

三重晶格光子晶体方形点缺陷缺陷模特性研究

孙 会,陈鹤鸣

(南京邮电大学 光电工程学院 江苏省光通信工程技术研究中心,江苏 南京 210023)

摘 要:文中提出一种新型三重三角晶格光子晶体,应用平面波展开法(PWM)分析其带隙结构,应用时域有限差分法(FDTD)研究方形点缺陷的尺寸和旋转角度对缺陷模特性的影响。仿真结果表明,该光子晶体的光子禁带处于 THz 波段范围内,且禁带宽度很宽,达到 0.195 62。当方形点缺陷旋转角度为 10° 时,改变点缺陷尺寸,此时缺陷模个数发生变化,并且随着点缺陷尺寸的增大,缺陷模波长往长波长方向移动;当方形点缺陷边长为 $22.5\text{ }\mu\text{m}$ 时,改变点缺陷旋转角度,此时缺陷模位置基本不变,但是缺陷模个数发生变化。

关键词:三重三角晶格;光子晶体;方形点缺陷;THz 波段;缺陷模特性

中图分类号:TN929.11

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2015)02-0181-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2015.02.041

Study on Characteristics of Defect Modes of Square Point Defect Based on Triple Lattice Photonic Crystal

SUN Hui, CHEN He-ming

(Optical Communications Engineering Technology Research Center of Jiangsu Province, School of Opto-electronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: A novel triple triangular lattice photonic crystal is proposed in this paper. The band gap property is analyzed by the plane wave method and the effect of the square point defect on the characteristics of defect modes is researched by the finite difference time domain method. The simulation results show that the photonic band gap of the photonic crystal is in the THz wave band and the gap width is as large as 0.195 62. When the rotation angle of the square point defect is 10° , with the increase of the size length, the number of the defect modes will change and the wavelength of the defect modes move towards the longer wavelength. When the side length of the point defect is $22.5\text{ }\mu\text{m}$, with the changing of the rotation angle, the number of the defect modes will change, but the corresponding wavelengths will not change.

Key words: triple triangular lattice; photonic crystal; square point defect; THz wave band; characteristics of defect modes

0 引 言

自从 1987 年 E. Yablonovitch^[1]和 S. John^[2]提出光子晶体以来,不少科技工作者在理论和实践上对光子晶体进行了广泛的研究^[3],二维光子晶体按照晶格结构可以分为简单晶格光子晶体和复式晶格光子晶体^[4]。简单晶格光子晶体是由一种介质柱按照三角晶格或正方晶格排列组成的,而复式晶格光子晶体是由两种或两种以上简单晶格光子晶体嵌套形成的,它破坏了光子晶体的空间对称性,但具有更大的禁带宽度和更稳定的性能。另外,当在简单晶格光子晶体中引入一个点缺陷时,光子禁带中只能产生一个缺陷模;

而在复式晶格光子晶体中引入一个点缺陷时,光子禁带中可产生两个或两个以上的缺陷模^[5-6]。现有复式晶格光子晶体多是圆形、方形两种介质柱相互嵌套后形成的,但基于此光子晶体设计的光学器件只能完成双波长操作,例如复式晶格 THz 双波长滤波器^[7]、光控复式三角晶格光子晶体双波长太赫兹波调制器^[8]等。而三重晶格光子晶体中一个点缺陷可能引入至少三个缺陷模,基于此光子晶体设计的光学器件能够实现更多波长的操作。

文中提出一种由圆形、方形和三角形三种介质柱相互嵌套后形成的三重三角晶格光子晶体,并分析了

收稿日期:2014-03-05

修回日期:2014-06-11

网络出版时间:2014-12-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61077084)

作者简介:孙 会(1989-),女,硕士研究生,研究方向为光纤通信与光波技术;陈鹤鸣,教授,通讯作者,研究方向为光纤通信与光波技术。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20141227.1343.024.html>

该光子晶体的禁带分布情况,然后就方形点缺陷的大小和旋转角度对缺陷模特性的影响进行分析。仿真结果表明,当方向点缺陷的边长或旋转角度发生变化时,缺陷模个数发生改变,但是方形点缺陷边长变化时,缺陷模波长发生变化,而旋转角度变化时,缺陷模对应波长基本不变。该性质在光子晶体滤波器、光子晶体调制器、光子晶体谐振腔、光子晶体波导、波分复用等方面有着潜在的应用前景^[9-11]。

