

大小周期正方格子复合结构的光子带隙特性^{*}

曾 隽 潘杰勇 董建文 汪河洲[†]

(中山大学光电材料与技术国家重点实验室 广州 510275)

(2005 年 9 月 18 日收到, 2005 年 10 月 30 日收到修改稿)

把具有宽完全带隙的粗锐复合的周期常数为 a 的二维正方格子再与周期常数为 a_2 的大周期简单正方格子复合, 发现大周期正方格子起缺陷作用, 并发现当 $a_2 < 5a$ 时, 缺陷态明显地随入射角度变化. 此变化随 a_2 的增大而减少. 用 FDTD 方法计算了其透射和反射谱, 结果表明缺陷峰透射率与 a_2 的大小成反比. 另外还发现: 缺陷峰结构与大周期正方格子的圆柱直径的关系曲线与 a_2 关系不大. 通过调节大周期正方格子的圆柱的直径, 可获得单缺陷峰、多缺陷峰、单一偏振 (TE 模) 单缺陷峰或 TM 模和 TE 模重叠或分开的缺陷峰等, 可适应不同的应用的所需.

关键词: 光子晶体, 光子能隙, 复式结构, 缺陷态

PACC: 4270Q, 7820P

1. 引 言

光子晶体^[1,2]是具有光子带隙的新型材料, 频率处在光子带隙内的电磁波不能在光子晶体中传播. 具有宽的完全带隙的光子晶体具有广泛用途^[3,4], 因此, 其设计与制作受到普遍关注. 其中, 二维光子晶体的制作可采用微电子工艺, 并可与电子电路一起集成, 因而引起人们广泛重视. 人们提出了很多增宽二维光子晶体完全带隙的方法^[5-9], 同时, 也研究了光子晶体的缺陷态^[10-14]. 在一个具有完全带隙的理想光子晶体中引入点缺陷, 那么在完全带隙中将会出现一个或者多个缺陷模^[12-14], 这使光子晶体具有更广泛的用途^[15-17]. 过去人们主要是通过改变原周期结构中某个或某些的介电体的大小或去除某个介电体来形成缺陷.

另外, 复式光子晶体结构是产生完全带隙的有效方法. 其中粗锐组合的二维复式结构光子晶体的宽完全带隙已引起人们的重视^[7,11,18].

本文选取具有宽完全带隙的粗锐组合二维复式正方格子结构光子晶体, 与周期常数大的简单正方格子结构再复合, 结果在原粗锐组合二维复式正方格子结构光子晶体的宽完全带隙内出现缺陷峰. 研究了其

依赖大周期常数等参数的许多有意义的性质.

2. 结构及其带隙特性

二维粗锐正方格子复合结构示于图 1(a), 图中深色部分对应硅, 介电常数 $\epsilon_1 = 12.096^{[6]}$ (波长 $1.55\mu\text{m}$ 的对应值); 其余部分对应空气 (空气介电常数 $\epsilon_2 = 1.0$). 周期常数为 a . 本文采用平面波展开法^[19]研究其带隙特性, 并用 N-Order 算法^[20]加以验证. 计算了不同介质圆柱半径 r 和锐结构宽度 d 与完全带隙宽度的关系, 发现当 $r = 0.32a$, $d = 0.05a$ 时, 结构具有很宽的完全带隙, 该结构对应的频带图如图 1(b) 所示. 图 1(b) 和图 3 的纵坐标和图 1(b) 横坐标为归一化频率, 归一化频率的定义是角频率 (ω) 乘周期常数 (a) 除以 $2\pi c$ (c 为光速) 即归一化频率为 $(\omega a) / (2\pi c)$. 图 1(b) 和图 4 中横坐标的 X, M 和 Γ 是正方格子结构的第一布里渊区的各对称点.

在本文中, 我们研究的是标准二维光子晶体结构, 而非光子晶体薄片, 即认为沿介质柱方向具有无限长度. 因此我们在数值模拟计算中利用二维 FDTD 计算其透射和反射谱图. 计算结果见图 1(c) 所示, 其中实线、虚线、点线和点划线分别表示反射谱 (TE), 透射谱 (TE), 反射谱 (TM) 和透射谱 (TM).

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 10274108) 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (批准号: 2004CB719804) 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (批准号: 2003AA311022) 和广东省自然科学基金资助的课题.

