

文章编号: 1001-3806(2010)03-0294-03

## 2 维混合介质柱光子晶体传输特性的研究

赵艳, 王海龙\*

(曲阜师范大学 物理工程学院, 曲阜 273165)

**摘要:** 为了研究晶体结构对电磁波传输特性的影响, 提出了一种空气平板层和圆形复合介质柱混合组成的新型 2 维混合介质柱光子晶体结构。采用时域有限差分法对其进行了数值模拟和计算, 研究了改变混合介质柱的形状和结构参量对晶体透射特性的影响。结果表明, 该结构可以基本保留组合前光子晶体的主带隙, 并且在新的频段产生新的禁带; 在混合结构中将复合介质柱换为简单介质柱没有新的禁带产生。通过改变相关参量发现, 增加介质平板的宽度, 这增大内嵌介质柱的半径都有利于新禁带的产生。2 维混合介质柱光子晶体比单一介质柱光子晶体有更多的可调因素, 这为相关光子晶体器件的设计提供了理论依据。

**关键词:** 光电子学; 光子晶体; 时域有限差分法; 混合结构; 光子带隙

**中图分类号:** O734 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.03.002

### Properties of 2-D hybrid photonic crystal

ZHAO Yan, WANG Hai-long

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

**Abstract:** In order to study the effect of the structure of photonic crystal on electromagnetic wave transmission characteristics, a new 2-D hybrid photonic crystal structure was proposed. By means of finite difference time domain method, the optical transmission properties of 2-D hybrid photonic crystals were studied. Furthermore, it was also studied how the shape and structural parameters affect transmission properties of photonic crystal. The results show that the new structure not only maintain the primary band gap of the former structures but also produce a new band gap. Compared to the compound dielectric cylinder, the simple one has not produced a new band gap. Both increasing the width of medium plate and the radius of embedded concentric circle are in favor of the new band gap emerging. The theory basis of the design of photonic devices is provided.

**Key words:** optoelectronics; photonic crystals; finite difference time domain method; hybrid structure; band gap

### 引言

光子晶体<sup>[1]</sup>是一种介电常数随空间周期性变化的新型光学微结构材料, 其结构和性质跟固体晶体类似, 其周期为光波长数量级, 于 1987 年分别由 JOHN 和 YABLONOVICH<sup>[2]</sup>各自提出。由于光子晶体具有光子局域、抑制自发辐射效应、光的超棱镜效应、负折射效应<sup>[3]</sup>、双折射现象、能量转移、光子压缩态、多稳态及光学限制等特性, 使得光子晶体成为近年来深受关注的研究方向。目前光子晶体在光通讯、光子光纤<sup>[4]</sup>、通信天线等方面已经取得了突破性的进展。另外, 它还在微腔激光器、滤波器<sup>[5]</sup>、光开关、新型波

导<sup>[6]</sup>、光子晶体偏振器件等领域都具有广泛的应用。

光子禁带是光子晶体最根本的特性, 由于光子禁带与光子晶体折射率、厚度、层数、组成次序和结构等因素有关, 人们试图改变各种因素来研究光子晶体的禁带特性, 出现了组合光子晶体和混合介质柱<sup>[7-8]</sup>光子晶体。3 维光子晶体具有更为广泛的应用潜力, 但是在可见光和红外波段制作这样的微型结构比较困难。相比较而言, 2 维<sup>[9-10]</sup>光子晶体既有着重要的应用, 又相对比较容易制造。

本文中提出了一种新型 2 维混合介质柱光子晶体结构, 利用时域有限差分法对其传输特性进行了研究, 研究结果对光子晶体器件的设计有一定的指导意义。

### 1 计算方法

在 2 维光子晶体中电磁场通常可以分为横电 (transverse electric, TE) 模和横磁 (transverse magnetic, TM) 模两种, 其中 TE 模是指在传播方向上有磁场分量但无电场分量的光波模式, TM 模是指在传播方向上有

基金项目: 曲阜师范大学博士科研启动基金资助项目 (XJ0622)

作者简介: 赵艳 (1983-), 女, 硕士研究生, 主要从事光子晶体和光通信方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: phyhlwang71@126.com

