

太赫兹波段正方晶格二维光子晶体传输特性的研究

闫 昕

(山东枣庄学院物理与电子工程系, 山东 枣庄 277160)

摘 要:应用平面波展开法研究太赫兹波段正方晶格二维光子晶体的传输特性,数值模拟得到了太赫兹波段圆柱组成正方晶格二维光子晶体的带隙变化和能态密度的分布规律,根据计算结果设计了(0.485~0.503)THz波段的滤波器。并且分析了当圆柱发生微小改变形成椭圆柱正方晶格二维光子晶体时的带隙特性,研究结果为太赫兹器件的开发提供了理论依据。

关键词:太赫兹波;光子晶体;平面波展开法;正方晶格;能态密度

中图分类号:0431.1 **文献标识码:**A

Transmission Characteristic of Terahertz Wave Band In 2D Square Photonic Crystal

YAN Xin

(Department of Physics and Electron Engineering, Zaozhuang University, Zaozhuang 277160, China)

Abstract: Transmission component of terahertz wave in two-dimensional square lattice photonic crystal are studied with the plane-wave expansion method. The square crystal lattice of column and ellipse band gap in two-dimensional photonic crystal are calculated. We design the filter in (0.485~0.503) THz wave, and transmission component of terahertz wave in two-dimensional square lattice photonic crystal of ellipse are studied when the column change a little. This research provides a theoretic basics for the development of terahertz wave devices.

Key words: terahertz wave; photonic crystal; plan wave expansion method; square lattice; photon density of states

1 引 言

太赫兹(Terahertz, THz)是 Fleming 1974年提出的^[1],它具有安全性好、分辨本领高、透视性高等特点^[2-5],它的这些特性已经成为世界科技界研究的热点,国内一些高校和研究所都进行了有意的探索并取得了一些研究成果^[6-11]。本文应用平面波展开法对太赫兹波段的正方晶格二维光子晶体带隙特性进行了数值分析,主要计算了圆柱组成正方晶格二维光子晶体的最大完全带隙,并且分析了当圆柱发生微小改变形成椭圆柱组成正方晶格二维光子晶体时的带隙特性。同时计算了正方柱组成正方晶格二维光子晶体时的带隙特性,并与圆柱组成正方晶格二维光子晶体的带隙特性比较。得到的结论为太赫兹波段光子晶体带隙的研究提

供了理论依据。

2 平面波展开法

平面波展开法是应用 Bloch 定理,把电磁场分解为 Bloch 波的形式,并且展开为一系列平面波的叠加。此方法是在周期性介电系数分布的物质中对 Maxwell 方程做计算,离散 Fourier 空间,将能带计算简化成代数本征问题的求解。太赫兹波在二维正方晶格光子晶体中的传播特性的研究简化的本征方程如下:

基金项目:山东省教育厅 2007 年度科研发展项目(No. J07W105);山东省科技厅 2007 年科技攻关项目(No. 2007GC30004005)资助。

作者简介:闫昕(1977-),男,硕士,助教,主要从事光子晶体方面的研究。

收稿日期:2008-06-08; **收稿日期:**2008-07-22

$$\sum_{\vec{G}} K(\vec{G} - \vec{G}') (k + \vec{G}') (k + \vec{G}) A(k + \vec{G}') = \frac{\omega^2}{c^2} A(k + \vec{G}) \quad (1)$$

$$\sum_{\vec{G}} K(\vec{G} - \vec{G}') (k + \vec{G}')^2 B(k + \vec{G}') = \frac{\omega^2}{c^2} B(k + \vec{G}) \quad (2)$$

式中,平面波展开系数 $A = \vec{E}_{\vec{k}n}(\vec{G}), B = \vec{H}_{\vec{k}n}(\vec{G}), \frac{\omega_{kn}^2}{c^2}$ 为它们共同的本征值,而 $\vec{E}_{\vec{k}n}(\vec{G})$ 及 $\vec{H}_{\vec{k}n}(\vec{G})$ 为它们的本征向量,其中 \vec{k} 是第一布渊区内的波向, n 是能带指数。考虑每个原胞由介质常数分别为 ϵ_a, ϵ_b 的两种材料组成,此时式(1)和式(2)中的系数可表示为:

$$K(\vec{G}) = \begin{cases} \frac{1}{\epsilon_a} f + \frac{1}{\epsilon_b} (1-f), G=0 \\ (\frac{1}{\epsilon_a} - \frac{1}{\epsilon_b}) f \frac{2J_1(rG)}{r|G|}, G \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, J_1 为 Bessel 函数; f 为填充因子,即介质柱或空气柱占整个晶胞的百分比,对于正方晶格有:

$$f = \frac{S_r}{S_a} = \frac{\pi r^2}{a^2} \quad (4)$$

将式(3)代入式(1)和式(2),即可求出 H 偏振和 E 偏振的本征频率。

光子态密度(density of photon states, DPS)为单位频率下所存在的能态数目,它与光子晶体的透射率及许多实验上观察到的光学性质有密切的关系,数学表达式^[9]为:

$$DPS = \sum_{\vec{k}} \delta(\omega - \omega(\vec{k})) \quad (5)$$

根据公式(5),先对第一 Brillouin 区取样 Bloch 向量^[10],以平面波展开法对计算公式(1)和(2)上用平面波进行展开,然后统计模态数目对能量的分布,即可求得光子态密度。

