

文章编号: 1001-3806(2009)06-0615-04

## 2 维组合宽带隙光子晶体的研究

姜迎迎, 闫珂柱\*, 王吉科

(曲阜师范大学 物理工程学院, 曲阜 273165)

**摘要:** 为了研究由两种不同的介质柱组合成的 2 维光子晶体的传输特性, 对包层介质柱/基质光子晶体与空气柱/基质光子晶体组合的三角晶格光子晶体进行研究, 采用时域有限差分法, 对其进行模拟计算, 得到多种情况下光子晶体的透射系数与入射光频率的关系曲线。结果表明, 在这种组合结构的光子晶体中, 可以得到从低频到高频的组合宽带隙, 从而达到在更宽范围内控制电磁波传播的目的; 包层介质柱外半径的变化对带隙的宽度影响较大; 包层介质柱的内半径的大小、内柱和中间夹层的介电常数对带隙宽度没有影响, 但是对带隙内的缺陷模有明显的影响。由此可以根据实际需要, 通过调节此种光子晶体的结构参量制作极窄带通的滤波器和光开关等。

**关键词:** 光电子学; 组合带隙; 时域有限差分法; 透射谱

**中图分类号:** O734 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.06.016

### Research of composite wide band gap of 2-D photonic crystal

JIANG Ying-ying, YAN Ke-zhu, WANG Ji-ke

(College of Physics and Engineering, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

**Abstract:** In order to study the characteristics of 2-D photonic crystal constructed with two different medium rods, a triangular lattice photonic crystal constructed with layer medium rods/bottom medium and air rods/bottom medium was studied. By means of finite difference time domain method the curves of transmission coefficients versus incident frequencies under different conditions were obtained. The calculated results showed that a wide gap from low to high frequency appeared in the composite photonic crystal, so the electromagnetic wave could be prohibited in a wide frequency range. The further study showed the width of band gap was influenced by the external radius of layer medium rods, while defect mode in the band gap was greatly influenced by the internal radius, dielectric constant and middle layer's dielectric constant. In fact, it is possible to produce very narrow-band optical filters and switches by regulating the photonic crystal structure parameters.

**Key words:** optoelectronics; composite band gap; finite different time domain method; transmission spectra

### 引言

光子晶体是在 20 世纪 90 年代分别由 YABLONOVITCH 和 JOHN 等人<sup>[1-2]</sup>提出来的, 因其具有控制光子的流动能力而备受关注。光子晶体的结构可理解为折射率周期性排布的一种材料, 在这种折射率呈周期性排布的电介材料中, 当电磁波在其中传播时, 由于在不同的介质面处介质对电磁波的布喇格散射, 电磁波将受到调制而形成能带结构, 并导致在带与带之间出现光子带隙 (photonic band gaps, PBG)。光子晶体的这一特性, 使其有着广泛的潜在应用前景。目前, 光子晶

体在光通讯、光子光纤、通信天线等方面已经取得了突破性的进展, 在不久的将来, 光子晶体的成果必将对信息通讯业产生重大影响。光子晶体的许多应用是基于光子带隙的存在和大小, 带隙宽度越宽, 禁止传播光的频率就越宽, 其应用的范围就越大, 所以, 设计大带隙宽度的光子晶体是光子晶体材料研究的一个基本课题。目前多种 2 维光子晶体结构<sup>[3-10]</sup>已被提出, 通过结构参量优化, 显示出较可观的带隙结构, 而且表明带隙的大小与光子晶体的微结构、介质柱的形状、相对介电常数、填充率等因素有关, 降低光子晶体的对称性是产生大带隙<sup>[11-12]</sup>的有效方法之一。由于 2 组元完整结构的光子晶体的带隙频率位置比较高, 而带有包裹的 3 组元完整结构光子晶体的带隙频率位置比较低, 目前对单一结构的研究比较多, 而对于组合结构的研究相对较少。作者利用时域有限差分法研究 2 维三角晶格光子晶体的组合结构的带隙拓宽, 并研究结构参量对组合带隙的影响。

