

文章编号:1001-5078(2011)08-0894-05

· 光学材料与器件 ·

# 平板光子晶体全反射贯穿效应的滤波特性

胡成华<sup>1</sup>, 刘启能<sup>2</sup>

(1. 重庆交通大学理学院, 四川 重庆 400074; 2. 重庆工商大学计算机科学与信息工程学院, 四川 重庆 400067)

**摘要:**为了研究一维平板光子晶体中电磁波的全反射贯穿效应,利用传输矩阵法计算了电磁波在大于全反射角入射一维平板光子晶体的透射率。在透射波中发现了全反射贯穿效应。得出了平板光子晶体的全反射贯穿效应随模式量子数、周期数、平板厚度的变化规律。为设计性能优良的光子晶体滤波器提供了理论依据。

**关键词:**平板光子晶体;全反射;贯穿效应;滤波

**中图分类号:** O436    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2011.08.015

## Filtering properties of total reflection through effect of flat-panel photonic crystal

HU Cheng-hua<sup>1</sup>, Liu Qi-neng<sup>2</sup>

(1. College of Science, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Computer College of Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

**Abstract:** For studying total reflection through effect of electromagnetic wave in 1D flat-panel photonic crystal, the transition matrix method is adopted and the transmissivity of electromagnetic wave is studied when incident angle is greater than full reflection angle. Total reflection through effect is found in the transmission wave. Response curves of the through effect versus quantum number of mode, response curves of the through effect versus period and response curves of the through effect versus thickness of flat-panel are obtained. They offer the theoretical basis for designing the high-quality filter.

**Key words:** flat-panel photonic crystal; total reflection; through effect; filter

### 1 引言

光子晶体的概念是由 S. John 和 E. Yablonovitch 在 1987 年分别提出来的。所谓光子晶体就是其折射率呈周期性变化的人造带隙材料。光在光子晶体中传播时会与光子晶体的周期结构发生相互作用,从而产生带隙。利用光子晶体的带隙可以十分方便地控制光波的传播,因此光子晶体在现代科学技术上有着十分广泛的应用前景。这使得对光子晶体的研究成为目前光学的前沿领域内一个活跃的问题。

目前对一维光子晶体的研究中,在研究方法、带隙特性、缺陷模特性以及滤波理论等方面都取得了

丰富成果<sup>[1-11]</sup>。最近文献[12]中研究了光波在大于全反射角入射一维光子晶体时出现的渐逝波现象,即贯穿现象,得到了一维光子晶体中渐逝波随入射角的变化特征和渐逝波随周期数的变化特征。对于光波在大于全反射角入射一维光子晶体时出现的这一新现象有待做进一步的研究。由于光子晶体在光滤波方面有着广泛的应用,本文将利用传输矩阵法研究电磁波在大于全反射角入射一维平板光子晶

作者简介:胡成华(1954-),男,副教授,从事应用光学及电磁理论研究。E-mail:hchh4136@163.com

收稿日期:2011-03-06;修订日期:2011-03-22

体时出现的贯穿现象及其滤波特性。

## 2 模型和方法

一维平板光子晶体的结构如图 1 所示,沿  $z$  轴方向是由折射率为  $n_1 = 1.38$  (氟化镁) 厚度为  $d_1$  和折射率为  $n_2 = 4.6$  (聚苯乙烯) 厚度为  $d_2$  的两种介质周期性地交替构成,平板的厚度为  $h$  沿  $x$  轴方向,  $y$  轴垂直于纸面,平板上下表面沿  $yOz$  面。设该一维平板光子晶体的宽度远大于厚度,即可以认为电磁波在该一维平板光子晶体中的  $x$  方向受限,而在  $y$  方向不受限。设入射空间和出射空间的介质也为聚苯乙烯,即  $n_2 = n_0$ 。由于该光子晶体的两边都为聚苯乙烯,因此它的周期数为  $N + 0.5$ ,  $N$  为整数。又因  $n_0 > n_1$ ,所以当电磁波大于全反射角入射该平板光子晶体时应该产生全反射现象。在下面的计算中取中心波长取  $\lambda_0 = 500 \text{ nm}$ ,  $n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda_0/4$ , 中心圆频率  $\omega_0 = 2\pi c/\lambda_0$  ( $c$  为真空中的光速), 设归一化频率  $g = \omega/\omega_0$  ( $\omega$  为电磁波的圆频率)。