收稿日期: 2009-07-08; 收到修改稿日期: 2009-09-07

电场分量而无磁场分量的光波模式。传播方向为  $z$  方向的 TE 模在  $x-y$  平面内的电磁场分量有  $H_z, E_x, E_y$ 。传播方向为  $z$  方向的 TM 模在  $x-y$  平面内的电磁场分量有  $E_z, H_x, H_y$ 。本文中采用 TE 模的入射波进行计算。

1.1 TE 波的麦克斯韦方程组

沿  $z$  方向传播的电磁波,在  $x-y$  平面内麦克斯韦方程组为:

$$\begin{cases} \frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial H_z}{\partial y} \\ \frac{\partial E_y}{\partial t} = -\frac{1}{\epsilon} \frac{\partial H_z}{\partial x} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $E_x, E_y, H_z$  分别为电场矢量在  $x, y$  方向和磁场矢量在  $z$  方向的分量,  $\epsilon$  是晶体中介质的介电系数,  $\mu$  是磁导率。

1.2 时域有限差分法<sup>[11]</sup>

时域有限差分法 (finite difference time domain method, 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, 用  $\Delta x, \Delta y$  表示  $x, y$  方向的空间步长,  $\Delta t$  表示时间步长对应的 TE 模差分方程可以写为:

$$\begin{cases} H_z^{n+1/2}(i, j) = H_z^{n-1/2}(i, j) + \frac{\Delta t}{\mu \Delta y} [E_x^n(i, j+1/2) - E_x^n(i, j-1/2)] - \frac{\Delta t}{\mu \Delta x} [E_y^n(i+1/2, j) - E_y^n(i-1/2, j)] \\ E_x^{n+1}(i, j) = E_x^n(i, j) + \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta y} [H_z^{n+1/2}(i, j+1/2) - H_z^{n+1/2}(i, j-1/2)] \\ E_y^{n+1}(i, j) = E_y^n(i, j) - \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta x} [H_z^{n+1/2}(i+1/2, j) - H_z^{n+1/2}(i-1/2, j)] \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $i, j$  分别代表网格中  $x, y$  方向的节点序数,  $n$  为时间步数。通过不断的求解 (2) 式可以得到电磁场的传播规律。

求解电磁场的空间是无限大的, 而时域有限差分法是限制在一个有限的空间内, 因此要利用边界条件来解决模拟带来的限制。其中常用的有 Mur 吸收边界条件、完全匹配层 (perfectly matched layer, PML) 边界条件和周期性边界条件 (periodic boundary condition, PBC)。本文中主要采用 PML 边界条件。在时域有限差分法要得到稳定的解, 时间步长必须受到空间步长的限制,  $\Delta x, \Delta y, \Delta t$  的选择必需满足的稳定条件:

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

2 理论模型与计算结果分析

2.1 理论模型

作者提出了一种平板和复合介质柱组成的新型 2 维混合介质柱光子晶体结构, 在计算时采用如图 1 所

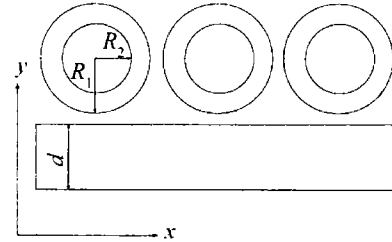


Fig. 1 The diagram of photonic crystal structure

示正方形晶格模型, 线光源向  $y$  轴正向入射, 在  $x$  轴方向采用了周期性边界条件, 在  $y$  方向采用 PML 边界条件。为不失一般性, 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, 程序设计时长度以晶格常数  $a$  为基准。  $x, y$  方向步长设定为  $\Delta x = \Delta y = 0.05a, \Delta t = 0.95$ , 复合介质柱的外半径为  $R_1$ , 内半径为  $R_2$ , 平板介质柱的宽度为  $d, x$  方向上为无限长。