1 结构模型和点缺陷设置

1.1 三重三角晶格光子晶体结构

文中设计的三重晶格光子晶体是由圆形、方形和三角形三种介质柱相互嵌套后形成的,介质柱轴线平行于 Y 轴,在与柱体垂直的 $X-Z$ 平面上就呈新型的二维三重晶格的周期性排列。

该光子晶体结构如图 1 所示。基底为空气,折射率为 1,介质柱材料为硅,其在 THz 波段折射率为 $n = 3.4$,方形介质柱边长 $\text{width} = L = 9 \mu\text{m}$,圆形介质柱半径 $\text{Radius} = 5 \mu\text{m}$,三角形底边长 $\text{width}_1 = 15 \mu\text{m}$,三角形高 $\text{height}_1 = 11 \mu\text{m}$,晶格常数 $\text{Period} = 33 \mu\text{m}$ 。

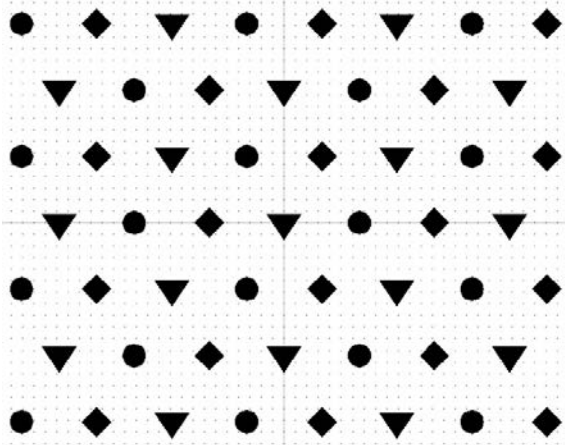


图 1 三重三角晶格光子晶体结构

根据平面波展开法 (PWM), 利用 Rsoft 软件中 BandSolve 功能组件仿真计算该三重三角晶格光子晶体带隙^[12-13]。如图 2 所示,图中阴影部分为光子禁带,

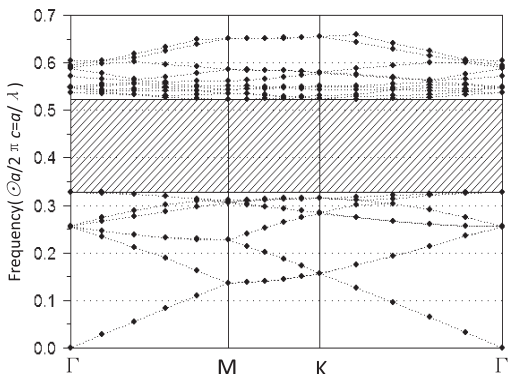


图 2 三重三角晶格光子晶体带隙结构图

图中只包含一个光子禁带,其归一化频率范围为 0.327 38 ~ 0.523,禁带宽度为 0.195 62,对应的波长范围为 63.097 514 3 ~ 100.800 293 μm ,对应频率为 2.976 182 ~ 4.754 545 THz,该光子禁带处于 THz 波段范围内。相对于简单晶格光子晶体,该三重三角晶格光子晶体具有更宽的禁带,文中设计的三重晶格光子晶体的缺陷模均在该禁带范围内。

1.2 点缺陷设置

完整结构光子晶体中引入的点缺陷对缺陷模特性有着决定性的影响,而通过改变点缺陷尺寸、形状、位置等都能够达到改变点缺陷的目的。文中所设计的光子晶体中圆形、方形、三角形介质柱均可以作为点缺陷,文中选取方形介质柱作为点缺陷,如图 3 所示。

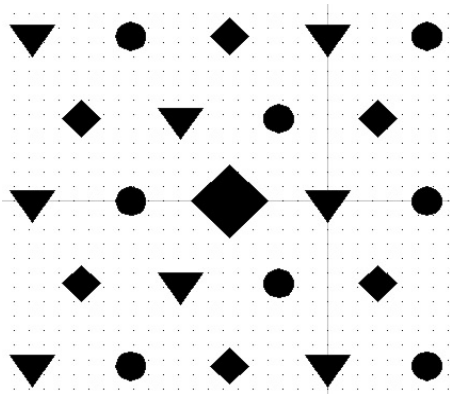


图 3 光子晶体方形点缺陷结构

图 3 中方形点缺陷介质柱填充非线性材料 GaAs, 其他介质柱均为 Si 介质柱。GaAs 的复折射率定义为^[14-15]: $N = n_0 - in_1$ 。文中只考虑没有泵浦光入射的情况,此时 GaAs 处于基态,其折射率虚部 n_1 为 0,实部 n_0 为 3.55,因此方形点缺陷折射率 $N = 3.55$ 。