[†] 通讯联系人, E-mail: stswzh@zsu.edu.cn

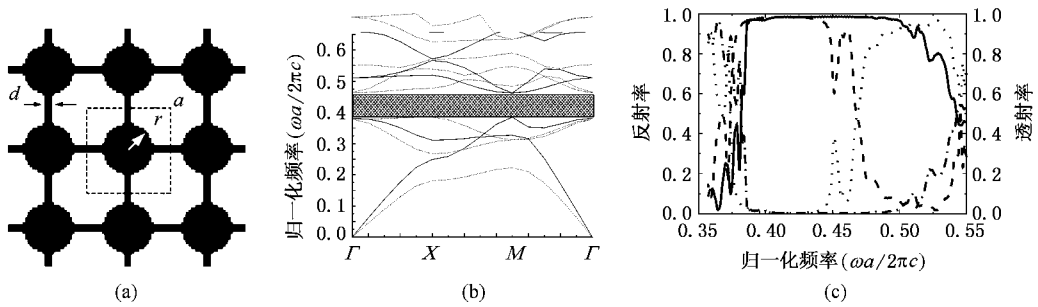


图 1 (a) 粗锐复合二维正方格子 (b) 当黑色部分为硅, 介电常数 $\epsilon_1 = 12.096$, 其余部分为空气, 锐结构尺寸为 $d = 0.05a$, 圆柱半径为 $r = 0.32a$ 时, 计算得的频带图 (实线为 TE 模, 虚线为 TM 模), 网格区域为完全带隙 (c) 对应的透射谱和反射谱

以上述二维粗锐正方格子复合结构 ($r = 0.32a, d = 0.05a$) 为基本结构, 再复合进另一套周期常数大的介质圆柱的简单正方格子结构, 设此周

期常数大的介质圆柱的简单正方格子结构的周期常数 $a_2 = 3a, 5a$ 和 $7a$, 其介质圆柱的半径 $r_2 = 0.32a$, 即为图 2 所示的结构.

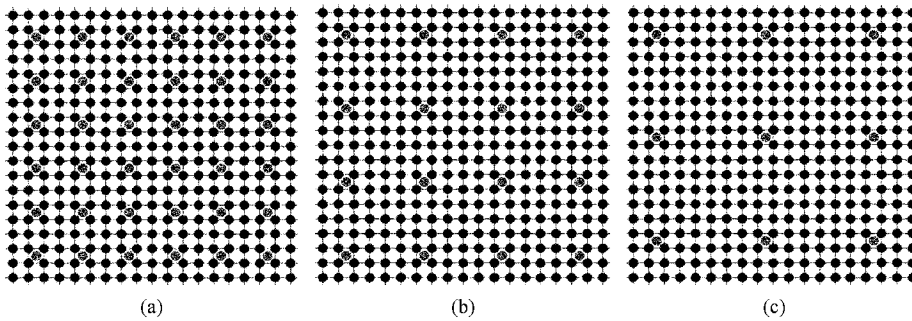


图 2 二维粗锐正方格子复合结构再与另一套大周期常数的简单正方格子复合的结构 (a) $a_2 = 3a$, (b) $a_2 = 5a$, (c) $a_2 = 7a$

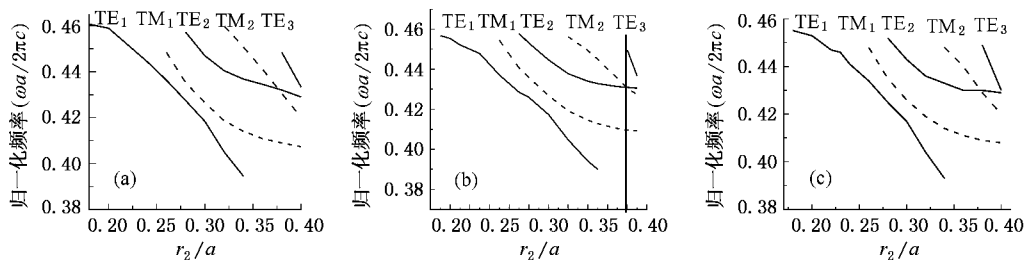


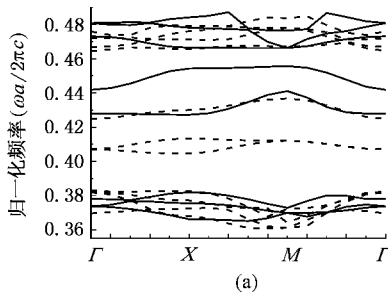
图 3 缺陷峰与大周期常数正方格子的圆柱体大小的相关曲线 (a) $a_2 = 3a$, (b) $a_2 = 5a$, (c) $a_2 = 7a$

把具有宽完全带隙的粗锐复合的周期常数为 a 的二维正方格子再与周期常数为 a_2 的大周期简单正方格子复合后, 发现大周期正方格子起缺陷作用, 即在原粗锐复合结构的很宽的完全带隙内出现缺陷峰, 这些缺陷峰的波长和缺陷峰的数量与大周期常数的正方格子的圆柱体大小相关. 图 3 给出缺陷峰与大周期常数正方格子的圆柱体大小的相关曲线

图. 从图 3 看出, 不管大周期正方格子的周期是大还是小, 缺陷峰结构与大周期正方格子的圆柱直径的关系曲线图都相似. 即缺陷峰结构与大周期正方格子的圆柱直径的关系曲线与 a_2 基本不相关.