2.2 计算结果分析

2.2.1 混合介质柱对光子晶体传输特性的影响 为了研究混合介质柱光子晶体的传输特性, 取了 3 种模型进行了比较。第 1 种是圆形复合介质柱结构, 其内外半径分别为  $R_1 = 0.36a, R_2 = 0.26a$ , 基底和内嵌介质柱的介电常数  $\epsilon = 10.5$ , 中层为空气柱。第 2 种是介质平板结构取平板的宽度  $d = 0.3a$ , 平板的介电常数  $\epsilon = 1$ , 即空气平板层。第 3 种空气平板层隔层插入圆形复合介质柱构成混合结构的光子晶体, 空气平板层的厚度  $d = 0.3a$ , 圆形复合介质柱内外半径分别为  $R_1 = 0.36a, R_2 = 0.26a$ 。为了保持一致性计算中在  $y$  方向上都取 16 列, 在  $x$  方向上采用周期性边界条件。通过计算得到图 2。在图 2 中实线为复合介质柱结构

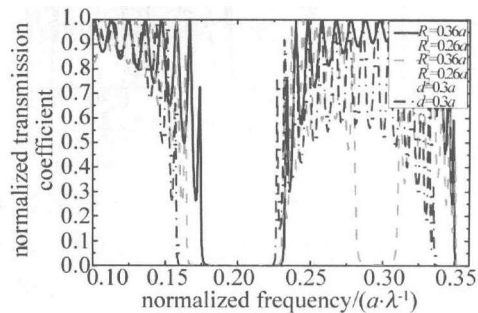


Fig. 2 The transmittance of simple and hybrid structure

的透射谱, 点划线为介质平板结构的透射谱, 虚线为混合结构光子晶体的透射谱。通过比较可以看出, 对于

圆形复合介质柱和介质平板结构在低频和中频都只有一个光子禁带,均无新的完全禁带产生。当两种结构组成新的混合结构光子晶体时,光子晶体的主带隙没有较大的变化,但是在新的频段上出现了新的禁带。

**2.2.2 将圆形复合介质柱变为简单介质柱对透射特性的影响** 为了研究复合介质柱对混合光子晶体传输特性的影响,将复合介质柱换成简单的半径为  $0.36a$  圆形介质柱,其它条件保持不变进行了比较,结果如图3所示。由图3看出,复合介质柱和介质平板组成混合结构的光子晶体有新的禁带产生,而简单的圆形介质柱和介质平板组成混合结构的光子晶体没有新的禁带产生。这说明在混合结构中,通过改变其它结构参量可以有效地改变复合介质柱的传输特性。这一结果有利于进一步了解复合介质柱的特性。

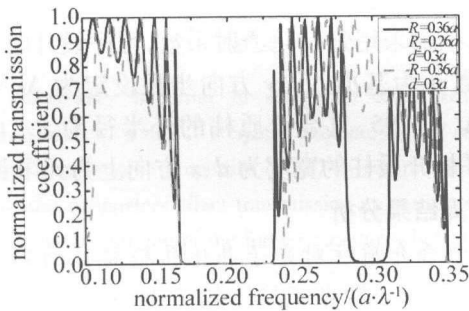


Fig. 3 The transmittance of simple and hybrid cylinder

**2.2.3 改变介质平板宽度对透射特性的影响** 为了继续研究混合介质柱光子晶体传输特性的影响,改变介质平板的宽度  $d$  作了进一步的研究,在计算中取介质平板的宽度分别为  $0.2a$ ,  $0.3a$  和  $0.4a$ 。

由图4可以看出,随着介质平板宽度的增加,主禁

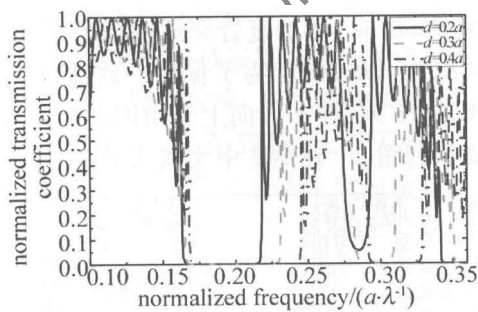


Fig. 4 The transmittance of the cylinder in different width

带的宽带逐步增加,并且中心频率开始向高频方向移动。这是因为随着平板介质层宽度的增加,光子晶体的填充比变大,因此其带隙变宽,这与有关文献中记载的相一致。同时可以看到,当介质平板的宽度增加时,新的禁带逐渐变宽,中心频率向高频方向移动,与主带隙的变化规律相一致,当介质平板的宽度变为  $0.2a$  时,新的完全禁带消失,只出现一个准禁带,这是因为

