

文章编号: 0253-2239(2009)04-1070-05

# 含缺陷平板光子晶体十字波导传输特性研究

雍 振<sup>1</sup> 傅海威<sup>1</sup> 乔学光<sup>2</sup> 李 岩<sup>1</sup> 赵大壮<sup>1</sup> 葛 朋<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 西安石油大学光电油气测井与检测教育部重点实验室, 陕西 西安 710065; <sup>2</sup> 西北大学, 陕西 西安 710069)

**摘要** 提出一种在光子晶体十字波导中加入点阵缺陷的特殊结构波导。采用时域有限差分法(FDTD)对该结构的导波特性和数值模拟,计算结果表明:含缺陷结构的光子晶体波导的透射光谱较不含缺陷结构光子晶体波导的透射光谱带宽变得更窄,此结构具有窄带滤波作用。当改变波导中缺陷结构折射率取值时,该波导透射光的中心频率随缺陷介质折射率的增大而线性减小。改变中心缺陷介质柱直径时,该波导透射光波中心频率随介质柱直径的增大也呈逐渐减小趋势。这种光子晶体十字波导可作为一种窄带滤波器、分光器和可调式选频器等器件,具有一定的应用前景。

**关键词** 光子晶体十字波导; 窄带滤波; 选频; 时域有限差分法

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092904.1070

## Transmission Characteristics of Photonic Crystal Cross Waveguide Containing Defect Structures

Yong Zhen<sup>1</sup> Fu Haiwei<sup>1</sup> Qiao Xueguang<sup>2</sup> Li Yan<sup>1</sup> Zhao Dazhuang<sup>1</sup> Ge Peng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Photoelectricity Gas-oil Logging and Detecting, Ministry of Education Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China  
<sup>2</sup> Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China

**Abstract** A new kind of photonic crystal cross waveguides with defect structure is proposed. The transmission characteristics are simulated by finite difference time domain method (FDTD). The obtained results show that the spectrum line-width of transmitted light through the photonic crystal waveguide containing defect structure is much narrower than that in the prototype waveguide without defect structure. This waveguide possesses narrow band filtering function. When the defect medium refractive index is increased, the center frequency of the transmitted spectrum decreases linearly. When the diameter of defect medium center pillar in increased, the center frequency of the transmitted spectrum is reduced. It is expected that this type of defect photonic crystal wave guides may serve as new narrow band filter, light splitter and tunable frequency selector.

**Key words** photonic crystal cross waveguide; narrow band filtering; frequency selector; finite difference time domain method

## 1 引 言

在光子晶体中,由于介电常数周期性分布而使其具有与半导体中电子态类似的带隙结构<sup>[1]</sup>,成为近年来研究热点。在这种结构中,光波经过周期介质散射后,有些波段的电磁波强度会因破坏性干涉成指数衰减而无法传输,于是频谱上形成光子禁带<sup>[2]</sup>。光子晶

体的许多应用都是基于光子晶体的禁带效应。

对于二维光子晶体的设计理论上也有一些经验的方法<sup>[3]</sup>。平板光子晶体十字波导是基于平板光子晶体直角波导的一种特殊结构,处于光子晶体禁带中的光能够在其中无损耗传播。大量的理论<sup>[4~5]</sup>和实验研究表明,即使对于直角转弯的波导,光子晶体

收稿日期: 2008-07-16; 收到修改稿日期: 2008-10-06

基金项目: 国家自然科学基金(60654001,69877025)、国家 863 计划(2007AA032413,2002AA313150)和西安市重大技术创新(GG06004)资助课题。

作者简介: 雍 振(1982-),男,硕士研究生,主要从事电磁场数值模拟方面的研究。E-mail: yongzhen1982@yahoo. cn

导师简介: 傅海威(1966-),男,博士,教授,主要从事光纤传感理论与技术方面的研究。E-mail: hwf@xssyu. edu. cn

波导都能有效的传播电磁波,所以光子晶体十字波导器件是耦合器、分光器的基础结构器件。孟庆生等<sup>[6]</sup>研究了一维光子晶体谐振腔的传输特性,刘静等<sup>[7]</sup>对二维平板光子晶体波导的耦合特性及滤波特性进行了研究,Fan<sup>[8]</sup>和 Qiu<sup>[9]</sup>等还研究了基于谐振腔的二维光子晶体信道过滤器和高阶信道过滤器以及多个谐振腔构成的信道过滤器。二维光子晶体十字波导是一种新的结构,对它的传输特性的研究具有一定的理论意义和应用价值。