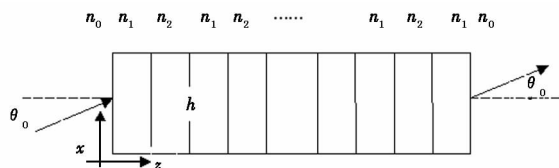


图 1 一维平板光子晶体

由于电磁波在  $x$  方向受限,所以在该平板光子晶体中传播的电磁波其波矢  $\vec{k}$  ( $k = n\omega/2\pi c$ ,  $n$  为折射率) 的  $x$  分量  $k_x$  必须满足驻波条件<sup>[13]</sup>:

$$k_x = \frac{n\omega}{2\pi c} \sin\theta = \frac{J}{2h} \quad J=0, 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

$J$  取一个值,对应于电磁波的一个模式,故将  $J$  称为模式量子数。其中  $J=0$  对应正入射,  $J>0$  对应斜入射。由式(1)可知,在一维平板光子晶体的传播的电磁波存在多个  $k_x$  分离的模式。对于该平板光子晶体透射角等于入射角,但是入射角可以连续变化,而透射角要受式(1)的限制,只有满足式(1)的那些入射角的电磁波才可能通过该平板光子晶体。

由式(1)分析可以通过该平板光子晶体的各模式电磁波对应的入射角  $\theta_0$  与归一化频率  $g$ 、模式量子数  $J$  以及平板厚度  $h$  满足的关系,令  $h = X\lambda_0$ , 由式(1)可得:

$$\sin\theta_0 = \frac{J}{2Xg} < 1 \quad J=0, 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

对于电磁波大于全反射角入射的情况,设  $\theta_m$  为

全反射角,此时还应该满足  $\sin\theta_0 > \sin\theta_m$ 。结合式(2),可以得出电磁波大于全反射角入射该平板光子晶体时  $g, J, X$  满足的关系:

$$\sin\theta_m < \frac{J}{2Xg} < 1 \quad (J \text{ 取整数}) \quad (3)$$

在光子晶体的研究中多数情况是研究  $g = 1$  附近的特性,这种情况下可以将式(3)变为:

$$2X\sin\theta_m < J < 2X \quad (J \text{ 取整数}) \quad (4)$$

对于该平板光子晶体  $\sin\theta_m = n_1/n_0 = 0.3$ , 其全反射角  $\theta_m = 0.305 \text{ rad}$ 。由式(4)得出大于全反射角入射并可能在该平板光子晶体中传播的电磁波其对应的模式量子数满足的关系为:

$$0.6X < J < 2X \quad (J \text{ 取整数}) \quad (5)$$

利用文献[14]中推出的分层介质中光波的传输矩阵,该平板光子晶体的一个周期的传输矩阵  $m$  为:

$$m = m_{21} m_1 m_{12} m_2 \quad (6)$$

其中:

$$m_1 = \begin{bmatrix} e^{-ik_1 d_1 \cos\theta_1} & 0 \\ 0 & e^{ik_1 d_1 \cos\theta_1} \end{bmatrix}$$

$$m_2 = \begin{bmatrix} e^{-ik_2 d_2 \cos\theta_2} & 0 \\ 0 & e^{ik_2 d_2 \cos\theta_2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

对 TE 波有:

$$m_{ij} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + \frac{n_j \cos\theta_j}{n_i \cos\theta_i} & 1 - \frac{n_j \cos\theta_j}{n_i \cos\theta_i} \\ 1 - \frac{n_j \cos\theta_j}{n_i \cos\theta_i} & 1 + \frac{n_j \cos\theta_j}{n_i \cos\theta_i} \end{pmatrix} \quad (8)$$