随着平板介质层的变小,光在平板表面得散射变小,不足以形成新的禁带。

**2.2.4 改变复合介质柱内层介质柱的半径对透射特性的影响** 为了研究内嵌介质柱对传输特性的影响,取平板空气层的宽带为  $d=0.2a$ ,保持圆形复合介质柱外层圆孔的大小不变即  $R_1=0.36a$ ,分别对  $R_2$  为  $0.1a$ ,  $0.2a$  和  $0.3a$  的情况进行了进一步的研究。

通过图5发现,随着内嵌介质柱半径的增加,禁带宽度明显变窄,这与空气平板的变化规律相反,与复合介质柱变化对带隙影响的规律相一致。通过研究发现,调节内嵌介质柱的半径可以达到调节带隙的目的。随着内嵌介质柱半径的增大,中频段开始产生新的禁带,当内嵌介质柱的半径为  $R_2=0.3a$  时已经产生了一个完全禁带。通过图5可以看出,内嵌介质柱的半径越大,越容易产生新的禁带。因此可知,在混合结构中,改变复合介质柱的参量,可以达到有效地调节和改变光子带隙的目的。

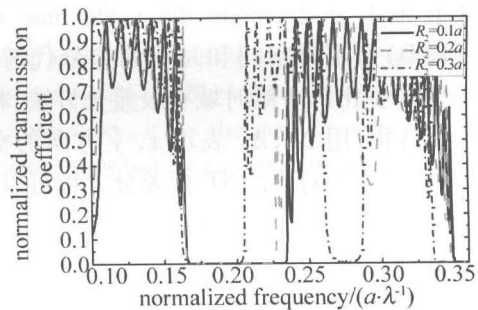


Fig. 5 The effect of the radius of the cylinder  $R_2$  on the width of the band gap

### 3 结论

用时域有限差分法对2维混合介质柱光子晶体的传输特性进行了详细的数值分析与研究。从以上的计算与分析结果可知,对于复合介质柱的光子晶体,当插入介质平板时,光子晶体的禁带宽度发生变化并且有新的禁带产生。在混合结构中,将复合介质柱换成简单介质柱发现,简单介质柱和介质平板组成的混合介质柱光子晶体无新的禁带产生,这一结果有利于人们更好地了解复合介质柱的性质。增加介质平板的宽度、增大内嵌介质柱的半径都有利于新禁带的产生。在混合结构中,改变复合介质柱的参量,可以达到有效地调节和改变光子带隙的目的。本研究为相关光子晶体器件的设计提供了理论依据。

### 参考文献

- [1] CREGAN R F, MANGAN B J, KNIGHT J C, et al. Single-mode photonic band gap guidance of light in air[J]. Science, 1999, 285 (5433): 1537-1540.

(下转第315页)

所示,从曲线中可以看出,此方法具有很好的线性度。由于海水盐度的最大值为4%,在实验中,每次改变盐溶液的盐度0.4%,得到的实验曲线如图2b所示,同样具有较好的线性度,从而证明了此种方法具备简单、快速、准确度及灵敏度高的特点。

从实验曲线可以看到,随着盐度的增大,光功率计接收到的功率值逐渐减小。在此实验中,入射光的导入与反射光的收集是同一根光纤在同一位置来完成,这样就避免了光纤的移动和调整装置;同时,由菲涅耳公式可知,光纤端面的角度并不影响反射功率的大小,这样就大大提高了整个实验系统的准确度和灵敏度。

此测量方法的灵敏度为:

$$dn = \frac{\left( \frac{n_{\text{fiber}} - n_{\text{air}}}{n_{\text{fiber}} + n_{\text{air}}} \right)^2}{P_{\text{air}} - P_0} \cdot \frac{[(n_{\text{fiber}} + n_{\text{salt}})^2 + k_{\text{salt}}^2]^2}{4n_{\text{fiber}}(n_{\text{fiber}}^2 - n_{\text{salt}}^2 - k_{\text{salt}}^2)} \cdot dP \quad (11)$$