本文采用电磁场时域有限差分方法<sup>[10]</sup>首先对一种平板光子晶体十字波导的传输特性进行了计算模拟,研究了在十字波导中心位置加入相对介电常数特殊分布的点阵缺陷后此波导对入射光波产生的窄带滤波效应。通过改变这些点缺陷的折射率值,透射光谱的中心频率会随着缺陷结构的介电常数增加而呈线性降低。改变缺陷点阵中心介质柱直径,透射光谱中心频率随介质柱直径的增大而减小。本文提出的这种光

子晶体结构,在窄带滤波和可调式选频器中有着应用前景。

## 2 FDTD 理论

时域有限差分(FDTD)方法是时域求解 Maxwell 方程的有效方法之一,它被广泛应用于电磁场与电磁波计算问题中。平板光子晶体波导是一种线性各向同性介质,光波在光子晶体介质中传播满足 Maxwell 方程组,其二维 TM 模式表达式为

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} = -u \frac{\partial H_x}{\partial t} - \sigma_m H_x$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial x} = u \frac{\partial H_y}{\partial t} + \sigma_m H_y$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} + \sigma E_z$$

将以上公式进行差分离散,可以得到用于模拟计算的  $H_x, H_y, E_z$  各场分量的差分表达式。

$$H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) = CP(m) \cdot H_x^{n-1/2}(i, j+1/2) - CQ(m) \cdot \frac{E_z^n(i, j+1) - E_z^n(i, j)}{\Delta y}$$

$$H_y^{n+1/2}(i+1/2, j) = CP(m) \cdot H_y^{n-1/2}(i+1/2, j) + CQ(m) \cdot \frac{E_z^n(i+1, j) - E_z^n(i, j)}{\Delta x}$$

$$E_z^{n+1}(i, j) = CA(m) \cdot E_z^n(i, j) + CB(m) \cdot$$

$$\left[ \frac{H_y^{n+1/2}(i+1/2, j) - H_y^{n+1/2}(i-1/2, j)}{\Delta x} - \frac{H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) - H_x^{n+1/2}(i, j-1/2)}{\Delta y} \right]$$

在进行数值模拟计算时,采用 Berenger 完全匹配层(PML)作为吸收边界<sup>[11]</sup>。对于二维计算,考虑到数值稳定性的要求有

$$c\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2}}}$$

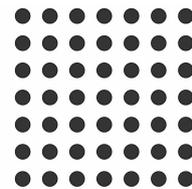
激励源为高斯脉冲激励源,其数值模拟表达式为

$$E(t) = \exp\left(\frac{4\pi(t-t_0)^2}{\tau^2}\right)$$

利用 FDTD 方法可以求得光波在光子晶体中的传播规律。

## 3 光子晶体模型

采用时域有限差分法对由圆柱形介质柱阵列构成的二维正方晶格光子能带进行了计算。光子晶体的结构如图 1(a)所示。其中介质柱的相对介电常数  $\epsilon=9$ ,介质柱以外的部分为真空,其相对介电常数  $\epsilon=1$ 。相邻介质柱的中心距离即晶格常数为  $a$ ,介质柱半径为  $r$ , $r$  与  $a$  的比值为 0.2。



(a)

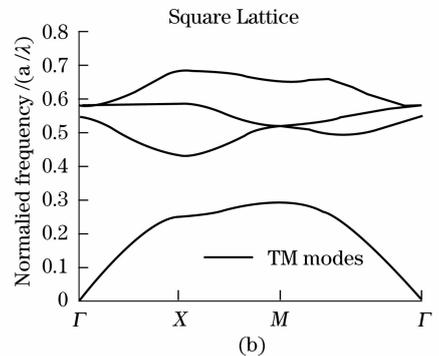


图 1 二维光子晶体结构(a)及能带(b)

Fig. 1 Two-dimension photonic crystal structure (a) and energy band (b)

数值计算得到的光子晶体能带如图 1(b)所示。

可以看出该结构的光子晶体在 TM 模式下存在两个光子能带。一个带隙为  $0.29 < a/\lambda < 0.49$ , 另一个带隙为  $0.68 < a/\lambda < 0.80$ 。当晶格常数  $a = 640 \mu\text{m}$  时, 此正方晶格光子晶体的带隙范围分别是  $1.36 \times 10^{11} \text{ Hz} < f < 2.30 \times 10^{11} \text{ Hz}$  和  $3.19 \times 10^{11} \text{ Hz} < f < 3.90 \times 10^{11} \text{ Hz}$ 。

