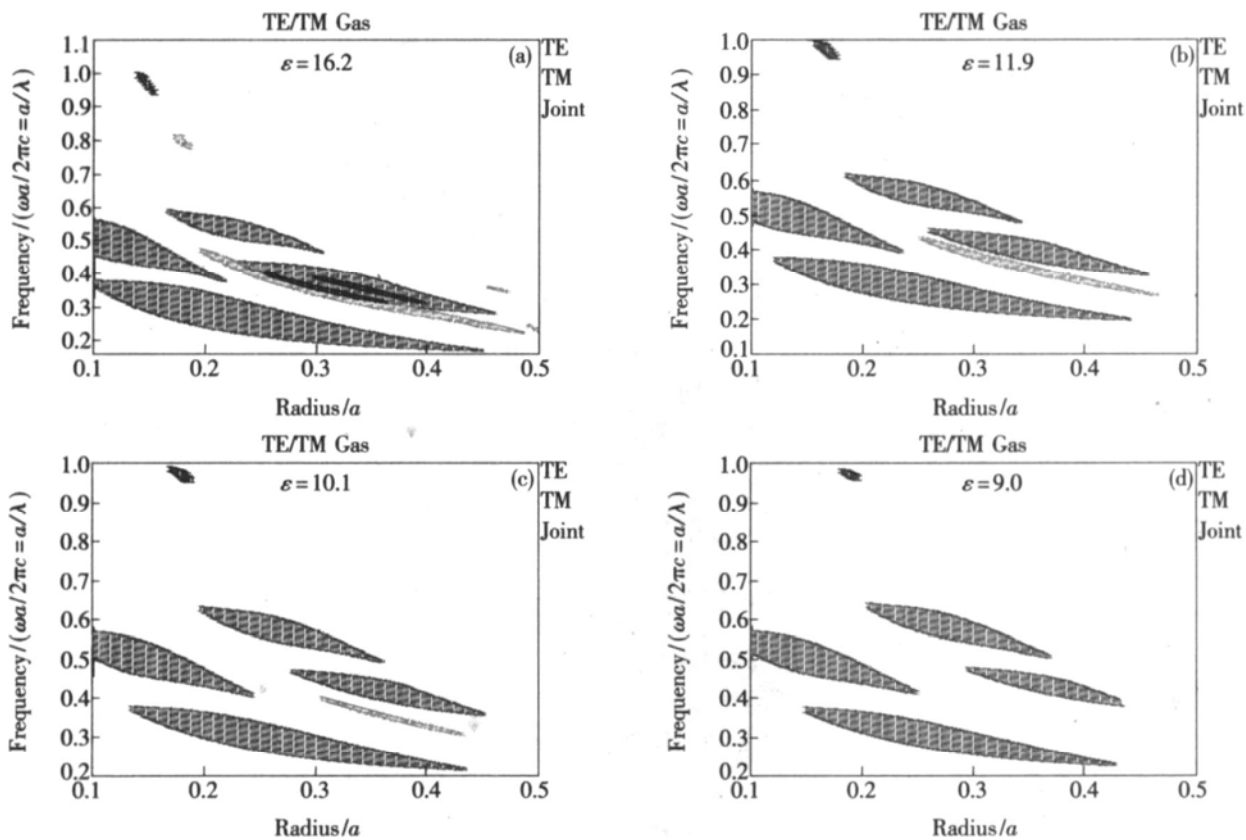


图 3 II 型光子晶体光子带隙与介质柱半径的关系 (a) $\epsilon=16.2$ (b) $\epsilon=11.9$ (c) $\epsilon=10.1$; (d) $\epsilon=9.0$

Fig 3 Gap maps for the periodic array of dielectric rods in air (a) $\epsilon=16.2$ (b) $\epsilon=11.9$ (c) $\epsilon=10.1$; (d) $\epsilon=9.0$

从计算结果可以看出, II 型 Suzuki 晶格光子晶体中出现的主要是 TE 模光子禁带, TM 模光子禁带只在很小范围内出现。对于折射率较大的 Ge 材料, TM 模光子禁带出现的范围较大, 因此在较低能带处就形成了完全带隙。对于折射率较小的 Si、InP 材料, TE 模光子禁带只在很小的范围内出现, 没有形成完全带隙。对于折射率最小的 ZnO 材料, 低能带处没有出现 TM 模光子禁带。同样, 我们对比了 Ge、Si 材料制作的 II 型六角、正方以及蜂窝形晶格光子晶体的计算结果, 蜂窝形晶格中出现了大量 TM 模光子禁带, 形成了较多