3 计算分析

3.1 物理模型

空气圆柱组成正方晶格的形状如图 1 所示,是由介电常数为 ϵ_b 的物质构成背景空间,而后周期性的在背景空间挖半径为 r 的圆柱空洞并填入 ϵ_a 的物质,相邻两圆柱柱心相距为 a (即晶格常数为 a),晶格常数取 $a = 0.1\text{mm}$,相对介电常数空气 $\epsilon_a = 1.0$,硅 $\epsilon_b = 11.7$ 。

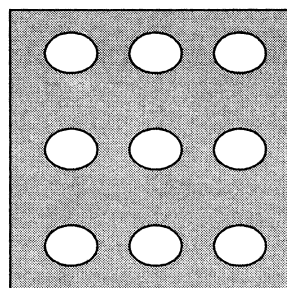


图 1 空气圆柱组成的二维正方晶格光子晶体

空气椭圆圆柱组成的二维正方晶格光子晶体如图 2 所示。

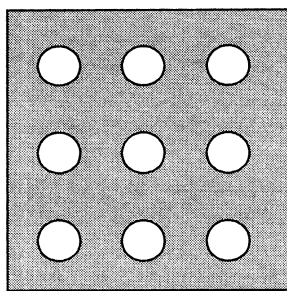


图 2 空气椭圆圆柱组成的二维正方晶格光子晶体

3.2 太赫兹波段传输特性的研究

3.2.1 程序计算及验证

计算时用自编 Matlab 语言和 Fortran 语言编程,计算中取 $n = 15$,用 961 个平面波对介电常数进行展开计算,通过不同 n 取值发现,当 $n > 15$ 后,计算结果收敛的较好,相对误差仅为 0.09%。图 3 表示圆柱组成正方晶格二维光子晶体形成的 TM 模带隙结构,图 3 中出现了四个带隙,图 4 表示圆柱组成正方晶格二维光子晶体形成的 TE 模带隙结构,图 4 中出现了一个带隙,两者形成最大公共带隙,归一化频率带隙范围在 (0.485 ~ 0.503) THz,计算结果与文献[6]中用 Rsoft 软件计算的圆柱组成正方晶格二维光子晶体最大完全带隙结果一致,验证了自编程序的正确性。

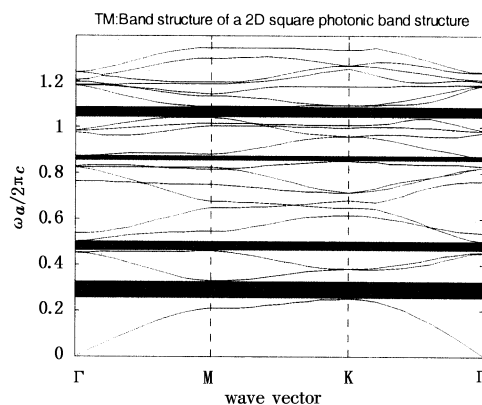


图 3 TM 模带隙结构($r=0.494a$)

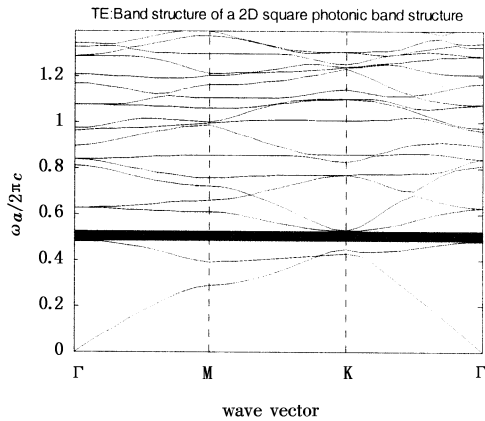


图4 TE模带隙结构($r=0.494a$)

3.2.2 太赫兹波段光子晶体滤波器的设计

数值计算过程中,改变 r 的大小,获得太赫兹波的传输特性。计算发现,对于不同的 r 能得出的带隙频段范围是不一样的,有些频段对于 E 极化波是禁止通过的,对于 H 极化波来说是完全透过的;有些频段对于 H 极化波是禁止通过的,对于 E 极化波来说是完全透过的,而有些频段对于 E 和 H 极化波都是禁止通过的。