二维光子晶体十字波导的具体参数为:  $19 \times 17$  平板光子晶体, 如图 2(a) 所示。引入点阵缺陷结构如图 2(b) 所示, 点阵介质相对介电常数值小于周围介质柱的介电常数值, 中心介质圆柱直径  $d = 0.78a$ 。在  $P$  点记录透射波强度  $E_z$ 。

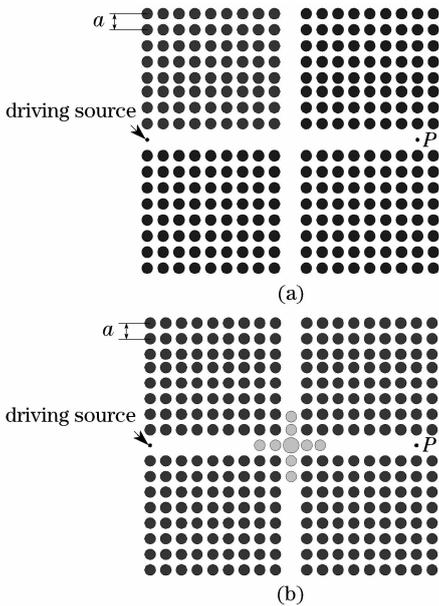


图 2 二维光子晶体十字波导结构图

Fig. 2 Two-dimensional photonic crystal cross waveguide structure

在数值模拟计算中, 采用  $32 \times 32$  的差分网格近似模拟一个光子晶体元胞, 吸收边界层数为 10 层元胞网格, 整个计算区域为  $674 \times 546$  格的差分网。

## 4 数值计算

运用时域有限差分法对图 2(a) 所示光子晶体波导传输特性进行模拟。计算空间步长  $dx = 2 \times 10^{-5} \text{ m}$ , 时间步长为

$$dt = \frac{0.95}{c \cdot \sqrt{\frac{2}{(\Delta x)^2}}}$$

当激励源频率为  $3.0 \times 10^{11} \text{ Hz}$  的单频连续正弦信号进行模拟, 计算 2000 时间步后, 场强  $E_z$  分布如图 3 所示。可以看出该频率落入该光子晶体波导禁带中, 绝大部分光波被限制在光子晶体波导里, 仅

有很少的泄漏。

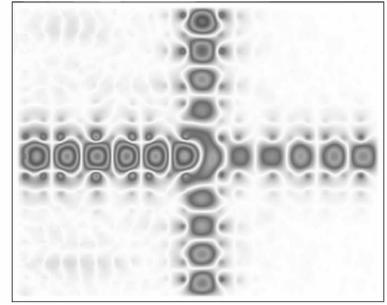


图 3 激励频率  $f = 3.0 \times 10^{11} \text{ Hz}$  计算 2000 步后  $E_z$  场强分布

Fig. 3 Electric field intensity distribution with source frequency  $f = 3.0 \times 10^{11} \text{ Hz}$

采用高斯脉冲作为激励源时, 取  $\tau = 2.5 \times 10^{-12} \text{ s}$ , 脉冲截止频率为  $8.0 \times 10^{11} \text{ Hz}$ 。计算 3000 时间步, 在  $P$  点记录透射光场强  $E_z$ , 将结果进行傅里叶变换后得到其透射谱如图 4 所示。

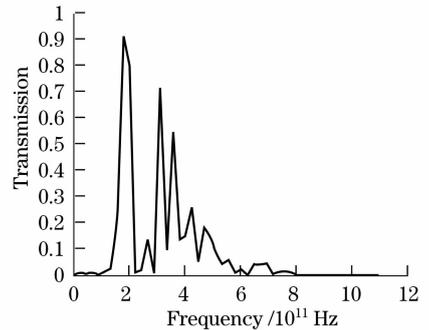


图 4 不含缺陷光子晶体波导的透射谱

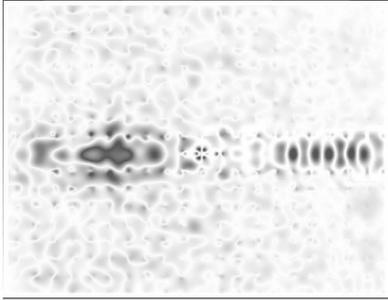
Fig. 4 Transmission frequency spectrum of photonic crystal waveguide without defect