2 方形点缺陷尺寸对缺陷模特性的影响

根据 FDTD 法,利用 Rsoft 软件中的 FullWave 组件,光源采用脉冲冲击波,通过仿真可以得出不同大小方形点缺陷情况下的缺陷模,下面就此进行分析。

假设方形点缺陷旋转角度为 10° ,将方形点缺陷的边长从 $2.0L$ 增大到 $3.0L$,其中增大步长为 $0.1L$,此时利用 FDTD 方法仿真分析方形点缺陷在不同边长下缺陷模个数和位置的变化情况。假设从长波长方向到短波长方向的模式分别为“模 1”“模 2”“模 3”“模 4”“模 5”和“模 6”,则这 6 个缺陷模的波长与方形点缺陷边长的关系如图 4 所示。

其中,缺陷模波长与方形点缺陷边长的关系如图 5 所示。

经过对图 4 和图 5 的分析比较可知,当引入方形点缺陷时至少产生三个缺陷模:当方形点缺陷边长为 $2.0L \sim 2.1L$ 和 $2.4L \sim 2.6L$ 时产生三个缺陷模,当边

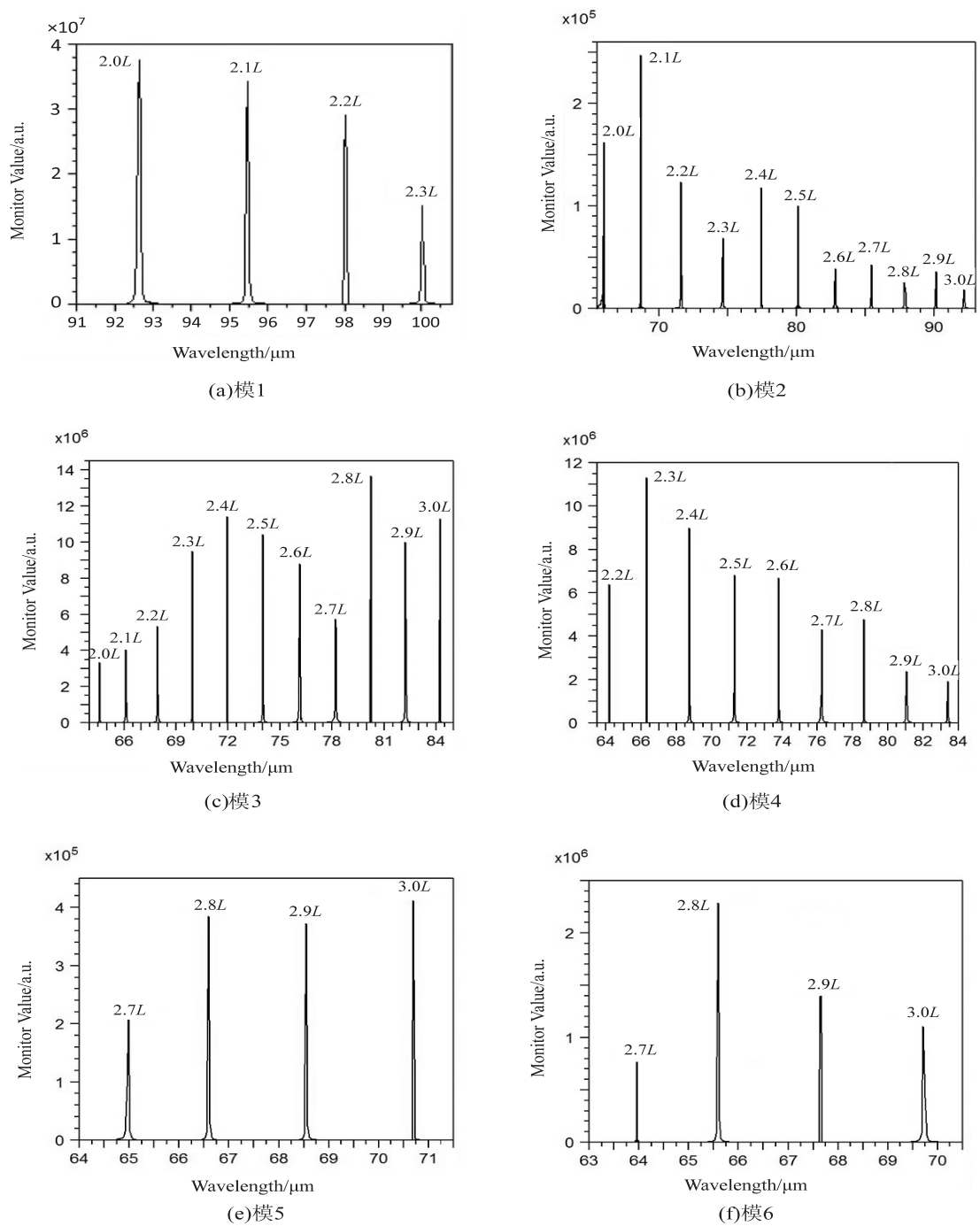


图4 方形点缺陷边长不同时的缺陷模位置分布

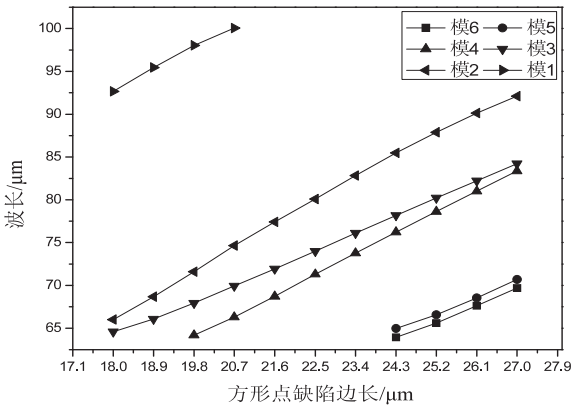


图5 缺陷模波长随方形点缺陷边长的变化图形

长为 2.2L ~ 2.3L 时产生四个缺陷模,当边长为 2.7L ~ 3.0L 时产生五个缺陷模,并且随着点缺陷边长的增大,缺陷模波长往长波长方向移动。另外,通过分析图 5 可知,缺陷模波长和点缺陷大小近似呈线性变化。

3 方形点缺陷旋转角度对缺陷模特性的影响

假设方形点缺陷边长为 $2.5L = 22.5\ \mu\text{m}$,将方形点缺陷的旋转角度从 0° 增大到 45° ,其中增大步长为 5° ,此时利用 FDTD 方法可以仿真得出填充 GaAs 的方形点缺陷在不同旋转角度下的缺陷模个数和位置变化