式中, $dP$ 表示功率计可以分辨的最小的功率变化值。在此实验条件下,功率计可以分辨的功率值为 $dP = 0.01 \text{ dBm}$ 。

在本实验中,由于采用的光源为ASE光源,接收端接收1550nm波段的光功率值,入射光的光功率值较小。因此,适当地增加入射光的光功率值(如采用1550nm的半导体激光器),可以提高测量的准确度和灵敏度。同时,值得注意的是,每次进行测量之前,都需要对当下测量环境中的空气和水的测量值进行标定,以求得到最为准确的测量结果。

### 3 结论

作者应用菲涅耳原理设计了一种简单、快速、准确

的海水盐度测量方法。测量的分辨率好于0.4%,适当地调整实验装置的参量可以进一步提高测量的精确度。本方法不仅可以应用到海水的盐度测量方面,理论上可以应用到任何气体、液体和固体的浓度(折射率)的测量,是一种较为便捷的测量方法。此方法可以进一步应用到折射率的实时监测,适用于工业的在线检测折射率。

### 参 考 文 献

- [1] ZHAO Y, HU K B, CHEN S Zh, *et al.* Recent development of the sea-water salinity measurement technology[J]. *Opto-electronic Engineering*, 2008, 35(11):38-44 (in Chinese).
- [2] HAN Y W, LI X G, CHEN R. An optical fiber sensor for salinity measurement[J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2005, 14(4):308-310 (in Chinese).
- [3] KO W S, OH S B, KIM S H, *et al.* Development of fiber type surface plasmon resonance sensor for protein detection[J]. *SPIE*, 2004, 5272:100-109.
- [4] WU Y C, YUAN Y F. Research of a novel principle on sea-water salinity measurement based on refractive index change[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(2):199-202 (in Chinese).
- [5] ZHAO Y, LIAO Y B, ZHANG B, *et al.* Monitoring technology of salinity in water with optical fiber sensor[J]. *Lightwave Technology*, 2003, 21(5):1334-1338.
- [6] ZHAO Y, ZHANG B, LIAO Y B, *et al.* Experimental investigation of salinity measurement based on optical-electrical dual-differential methods [J]. *SPIE*, 2002, 4920:496-500.
- [7] GAO Y, YANG K Ch, XIA M. Discussion about angular distribution of Brillouin scattering intensity[J]. *Laser Technology*, 2004, 28(4):420-423 (in Chinese).
- [8] LIU Ch Y, YU Y L, GAO Y J. Fiber Refractometer Based on the Fresnel's Principle[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2004, 15(12):1464-1466 (in Chinese).
- [9] LIU T L, CHEN X F, DI Z, *et al.* Measurement of the magnetic field-dependent refractive index of magnetic fluids in bulk[J]. *Chinese Optics Letter*, 2008, 6(3):195-196.
- [2] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(20):2059-2062.
- [3] ZHANG B, WANG Zh. Antireflection coating for two dimensional air hole type photonic crystal negative refraction slab lens [J]. *Acta Physics Sinica*, 2007, 56(3):1404-1408 (in Chinese).
- [4] PAN Y Zh, ZHANG J, HU G J, *et al.* Photonic crystal fiber and laser [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(1):48-51 (in Chinese).
- [5] LIU Q N. The design of double channel polarization tunable filter of photonic crystal[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(1):84-87 (in Chinese).
- [6] HUANG C H, LAI Y H, CHENG S C, *et al.* Modulation instability in nonlinear coupled resonator optical waveguides and photonic crystal waveguides[J]. *Optics Express*, 2009, 17(3):1299-1307.
- [7] HAMAM R E, IBANESCU M, JOHNSON S G, *et al.* Broadband super-collimation in a hybrid photonic crystal structure [J]. *Optics Express*, 2009, 17(10):8109-8118.
- [8] 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).
- [9] SHEN X P, HAN K, SHEN Y F, *et al.* Self-collimation of unpolarized electromagnetic waves in 2-D photonic crystals [J]. *Acta Physics Sinica*, 2006, 55(6):2760-2765 (in Chinese).
- [10] RONG Ch C, YAN K Zh, XIE Y M. The distribution of the electric field in two dimension photonic crystals [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(1):75-79 (in Chinese).
- [11] SULLIVAN D M. Electromagnetic simulation using the FDTD method [M]. New York: Electrical Engineering Department University of Idaho, 2000:1-176.

(上接第296页)