图5为 $r=0.494a$ 时电场极化下的光子能态密度(DPS)分布图,图中出现四个带隙,频率在 $(0.28125 \sim 0.32292)$ THz, $(0.485 \sim 0.51042)$ THz, $(0.90625 \sim 0.98958)$ THz, $(1.15042 \sim 1.19042)$ THz 有带隙存在。图3~6为 $r=0.494a$ 时磁场极化下的光子能态密度(DPS)分布图,从图中可以看到出现一个带隙,带隙 $(0.485 \sim 0.503)$ THz。

图5、图6与图3、图4比较,发现正方晶格圆柱光子晶体光子态密度的分布与其能带图的带隙范围符合的较好,其中存在公共带隙的归一化频率段为 $(0.485 \sim 0.503)$ THz。光子晶体能态密度的分布为其存在的能带结构提供了有力的依据。

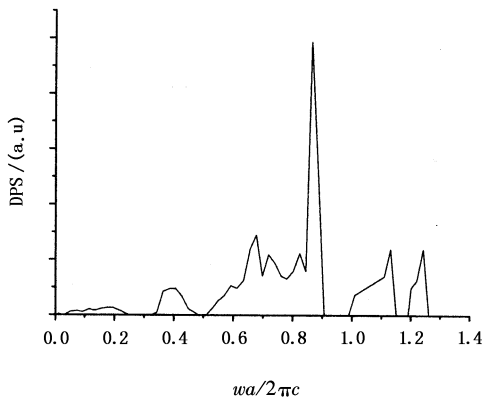


图5 TM模能态密度($r=0.494a$)

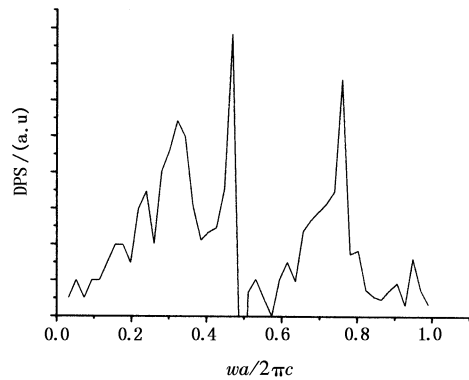


图6 TE模能态密度($r=0.494a$)

图3~图6说明在 $(0.485 \sim 0.503)$ THz 归一化频率段 E 和 H 极化波都是禁止通过的,那么在这一频段可以制作太赫兹光子晶体滤波器,从而也从理论上设计了太赫兹波段圆柱组成正方晶格二维光子晶体滤波器。

3.3 椭圆柱组成正方晶格二维光子晶体

在实际的太赫兹波段光子晶体器件制作时,往往不像理论计算时选择的那么精确,即如果选择圆柱组成正方晶格二维光子晶体,那么在制作时,钻的圆柱孔不能保证百分之百是一个圆形,此时假设圆柱发生微小改变后形成椭圆柱正方晶格二维光子晶体(如图2所示),下面研究这种结构的特性。

图3、图4中是当 $r=0.494a$ 时出现的 TE, TM 模带隙结构,当圆柱发生微小改变形成椭圆柱时,取椭圆两个轴的大小为 $a'=0.494a, b'=0.49a$ 时数值模拟得到如图7、图8所示椭圆柱组成正方晶格二维光子晶体的带隙图。从图中可以看到,当改变圆柱结构时对 TM 模的变化影响较小,而 TE 模影响较大。同样取 $a'=0.494a, b'=0.499a$ 时会得到如图9~10所示相同的结论,由此可见圆柱结构的改变对太赫兹波段带隙的变化有较大的影响。同时可以利用这一特性在太赫兹传输器件的制作时做一微小的改变,选择实际需要的太赫兹波段光子晶体传输器件,如太赫兹光子晶体偏振片,让特定波段的光通过。