作者简介: 姜迎迎 (1982-), 女, 硕士研究生, 主要从事光子晶体和电磁场理论研究工作。

\* 通讯联系人。E-mail: yankezh@126.com

收稿日期: 2008-09-08; 收到修改稿日期: 2008-10-28

## 1 计算方法

### 1.1 光子晶体中的麦克斯韦方程

光子晶体的理论研究问题,可以归结为光在光子晶体中的传播问题,于是可以由宏观麦克斯韦方程组来求解。光子晶体的麦克斯韦方程组为:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon(\mathbf{r}) \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{H}, \mathbf{E}$  分别是光子晶体中光波的磁场强度和电场强度,  $\mu_0$  是真空磁导率,  $\varepsilon(\mathbf{r})$  是光子晶体的介电常量,它是空间坐标的函数;有关光子晶体的理论计算的焦点问题就是如何由已知的介电常量  $\varepsilon$  的分布求解上面的麦克斯韦方程组。

### 1.2 时域有限差分法

时域有限差分法 (finite difference time domain, FDTD) 是用对空间和时间的差分代替微分,采用 YEE 最早提出的 2 维时域有限差分方法,将光子晶体单元网格化 ( $\mathbf{E}$  偏振分布见图 1,用  $\Delta x, \Delta y$  表示  $x, y$  方向的空间步长,  $\Delta t$  表示时间步长)。

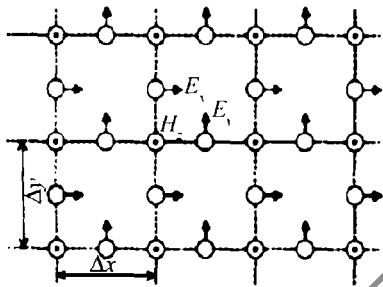


Fig. 1 YEE's 2-D differential lattice

采用中心差分代替上述(1)式微分,就可将麦克斯韦方程转化为迭代形式的 FDTD 形式方程:

$$\left\{ \begin{aligned} H_z^{n+1/2}(i+1/2, j+1/2) &= H_z^{n-1/2}(i+1/2, j+1/2) + \\ &\frac{\Delta t}{\mu(i+1/2, j+1/2)\Delta y} \cdot [E_x^n(i+1/2, j+1) - \\ &E_x^n(i+1/2, j)] + \frac{\Delta t}{\mu(i+1/2, j+1/2)\Delta x} \times \\ &[E_y^n(i, j+1/2) - E_y^n(i+1, j+1/2)] \\ E_x^{n+1}(i+1/2, j) &= E_x^n(i+1/2, j) + \\ &\frac{\Delta t}{\varepsilon(i+1/2, j)\Delta y} [H_z^{n+1/2}(i+1/2, j+1/2) - \\ &H_z^{n+1/2}(i+1/2, j-1/2)] \\ E_y^{n+1}(i, j+1/2) &= E_y^n(i, j+1/2) + \\ &\frac{\Delta t}{\varepsilon(i, j+1/2)\Delta x} [H_z^{n+1/2}(i-1/2, \\ &j+1/2) - H_z^{n+1/2}(i+1/2, j+1/2)] \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中,  $i, j$  分别为网格中  $x, y$  方向的节点序号,对 TM 模式同样可以得到类似的关于  $H_x, H_y, E_z$  计算式。可以

根据离散的 FDTD 时间离散步长公式(2)式获得电磁场的时间演化规律。为了保证迭代收敛得到稳定解,  $\Delta x, \Delta y, \Delta t$  的选择必需满足稳定条件<sup>[13]</sup>:

$$\Delta t \leq [c \sqrt{(\Delta x)^{-2} + (\Delta y)^{-2}}]^{-1} \quad (3)$$

用时域有限差分法研究光子晶体的传输特性时,关心的计算区域是有限的,即光子晶体的体积所占有的空间。当然也可以将所关心的计算区域通过一定的方式无限扩展,形成一个无限的空间。但是,计算机的存储空间和计算速度却不是无限的,而要处理的问题空间却是有限的,是有边界的。用时域有限差分法求解电磁场问题时假定问题空间是无限大的,即是开放的系统。为了解决这种矛盾,让这种有限的空间和无限的空间等效,需要对有限空间的周围边界做特殊处理,使得向边界行进的波在边界处保持“外向行进”的特征,无明显的反射,这就需要在计算中加上边界条件。在计算程序中,采用完全匹配层(perfectly matched layer, PML)边界条件<sup>[13]</sup>和周期性边界条件。