结果显示缺陷带的数量与介质圆柱半径 r_2 有直接关系, r_2 越大, 则出现的缺陷带就越多. 通过调节大周期正方格子的圆柱的直径, 可获得单缺陷峰、

多缺陷峰、单一偏振(TE 模)的单缺陷峰,或 TM 模和 TE 模重叠($r_2 = 0.376a$)或分开的缺陷峰等.可适应不同的应用的所需.如图 3 所示,当 r_2 为 $0.19a$ 至 $0.25a$ 时,有 1 条缺陷峰 TE_1 ;当 r_2 为 $0.25a$ 至 $0.28a$ 时,有 2 条缺陷峰 TE_1 和 TM_1 ;当 r_2 为 $0.28a$ 至 $0.32a$ 时,有 3 条缺陷峰 TE_1 , TM_1 和 TE_2 ;而当 r_2 为 $0.32a$ 至 $0.35a$ 时,有 4 条缺陷带 TE_1 , TM_1 , TE_2



和 TM_2 在 $r_2 = 0.376a$ 时,有 4 条缺陷带 TM_1 , TM_2 , TE_2 和 TE_3 ;其中 TM_2 和 TE_2 重叠.

另外,还发现当 a_2 较小时(如 $a_2 < 5a$),在宽完全带隙内出现不平的缺陷态,即随入射方向变化较大,如图 4(a)所示.当 $a_2 > 5a$ 时,缺陷态逐渐变平,与入射方向的关系越来越小,具有近零色散的性质,如图 4(b)所示.

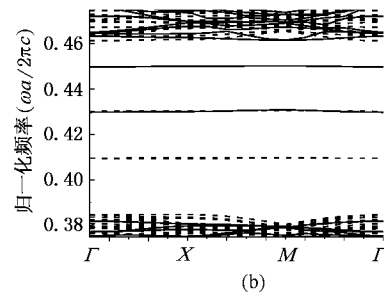


图 4 (a)当 $a_2 = 3a$,在其宽完全带隙内出现不平的(即与方向有关的)缺陷峰,其中选 $r_2 = 0.377a$; (b)当 $a_2 = 7a$,在其宽完全带隙内出现比较平的(即与方向关系小的)缺陷峰,其中选 $r_2 = 0.376a$

我们用 FDTD 方法计算了这种粗锐复合的周期常数为 a 的二维正方格子再与周期常数为 a_2 的大周期简单正方格子复合后的结构的透射谱和反射谱,结果见图 5 所示.其中实线:TM 反射谱,虚线:TM 透射谱,点线:TE 反射谱,点划线:TE 透射谱.图 5 是 $a_2 = 7a$ 的结果.当 a_2 变小时,缺陷峰的透射率迅速增大;当 a_2 变大时,缺陷峰的透射率变小.即结果表明缺陷峰的透射率与 a_2 的大小成反比.

3. 结 论

本文通过平面波展开法以及 N-Order 算法进行数值模拟,发现在具有宽完全带隙的粗锐复合二维正方格子的基础上,复合大周期的简单正方格子结构,发现大周期正方格子起缺陷的作用,在原粗锐复合正方格子的宽完全带隙内出现缺陷峰.本文通过数值模拟给出了反映缺陷谱随大周期正方格子结构参数变化的规律和各种关系曲线.典型的规律有:(1)发现当大周期正方格子结构的周期常数较小时,在宽完全带隙内出现不平的,随入射方向变化的缺陷态;当大周期正方格子结构的周期常数较大时,这些缺陷态逐渐变平,具有随入射方向变化较小的,近零色散性质.(2)不管大周期正方格子的周期是大还是小,缺陷峰结构与大周期正方格子的圆柱直径的关系曲线相似.即与 a_2 关系不大.(3)随着掺杂的介质圆柱半径的增大,出现 1 至 4 条缺陷峰,通过调节大周期正方格子的圆柱的直径,可获得单缺陷峰、多缺陷峰、单一偏振(TE 模)单缺陷峰或 TM 模和 TE 模重叠或分开的缺陷峰等.可适应不同的应用的所需.(4)缺陷峰的透射率与 a_2 的大小成反比.