计算结果表明, 该光子晶体波导在截止频率为  $8.0 \times 10^{11} \text{ Hz}$  内的两个带隙, 与其光子能带计算结果相符。当宽带光脉冲穿过不含缺陷的光子晶体十字波导后, 透射谱依然有很宽的带宽。

在十字波导中心加入点阵缺陷, 如图 2(b) 所示, 缺陷介质相对介电常数  $\epsilon = 8.0$ , 激励源采用截止频率为  $6.0 \times 10^{11} \text{ Hz}$  的高斯脉冲, 计算 2000 时间步,  $E_z$  场分布如图 5 所示。将记录的透射光强作傅里叶变换分析, 结果如图 6 所示。

由于加入缺陷后在十字波导中心位置形成类似谐振腔结构, 该谐振腔具有固定的谐振频率。当入射宽带光源经过该谐振腔时, 谐振腔将频率与自身谐振频率相同的频率下载下来, 而频率不在其谐振频率范围内的光波由于反射或散射而快速衰减无法传播。所以将图 6 与图 4 比较可以发现大部分频率被滤去了, 只剩下非常单一的频率存在, 表明此类光

子晶体结构有良好的窄带滤波性能。从计算结果还可以看出由于十字波导的分光作用,将入射端射进的光分成三束分别在十字波导的另三个端口中传输。由于  $P$  点所在波导与入射端波导在一条直线上,记录的透射光强度较强,为  $0.4I$ ,而垂直于入射端波导中的透射波强度较弱。



5 高斯脉冲在含缺陷波导中传播 2000 步后  $E_z$  场强分布  
Fig. 5 Electric field intensity distribution after Gaussian pulse propagating 2000 steps in the waveguide containing defect structures

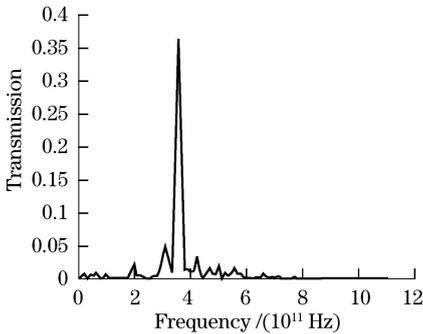


图 6 加入缺陷介质后十字波导的透射谱  
Fig. 6 Transmission spectrum of this cross waveguide after inserting into defect structure

分别模拟计算中心点阵介质柱相对介电常数  $\epsilon$  分别为 8.0 和 10.0 时的透射频谱,得到结果如图 7 所示。发现随着点阵缺陷介质柱折射率的增大,透射频谱的中心频率随之降低。

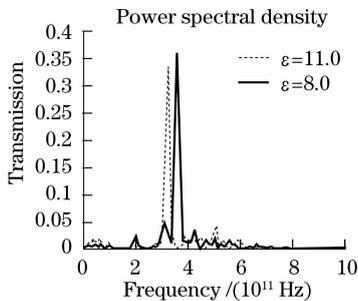


图 7 中心点阵缺陷为两种不同介质时透射谱比较  
Fig. 7 Comparison of transmission spectrum with two different defect media

中心缺陷介质折射率的变化可以预示相对介电常数的变化。计算中心缺陷介质的相对介电常数取值为 6.0~11.0 中 11 个值间隔 0.5 时,分别记录穿过该波导的透射波的中心频率,结果如图 8 所示。计算结果表明,随着缺陷物质折射率的增大,透射波中心频率随着它呈线性降低趋势。

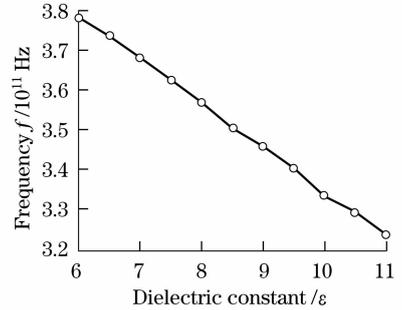


图 8 透射波中心频率随缺陷介质相对介电常数变化曲线  
Fig. 8 Center frequency of the transmitted light versus permittivity of defect material