情况。假设从长波长方向到短波长方向的模式分别为“模 1”“模 2”和“模 3”，则这三个缺陷模的波长与方形点缺陷旋转角度的关系如图 6 所示。

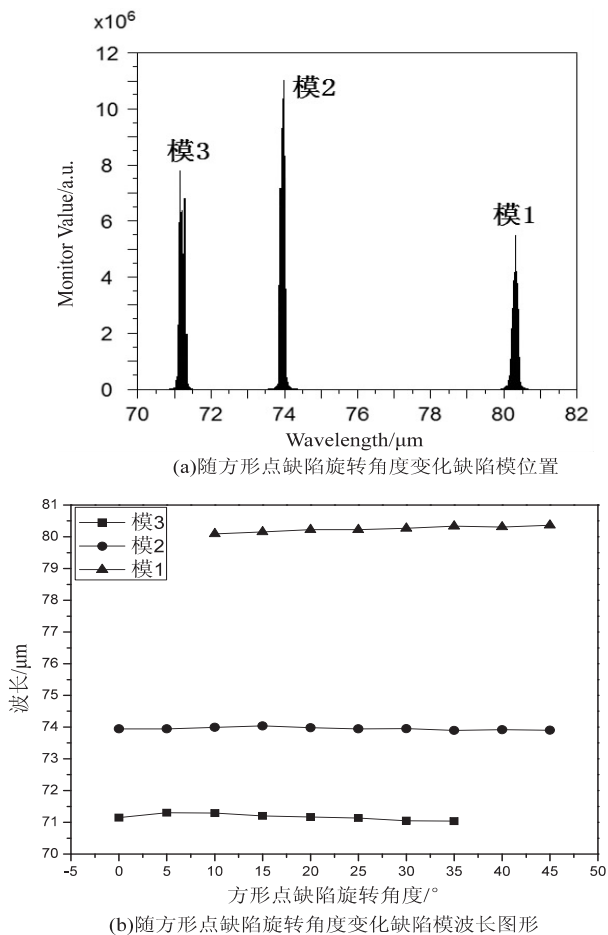


图 6 方形点缺陷旋转角度不同时缺陷模分布情况

由图 6 可知,当方形点缺陷旋转时,至少产生两个缺陷模:当方形点缺陷旋转角度为 $0^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 和 $40^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 时产生两个缺陷模,当旋转角度为 $10^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 时产生三个缺陷模,并且随着点缺陷旋转角度的增大,缺陷模位置基本不发生变化。由此可知,当方形点缺陷的旋转角度发生变化时,缺陷模位置基本不变,但是缺陷模个数发生变化。

4 结束语

文中提出一种由圆形、方形和三角形三种介质柱相互嵌套形成的三重晶格光子晶体,并分析了方形点缺陷对其缺陷模特性的影响。仿真结果表明,当方形点缺陷旋转角度为 10° 时,改变其边长至少产生三个缺陷模,至多产生五个缺陷模,并且随着边长的增大,缺陷模所对应波长往长波长方向移动,当方形点缺陷

边长增大到一定程度时,缺陷模消失。而当方形点缺陷边长为 $2.5L$ 时,改变其旋转角度至少产生两个缺陷模,至多产生三个缺陷模,并且随着旋转角度的增大,缺陷模所对应波长基本不发生变化。该三重晶格光子晶体的缺陷模特性对于研制多波长 THz 滤波器与调制器具有重要意义。

参考文献:

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronic [J]. Physical Review Letters, 1987, 58 (20): 2059-2062.
- [2] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. Physical Review Letters, 1987, 58 (23): 2486-2489.
- [3] 高 旸. 光子晶体应用分析 [J]. 中国科技信息, 2007 (15): 275-276.
- [4] 黄小琴. 太赫兹波光子晶体滤波器的研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2008.
- [5] 李 侠. 光子晶体中的缺陷模特性研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [6] 陈鹤鸣, 孟 晴. 高效光子晶体太赫兹滤波器的设计 [J]. 物理学报, 2011, 60 (1): 238-242.
- [7] 石 洁, 陈鹤鸣, 周 雯, 等. 光子晶体太赫兹双波长滤波器设计 [J]. 通信技术, 2013, 46 (7): 154-158.
- [8] 赵国中, 陈鹤鸣. 新型高速调制太赫兹波调制器理论研究 [J]. 通信技术, 2013, 46 (7): 4-6.
- [9] 张瑞君, 邓海丽. 光子晶体与光子晶体无源器件 [J]. 纳米器件与技术, 2004 (7): 15-19.
- [10] 黄章勇. 光纤通信光子晶体器件 (一) [J]. 光子技术, 2003 (2): 61-66.
- [11] Pendry J B, Haddon A J, Stewart W J, et al. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures [J]. Physical Review Letters, 1996, 76 (25): 4773-4776.
- [12] Guo Shangping, Albin S. Simple plane wave implementation method for photonic crystal calculations [J]. Opt Express, 2003, 11 (2): 167-175.
- [13] Zhang Hui, Guo Peng, Chen Ping, et al. Liquid-crystal-filled photonic crystal for terahertz switch and filter [J]. Opt Express, 2009, 26 (1): 101-106.
- [14] Ostmann T K, Koch M, Dawson P. Modulation of THz radiation by semiconductor nanostructures [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2002, 35 (5): 343-345.
- [15] Kuzel P, Kadlec F, Nemec H. Propagation of terahertz pulses in photoexcited media: analytical theory for layered systems [J]. The Journal of Chemical Physics, 2007, 127 (2): 024506.

三重晶格光子晶体方形点缺陷缺陷模特性研究

作者：[孙会](#)，[陈鹤鸣](#)，[SUN Hui](#)，[CHEN He-ming](#)

作者单位：[南京邮电大学 光电工程学院](#) [江苏省光通信工程技术研究中心](#)，江苏 南京，210023

刊名：[计算机技术与发展](#)

英文刊名：[Computer Technology and Development](#)

年，卷(期)：2015(2)

引用本文格式：[孙会](#).[陈鹤鸣](#).[SUN Hui](#).[CHEN He-ming](#) [三重晶格光子晶体方形点缺陷缺陷模特性研究](#)[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2015(2)