## 2 结果与讨论

### 2.1 理论模型

图 2 中给出了 2 维三角晶格光子晶体的截面图,

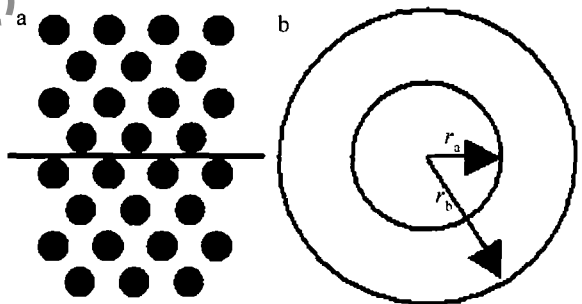


Fig. 2 a—2-D triangular lattice photonic crystal b—schematic diagram of cross section of the layer medium rod

为了作图方便,在  $y$  方向只取了 8 行  $x$  方向 7 列。在计算中取了 3 种模型,第 1 种模型是在基质中打入空气柱,排列方式见图 2a,第 2 种模型是将空气柱换成截面,图 2b 中的包层介质柱,内柱的介质与基质相同,第 3 种模型是将图 2a 中的上半部分空气柱换成包层介质柱。在计算中  $y$  方向取 16 行,在  $z$  方向无限长且均匀,晶格常数  $a$  取为 1.0,即对  $a$  进行归一化。本底基质材料的折射率为 3.24 (InP / GaInAsP 介电常数为 10.5),空气柱介电常数取为 1.0,高斯光源沿  $y$  轴正向入射。 $x$  方向采用周期性边界条件, $y$  方向边界采用完全匹配层边界条件。为了不失一般性,在数据处理作图时,横轴采用归一化频率,纵轴采用归一化透射系数。 $x, y$  方向步长设定为  $\Delta x = \Delta y = 0.05a, \Delta t = 0.95$ 。

2 维光子晶体的透射谱见图 3,虚线代表空气柱/

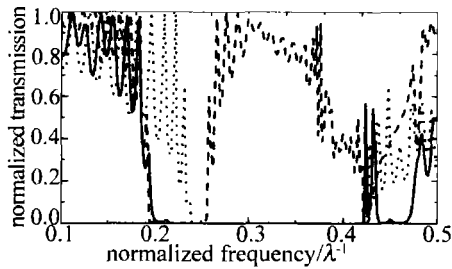


Fig. 3 The transmission spectroscopy of 2-D triangular lattice photonic crystal

基质完整结构的传播系数-频率图,空气柱的半径为 $r_0 = 0.4$ ,带隙在高频区 $0.24(1/\lambda) \sim 0.422(1/\lambda)$ ,这是有Bragg散射引起的带隙,这种带隙的产生与结构的晶格常数、周期排列方式、填充率等因素有关。短划线代表包层介质柱/基质完整结构的传播系数-频率图,包层介质柱外半径为 $r_b = 0.3$ ,内半径为 $r_a = 0.2$ ,带隙在低频区 $0.1995(1/\lambda) \sim 0.2555(1/\lambda)$ ,在高频区没有带隙,实线代表组合结构的传播系数-频率图,这在图中可以明显的看出,组合光子晶体中带隙出现高低频带的衔接,透射谱中带隙宽度明显大于前两者,从低频带隙的低频边到高频带隙的高频边,并且出现第2带隙。

2.2 结构参量对带隙的影响

2.2.1 包层介质柱内半径对带隙的影响 保持空气柱的半径 $r_0$ 不变,包层介质柱的归一化内半径( $r_a$ 变大或变小),但保证包层介质柱的归一化外半径 $r_b$ 与其它介质柱大小一致,即 $r_b = r_0$ ,图4中给出了 $r_a$ 变化中带隙的变化情况,从图中可以看出,随着 $r_a$ 的增大,

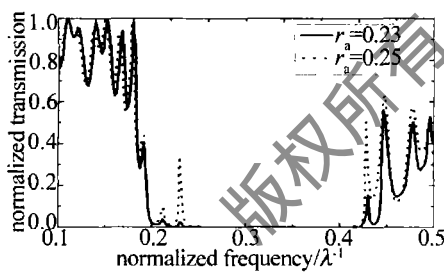


Fig. 4 The transmission spectroscopy with different internal radii

包层厚度( $c_d = r_b - r_a$ )变薄,带隙宽度基本不变。因为在这种情况下,所有散射柱的大小都没有变,即填充率不变,所以带隙也没有变,只是在原带隙内的缺陷模逐渐明显,在带隙的高频边沿透射增强。与图3比较,第2带隙逐渐消失。