的完全禁带。

4 种材料制作的 II 型 Suzuki 晶格光子晶体中 TE 模光子禁带随介质柱半径的变化规律同样非常相似, 在 $r=0.1a$ 时都已出现 TE 模光子禁带, 随着介质柱半径逐渐增大禁带中点对应频率逐渐减小。折射率越小, II 型 Suzuki 晶格光子晶体中出现第一个最低 TE 模光子禁带对应的介质柱半径就越大。

为了对比, 我们计算了 $\epsilon=10.1$, I、II 型 Suzuki 晶格光子晶体光子能带结构, $r=0.33a$ 时的结果如图 4 所示。

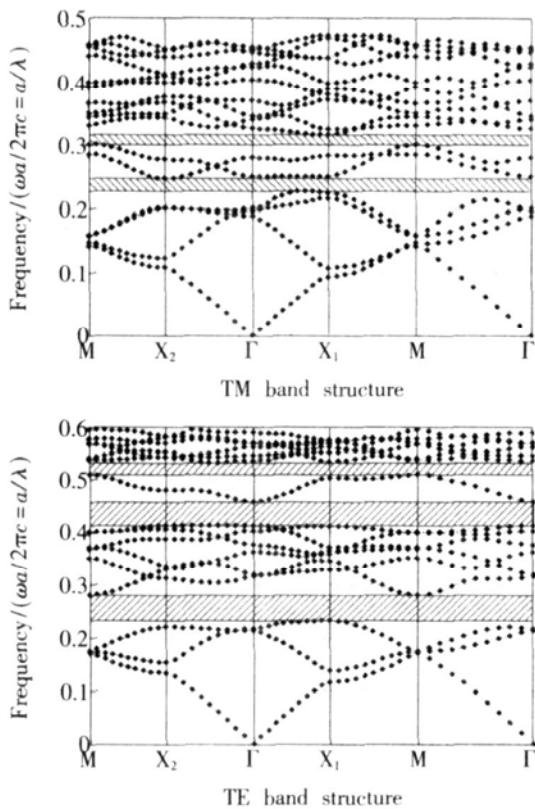


图 4 $\epsilon=10.1$, $r=0.33a$ 时 I、II 型 Suzuki 晶格光子晶体光子带结构图

Fig 4 Energy band diagram of the I, II Suzuki lattice photonic crystal lattice with $\epsilon=10.1$, $r=0.33a$.

图 4 中最低的能带记为第一能带, 其它依次类推。

对于 I 型 Suzuki 晶格光子晶体, 第五和第六能带是两个非常特殊的能带。当空气孔半径较小时这两个能带与其它能带间距很小, 所以没有形成光子禁带; 当空气孔半径较大时这两个能带与其它能带的间距逐渐拉开, 导致上下两个光子禁带出现, 这两个能带从其它能带中分离出来; 当空气孔半径很大时, 第六能带与其它能带的间距变得更大, 而第五能带与下方各能带的间距逐渐减小并最终重合到一起, 相应的光子禁带消失。特别重要的是, 我们注意到第五能带沿 ΓX_1 、第六能带沿 $X_1 M$ 方向是非常平坦的, 这意味着相应光学模式的群速度 $v_g = \nabla_k \omega$ 几乎等于零, 这一性质并不受空气孔半径变化的影响。这个现象在其它晶格, 特别是蜂窝形晶格光子晶体中并没有观察到。

对于 II 型 Suzuki 晶格光子晶体, 当介质柱半径较小时, 第四能带与其它带分离形成两个光子带隙; 介质柱半径逐渐变大, 第四能带与上面的带合并, 第十能带逐渐和其它带分离形成第二、

三光子带隙; 介质柱半径继续增大, 第十能带和上面的带合并, 当 $r=0.45a$ 时, 只有一个带隙出现。在 II 型光子晶体能带中没有发现群速度近似等于零的色散曲线。