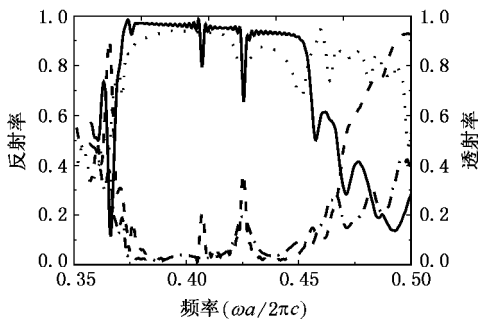


图 5 大小周期正方格子复合结构的透射谱和反射谱 实线:TM 反射谱,虚线:TM 透射谱,点线:TE 反射谱,点划线:TE 透射谱

- [1] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [2] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [3] Noda S, Chutinan A, Imada M 2000 *Nature* **407** 608
- [4] Lin S Y, Chow E, Hietala V, Villeneuve P, Joannopoulos J 1998 *Science* **282** 274
- [5] Li Z Y, Gu B Y, Yang G Z 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 2574
- [6] Trifonov T, Marsal L F, Rodriguez A, Pallares J, Alcobilla R 2004 *Phys. Rev. B* **69** 235112
- [7] Qiu G X, Lin F L, Li Y P 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 600 (in Chinese] 仇高新、林芳蕾、李永平 2003 物理学报 **52** 600]
- [8] Mao W D, Dong J W, Zhong Y C, Liang G Q, Wang H Z 2005 *Opt. Express* . **13** 2994
- [9] Zhong Y C, Zhu S A, Wang H Z 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 369
- [10] Kuzmiak V 1998 *Phys. Rev. B* **57** 15242
- [11] Zhuang F, Xiao S S, He J P, He S L 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2167 (in Chinese] 庄 飞、肖三水、何江平、何赛灵 2002 物理学报 **51** 2167]
- [12] Yablonovitch E, Gmitter T J, Meade R D, Rappe A M, Brommer K D, Joannopoulos J D 1990 *Phys. Rev. Lett.* **67** 3380
- [13] McCall S L, Platzman P M, Dalichaouch R, Smith D, Schultz S 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 2017
- [14] Gadot F, de Lustrac A, Lourtioz J M, Brillat T, Ammouche A, Akmansoy E 1999 *J. Appl. Phys.* **85** 8499
- [15] Painter O, Lee R K Scherer A, Yariv A, O'Brien J D, Dapkus P D, Kim I 1999 *Science* **284** 1819
- [16] Berggren M, Dodabalapur A, Slusher R E, Bao Z, Timko A, Nalamasu O 1998 *Electron. Lett.* **34** 90
- [17] Fan S, Villeneuve P R, Joannopoulos J D, Haus H A 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 960
- [18] Pan J Y, Liang G Q, Mao W D, Wang H Z *Acta Phys. Sin.* , accepted (in Chinese] 潘杰勇、梁冠全、毛卫东、汪河洲、物理学报]
- [19] Johnson S G, Joannopoulos J D 2001 *Opt. Express* **8** 173
- [20] Chan C T, Yu Q L, Ho K M 1995 *Phys. Rev. B* **51** 16635

Band gap characteristics of compound structure composed of lattices with different periodic constants^{*}

Zeng Jun Pan Jie-Yong Dong Jian-Wen Wang He-Zhou[†]

(State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies , Zhongshan (Sun Yat-Sen) University , Guangzhou 510275 , China)

(Received 18 September 2005 ; revised manuscript received 30 October 2005)

Abstract

Our numerical simulation results show that if a compound structure is composed of a lattice with a larger periodic constant and a lattice with a small periodic constant , the lattice with larger periodic constant will play the role of defects . The frequencies of defect modes are dependent on the rod radius (r_2) of square lattice with a larger periodic constant , and the relationship of the defect modes and r_2 is almost independent of a_2 . The defect mode is dependent on incidence angle when $a_2 < 5a$. The dependence of defect mode on incidence angle decreases with the increasing of a_2 . Furthermore , by optimizing the size of the rods (r_2) of the larger periodic lattice , single defect mode , multiple defect modes with equal or different frequency spacing , including single polarization or TE and TM overlap defect mode , can be gotten respectively . The transmissivity of the defect modes are inversely proportional to a_2 .

Keywords : photonic crystal , photonic band gap , compound lattices , defect mode

PACC : 4270Q , 7820P

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10274108) , National “ 973 ” Project of China (Grant No. 2004CB719804) , National “ 863 ” Project of China (Grant No. 2003AA311022) , and the Natural Science Foundation of Guangdong Province of China .

[†] Corresponding author . E-mail : stswzh@zsu . edu . cn