2.2.2 包层介质柱外半径对带隙的影响 保持组合结构中空气的半径不变,包层介质柱的内半径保持不变,改变包层外半径( $r_b$ 变大或变小)即改变包裹厚度 $c_d$ ,因此包层胞的填充率也随之改变,图5中给出了透射曲线图,从图中看出随着包裹厚度的增加,带隙宽度减小,具体表现为带隙的高频边沿基本不动,低频边沿向高频移动。由于外半径的增大,内半径相对来说

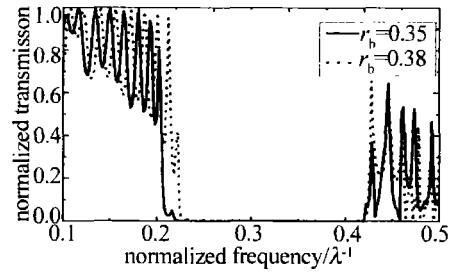


Fig. 5 The transmission spectroscopy with different external radii

是变小,这种情况与参考文献[14]中是一致的。

2.2.3 保持夹层厚度不变,内外半径的大小同时改变对带隙的影响 图6中做出了内外半径分别为0.3和0.4以及0.15和0.25的透射情况,可以看出外半径越大,即填充率大,带隙宽度越大。

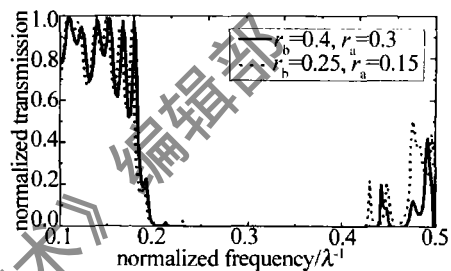


Fig. 6 The transmission spectroscopy with identical middle layer thickness

2.2.4 内柱介电常数对透射特性的影响 包层介质柱的内柱填充介质的介电常数变化时(3, 5, 8, 11, 14, 19, 23),结果发现随着介电常数的增大,第1带隙宽度没有很大的变化,但是在第1带隙与第2带隙之间的通带的宽度明显变窄,图7中给出了介电常数为5和14时的透射曲线,从图中可以看出在归一化频率0.45附近,介电常数为14的透射带远窄于介电常数为5时的透射带。

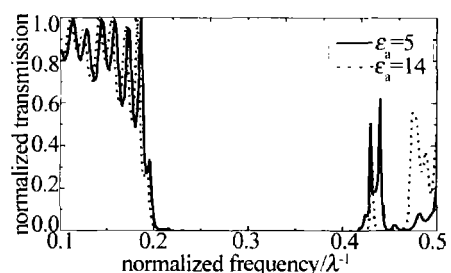


Fig. 7 The transmission spectroscopy with different dielectric constants of internal rods

2.2.5 夹层介电常数对带隙的影响 取夹层的介电

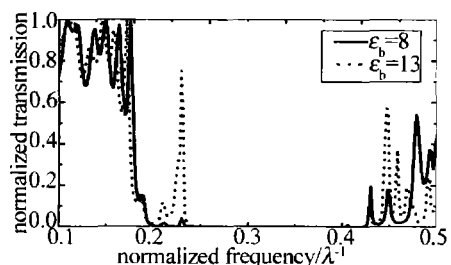


Fig. 8 The transmission spectroscopy with different dielectric constants of middle layer

常数为3,5,8时,带隙基本没有变化,即夹层的介电常数低于基质时,带隙及带隙内的缺陷模均保持不变。图8为中间夹层的介电常数是8和13时光子晶体的透射谱,从图中可以看出,夹层的介电常数高于基质比低于基质时带隙内的缺陷模明显地增大。

### 3 结论

用FDTD法计算了由包层介质柱/基质光子晶体与空气柱/基质光子晶体组合的光子晶体的传输特性,发现这种组合的光子晶体的带隙宽度为 $0.222(1/\lambda)$ ,远大于单一结构的光子晶体带隙(介质柱/基质光子晶体的带隙宽度为 $0.182(1/\lambda)$ ,空气柱/基质光子晶体的带隙宽度为 $0.056(1/\lambda)$ )。调节包层介质柱外半径的大小,可以控制带隙的宽度;调节包层介质柱内半径的大小、内柱或者夹层的介电常数,不改变带隙的宽度,却可以使带隙内的缺陷模发生明显的变化,尤其是增大夹层的介电常数大于基质的介电常数时,带隙内的通带更加明显。如果保持介质柱的外半径不变,这种光子晶体的带隙相当稳定,通过调节包层介质柱内半径的大小,内柱或夹层的介电常数,就可以使原来处于带隙内的某一频率波透过光子晶体。为更好地实现光子晶体的导光和滤波作用提供了理论基础,可以用来做滤波器、光开关和波导等。