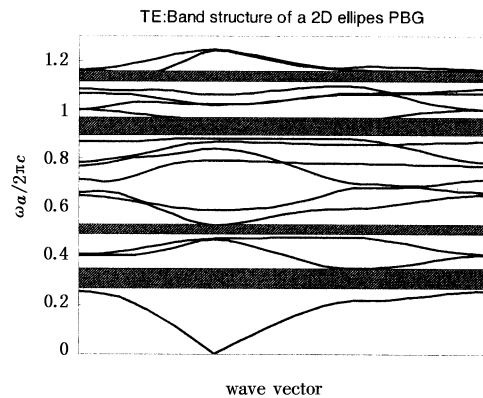
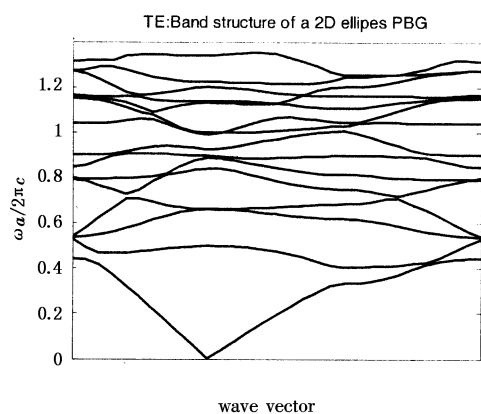
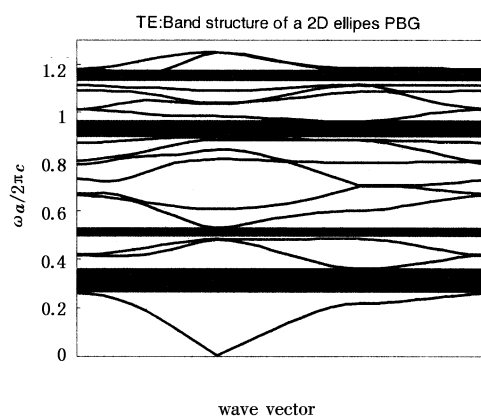
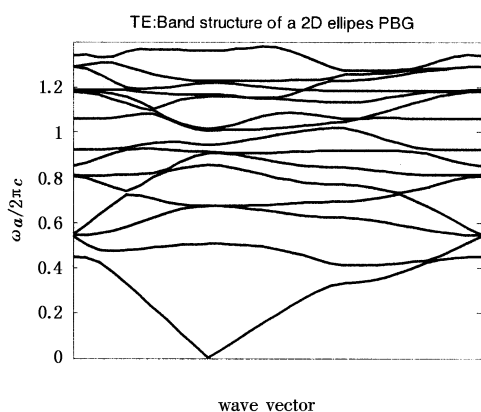


图7 TM模带隙结构 $a'=0.494a, b'=0.49a$

图8 TE 模带隙结构 $a' = 0.494a, b' = 0.49a$ 图9 TM 模带隙结构 $a' = 0.494a, b' = 0.499a$ 图8 TE 模带隙结构 $a' = 0.494a, b' = 0.499a$

4 结 论

文中应用平面波展开法对太赫兹波段的正方晶格二维光子晶体带隙特性进行了数值分析,计算了圆柱组成正方晶格二维光子晶体的最大完全带隙,分析了当圆柱发生微小改变形成椭圆柱组成正方晶格二维光子晶体时的带隙特性,发现圆柱的微小变化对带隙产生了变化,其中对 TM 模影响较小,对 TE 模的影响较大。同时计算了正方柱组成正方晶

格二维光子晶体的带隙特性,并与圆柱组成正方晶格二维光子晶体的带隙特性比较,发现正方柱组成正方晶格二维光子晶体形成的 TE 模带隙较大。计算结果为太赫兹波段光子晶体器件的设计及实验提供了一些理论依据。

参考文献:

- [1] Fleming J W. High resolution submillimeter-wave FT spectrometry of gases [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1974, 22 (12): 1023 - 1025.
- [2] 姚建铨,路洋,等. THz 辐射的研究和应用新进展[J]. 光电子·激光,2005,16(4):504-510.
- [3] 刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展[J]. 中国基础科学,2006,1(12):7-9.
- [4] 许景周,张希成. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京:北京大学出版社,2007:4-6.
- [5] D Schurig, J J Mock, B J Justice, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave requeencies [J]. Science, 2006, 314(5801):977-980.
- [6] H Liu, J Yao, et al. Propagation characteristics of two-dimensional photonic crystals in the terahertz range [J]. Applied Physics B, 2007, 87(1):57-63.
- [7] 闫昕,郑义. 太赫兹波在二维三角晶格光子晶体中的传播特性[J]. 激光与红外,2008,38(3):263-267.
- [8] 胡婕,陈鹤鸣. 光子晶体太赫兹波导的损耗特性[J]. 中国激光,2008,35(4):567-572.
- [9] Alireza Hassani, Alexandre Dupuis, Maksim Skorobogatiy. Low loss porous terahertz fibers containing multiple sub-wavelength holes [J]. Appl. Phys. Lett., 2008, 92 (7): 071101 - 1 - 3.
- [10] Amit Agrawal, Ajay Nahata. Coupling terahertz radiation onto a metal wire using a subwavelength coaxial aperture [J]. Optics Express, 2007, 15(14):9022-9028.
- [11] Yuanliang Zhang, Yao Zhang, Baojun Li. Highly-efficient directional emission from photonic crystal waveguides for coupling of freely propagated terahertz waves into Si slab waveguides [J]. Opt. Express, 2007, 15 (15): 9281 - 9286.