该曲线可以用如下的数学表达式拟合

$$f = 7.5 \times 10^{10} \cdot \epsilon - 7.0 \times 10^{10}$$

中心缺陷介质的相对介电常数每变化 1,相应的透射波中心频率增大或减小约  $0.054 \times 10^{11}$  Hz,可以看出其变化有良好的线性度。

模拟计算十字波导点阵缺陷中心介质柱直径变化对透射频率的影响。分别计算十字波导中心介质柱直径为  $0.1a \sim 0.6a$  中六个不同直径对应的透射谱频率,其结果如图 9 所示。从结果可以看出随着介质柱直径的增大,透射谱的频率逐渐减小。

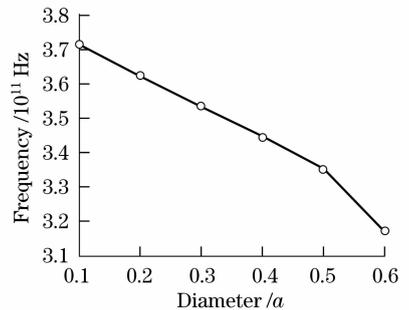


图 9 透射波中心频率随中心介质柱直径变化曲线  
Fig. 9 Center frequency of the transmitted light versus diameter of defect material

以上结果表明,由于改变了中心介质缺陷的折射率或直径,从而改变了十字波导中心缺陷类似谐振腔的固有谐振频率。这样的情况下当入射宽带光穿过十字波导中心缺陷时,缺陷下载的光频率会随缺陷介质柱的折射率或直径的变化而变化。从而透

射光频率也会随着发生变化。根据平板二维光子晶体十字波导的这些特性,可以表明该光子晶体结构可作为可调式选频器或可调式滤波器的核心器件,具有一定的应用前景。

## 5 结 论

通过对平板光子晶体十字波导传输特性的数值计算,模拟出光波在其中传输的过程。当在波导中加入特定的点阵缺陷结构时,计算得出其透射光谱具有非常窄的带宽,表明此结构具有优良的窄带滤波作用。当改变点阵缺陷材料的介电常数值时,透射波中心频率会随着缺陷介电常数的增大而线性减小。当改变点阵缺陷中心介质柱直径时,透射波中心频率会随着介质柱的直径的增大而逐渐减小,表明了该波导具有良好的选频的特性。

## 参 考 文 献

- 1 E. li Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state Physics and electronics [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(20): 2059~2061
- 2 Yin Jianling, Huang Xuguang, Liu Songhao. A variable optical attenuator based on the crystal Waveguide [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5): 671~674  
殷建玲,黄旭光,刘颂豪. 光子晶体波导可调光衰减器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 671~674
- 3 J. D. J. Joannopoulos, P. R. Villeneuve, S. Fan. Photonic crystals: putting a new twist on light[J]. *Nature*, 1997, **386**(6621): 143~149
- 4 A. Mekis, J. C. Chen, I. Kurland *et al.*. High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**(18): 3787~3790
- 5 A. Mekis, S. Fan, J. D. Joannopoulos. Bound states in photonic crystal waveguides and waveguide bends[J]. *Phys. Rev. B*, 1998, **58**(8): 4809~4817
- 6 Meng Qingsheng, Ouyang Zhengbiao, Wang Zhongchun. Mode types and their related properties of one-dimensional photonic crystal resonant cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1290~1294  
孟庆生,欧阳征标,王仲淳等. 一维光子晶体谐振腔的模式类型及其性质[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1290~1294
- 7 Liu Jing, Zheng Zhiqiang, Feng Zhuohong *et al.*. Tunable optical fiber based on two-dimensional heterostructure photonic crystal with neighboring dot-defects and curved waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 2034~2037  
刘 静,郑志强,冯卓宏等. 二维异质结光子晶体中含近邻点缺陷的弯曲波导的可调谐滤波特性[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 2034~2037
- 8 Shanhuai Fan, P. R. Villeneuve, J. D. Joannopoulos *et al.*. Channel drop filters in photonic crystals[J]. *Opt. Exp.*, 1998, **3**(1): 4~11
- 9 M. Qiu. Ultra-compact optical filter in two-dimensional photonic crystal[J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(9): 539~540
- 10 Yee K S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell equations in isotropic media[J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1966, **Ap-14**(3): 302~307
- 11 Berenger J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves[J]. *Comput. Phys.*, 1994, **114**(2): 185~200