图 5 是 I 型光子晶体第五能 $k=(0.8, 0, 0)$ 和 II 型光子晶体第十能 $k=(0, 0, 0)$ 对应模式的光强分布图。它显示的是 H_z^2 和 E_y^2 在一个原胞内的分布。可以看出第一种情况下光强完全集中在移去空气孔后留下的缺陷区, 第五和第六能带是缺陷相互作用后形成的微带, 所以在特定方向上对应的群速度接近于零; 第二种情况下光强虽然大部分集中在缺陷区, 但仍有相当一部分光强分布在缺陷区外。

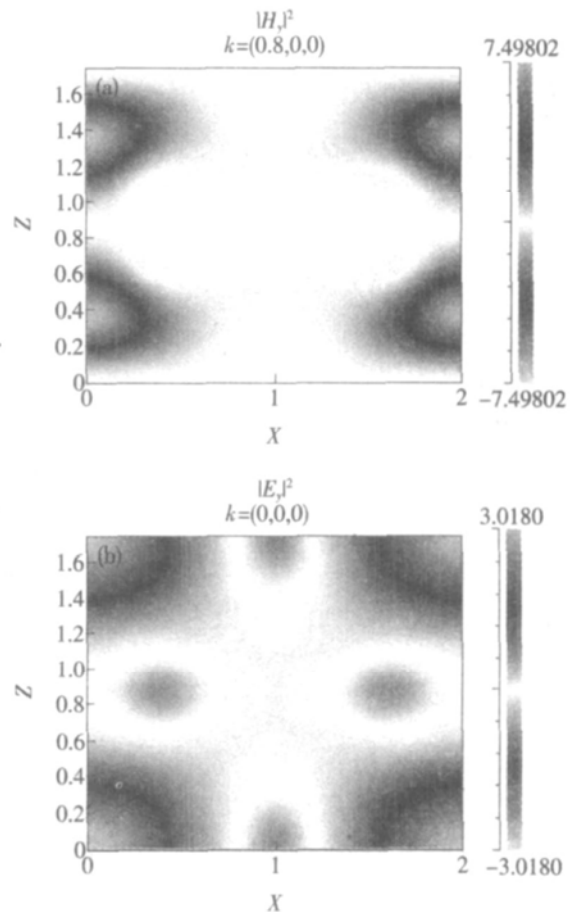


图 5 光强模式分布图 (a) I 型光子晶体第五能带 $k=(0.8, 0, 0)$; (b) II 型光子晶体第十能带 $k=(0, 0, 0)$

Fig 5 Optical field mode distribution in unit cell of (a) I-type and (b) II-type photonic crystal

3 结 论

采用平面波展开法系统计算了 Suzuki 晶格光子晶体的能带结构, 包括介质中周期排列的空气孔光子晶体和空气中周期排列的介质柱光子晶

体, 并且对两者进行了对比。重点考察了空气孔和介质柱半径及折射率对光子带隙的影响。研究发现当介质折射率较大时两类光子晶体均能够形成完全带隙, 折射率较小时第一类光子晶体主要形成 TM 模光子禁带, 第二类光子晶体主要形成

TE 模光子禁带。介质中周期排列的空气孔光子晶体能带结构中沿 ΓX_1 和 $X_1 M$ 方向出现了群速度接近于零的色散曲线, 而在另一类光子晶体中并未出现这种情况, 在其它晶格类型的光子晶体中也未发现这种情况。

参 考 文 献:

- [1] Joannopoulos J D, Meade R D, Winn J N. *Photonic Crystals* [M]. New York: Princeton University Press, 1995
- [2] Yablono vitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **58** (20): 2059-2062
- [3] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **58** (23): 2486-2489
- [4] Hu Ping, Tan Zhenxing, Liao Qinghua, *et al*. Normal coupled modes in a asymmetric one-dimension photonic crystal [J]. *Chin. J. Lum in.* (发光学报), 2006, **27**(3): 291-295 (in English).
- [5] Tang Haixia, Wang Qing, Theoretical simulation of enhanced luminescence from nc-Ge/Si islands by photonic crystal [J]. *Chin. J. Lum in.* (发光学报), 2006, **27**(4): 435-441 (in Chinese).
- [6] Meade R D, Devenyi A, Joannopoulos J D, *et al*. Novel applications of photonic band gap materials: Low-loss bends and high Q cavities [J]. *J. Appl Phys*, 1994, **75**(9): 4753-4755
- [7] Painter O, Lee R K, Scherer A, *et al*. Two dimensional photonic band-gap defect mode laser [J]. *Science*, 1999, **284** (5421): 1819-1821
- [8] Knight J C, Birks T A, Russell P S T, *et al*. All-silica single-mode fiber with photonic crystal cladding [J]. *Opt Lett*, 1996, **21**(19): 1547-1549
- [9] Noda S, Chutinan A, Imada M. Trapping and emission of photons by a single defect in a photonic band-gap structure [J]. *Nature*, 2000, **407**(6804): 608-610
- [10] Villeneuve P R, Arams D A, Fan S, *et al*. Single-mode waveguide micro cavity for fast optical modulation and switching [J]. *Opt Lett*, 1996, **21**(24): 2017-2019
- [11] Caballero D, Sanchez-Dehesa J, Martinez-sala C, *et al*. Suzuki phases in two-dimensional sonic crystals [J]. *Phys Rev B*, 2001, **64**(6): 064303-1-5
- [12] Sanchez-Dehesa J, Ramos-Mendieta F, Bravo-Abad J, *et al*. Suzuki phases in two-dimensional photonic crystals [J]. *SPIE*, 2002, **4655**: 251-259
- [13] Reynolds A L, Perschel U, Lederer F, *et al*. Coupled defects in photonic crystals [J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 2001, **49**(10): 1860-1867

Band Structure of Suzuki-phase Photonic Crystal

WANG Dao-bin, HOU Shang-lin, REN Guo-dong, LEI Jing-li

(Department of Physics, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract Photonic crystals (PCs), also known as photonic band-gap materials, are artificial dielectric or metallic structures in which the refractive index modulation gives rise to stop bands for electromagnetic waves (EM) within a certain frequency range. The discovery of photonic crystals has opened up a promising tool to control the flow of light. A very interesting feature of light guided through photonic crystals is that the group velocity of the light may be reduced by orders of magnitude. There are several devices taking advantage of this

property both in PC waveguides and in extended photonic crystal lattices. The excellent optical properties of PCs come from their special band structures. The band structures can be associated with the type of lattice that photonic crystals take on. Up to the present, many works have been devoted to study the properties of PCs which have hexagon, square and honeycomb lattices. The two dimensional Suzuki-phase lattice is the novel one, which firstly was brought forward in the context of sound propagation by sonic crystals and afterward its equivalent was introduced for photonic crystals. In this paper a complete research of the photonic band structure for Suzuki-phase lattice is presented, including the periodic array of air holes in a dielectric background and the periodic array of dielectric rods in air. With the help of plane wave expansion method, the impacts of scatter element radius and refractive index was investigated. The results demonstrate that the band-gaps are mostly for TM mode in the periodic array of air holes in a dielectric background, but the TE mode in the periodic array of dielectric rods in air. The complete band-gap presents itself in all type photonic crystals only when refractive index of the medium is larger enough. When refractive index is smaller, the complete band-gap doesn't emerge. For the periodic array of air holes in a dielectric background, the results demonstrate that in some rang of air hole radius the fifth and sixth bands are separated from each other distinctly. The dispersive curves for fifth band along ΓX_1 direction and sixth band along $X_1 M$ direction are very flat, implying group velocity equal to zero. The modal field profiles were also calculated. From these results, we can find the fifth and sixth bands are mini-bands created by the coupling of defect modes. This phenomenon, which can be used for slow light engineering in photonic crystals, has not been found in the periodic array of dielectric rods in air and other lattices.

Key words Suzuki phase, photonic band gap, plane wave expansion method, defect mode

Received date: 2007-11-13

《发光学报》网上在线投稿通知

由于学报发展的需要,《发光学报》网站已经初步建成开通,欢迎广大作者浏览我们的网页并提出宝贵意见,共同建好这个为广大作者和读者进行交流以及展示作者相关科研成果的平台。《发光学报》网页上建有网上在线投稿平台,从 2006 年开始,我们主要接收网上在线投稿,欢迎大家使用。如有问题,请与我们联系:

E-mail: fgxb@cimp.ac.cn, fgxb@126.com, Tel: (0431) 86176862

《发光学报》网址: <http://www.faguangxuebao.org>

《发光学报》编辑部