### 参考文献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [2] JOHN S. Strong localization of photons in disordered dielectric superlattices [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [3] MALDOVAN M, THOMAS E, CARTER C. Layer-by-layer diamond-like woodpile structure with a large photonic band gap [J]. A P L, 2004, 84(3): 362-364.
- [4] FENG Sh Sh, SHEN L F, HE S L. A two-dimensional photonic crystal formed by a triangular lattice of square dielectric rods with a large absolute band gap [J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(5): 1540-1544 (in Chinese).
- [5] LI X Ch, LIANG H Y, YI X Y, *et al.* The study of two-dimensional composite materials with wide band gap [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(5): 2784-2790 (in Chinese).
- [6] GUAN Ch Y, YUAN L B. Analysis of band gap in honeycomb photonic crystal heterostructure [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(3): 1244-1248 (in Chinese).
- [7] QIU M. Effective index method in heterostructure slab waveguide based two-dimensional photonic crystals [J]. A P L, 2002, 81(7): 1163-1165.
- [8] XIAO S Sh, SHEN L F, HE S L. Large complete band gap at low and high frequencies in a two-dimensional anisotropic photonic crystal [J]. Acta Physica Sinica, 2002, 51(12): 2858-2865 (in Chinese).
- [9] ZHAO M M, LÜ Y W, XU J X. Effect of rotation on photonic band gap of two-dimensional square lattice photonic crystal with hollow rod [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(2): 1061-1066 (in Chinese).
- [10] FANG Y T, SHEN T G, TAN X L. Absolute photonic band gaps of 2-D cubic compound lattice [J]. Laser Technology, 2004, 28(4): 344-351 (in Chinese).
- [11] ANDERSON C M, GIAPIS K P. Larger two-dimensional photonic band gaps [J]. Phys Rev Lett, 1996, 77(4): 2949-2952.
- [12] LI Zh Y, GU B Y, YANG G Zh. Large absolute band gap in 2-D anisotropic photonic crystal [J]. Phys Rev Lett, 1998, 81(12): 2574-2578.
- [13] WANG B Zh. Calculation electromagnetic [M]. Beijing: Science Press, 2002: 52-56 (in Chinese).
- [14] TANG B Sh, YIN G W, XU J L, *et al.* Study on the transmission spectra of two-dimension photonic crystals with layered composite medium cylinder [J]. Laser Technology, 2007, 31(2): 127-130 (in Chinese).
- (上接第614页)
- [7] JEONG Y, NILSSON J, SAHU J K, *et al.* Single-frequency, single-mode, plane-polarized ytterbium-doped fiber master oscillator power amplifier source with 264W of output power [J]. Opt Lett, 2005, 30(5): 459-461.
- [8] GU J X, XU C H. Comprehensive analysis of noise characteristics of EDFA [J]. Acta Electronica Sinica, 1995, 23(5): 54-58 (in Chinese).
- [9] ZHAN Y, ZHENG Y, ZHAO Y H, *et al.* The gain and noise characteristics of double cladding ytterbium-doped fiber amplifiers at different pump modes [J]. Laser Technology, 2007, 31(1): 50-53 (in Chinese).
- [10] ZHAO Z Y, DUAN K L, WANG J M, *et al.* Experimental study of characteristics of high power photonic crystal fiber amplifier [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(10): 6335-6339 (in Chinese).
- [11] PASCHOTTA R, NILSSON J, TROPPER A C, *et al.* Ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. IEEE J Q E, 1997, 33(7): 1049-1056.
- [12] KELSON I, HARDY A A. Strongly pumped fiber lasers [J]. IEEE J Q E, 1998, 34(9): 1570-1577.
- [13] WU Z L, CHEN G F, WANG X H, *et al.* Numerical analysis of Yb<sup>3+</sup> doped double clad fiber laser [J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(3): 332-336 (in Chinese).
- [14] FÉVRIER S, GAPONOV D D, ROY P, *et al.* High-power photonic-bandgap fiber laser [J]. Opt Lett, 2008, 33(9): 989-991.