上述各式中  $\theta$  为传播角。整个平板光子晶体的传输矩阵  $M$  为:

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = m^N (m_{21} m_1 m_{12}) \quad (9)$$

电磁波通过该光子晶体的反射系数  $r$  分别为:

$$r = M_{21}/M_{11} \quad (10)$$

不计材料的吸收时,电磁波通过该光子晶体的透射率  $T$  为:

$$T = 1 - r^2 \quad (11)$$

利用式(5)~式(11)可以研究横电波(TE波)在大于全反射角入射该平板光子晶体时出现的全反射贯穿效应及其滤波特性。

## 3 全反射贯穿的滤波特性

取平板厚度  $h = 6\lambda_0$ , 即  $X = 6$ , 由式(5)得出大于全反射角 ( $\theta_m = 0.305 \text{ rad}$ ) 入射并可能在该平板光子晶体中传播的电磁波有 8 个模式,其对应的模

式量子数分别为: $J=4,5,6,7,8,9,10,11$ 。下面分别研究 TE 波的全反射贯穿效应随模式量子数、随周期数、随平板厚度变化的滤波特性。

### 3.1 模式量子数对滤波特性的影响

固定周期数  $N=5$ , 计算出模式量子数  $J=5,6,7$  三个模式的 TE 波其透射率随归一化频率的响应曲线, 如图 2 所示。

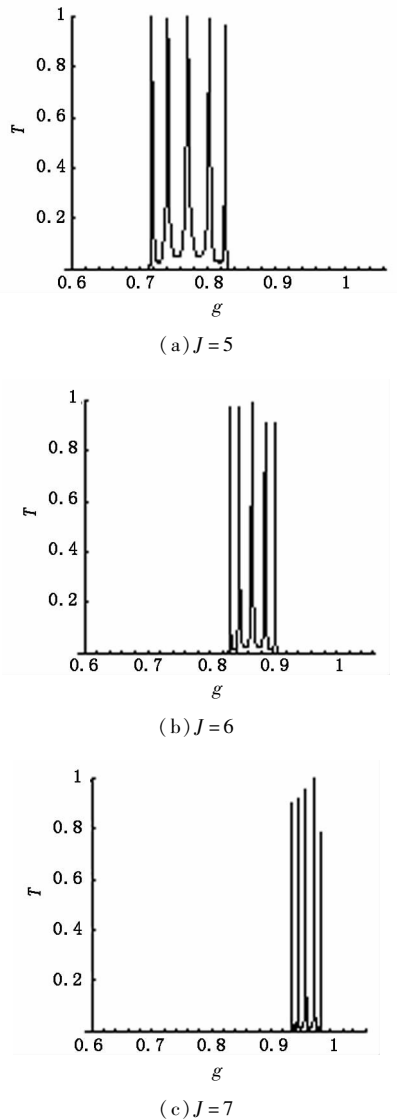


图2 透射率随归一化频率的响应曲线(周期数固定)

由式(2)可以得  $J=5,6,7$  三个模式对应的入射角分别为  $\theta_0 = 0.43 \text{ rad}$ ,  $\theta_0 = 0.52 \text{ rad}$ ,  $\theta_0 = 0.62 \text{ rad}$ 。由图 2 可知:

(1) 入射角大于全反射角的三个模式电磁波都能够穿过该平板光子晶体, 即出现全反射贯穿效应。

(2) 对于  $J=5,6,7$  三个模式的全反射贯穿峰谱都有相同的谱线谱线数(5条)。每个模式的5个透射峰的频率间隔均匀、清晰, 其峰值达到1。这表

明全反射贯穿效应具有很好的滤波特性, 可以利用它设计出性能优良的多通道光子晶体滤波器。

(3) 随着模式量子数的增加其全反射贯穿峰谱的频率向高频方向移动。随着模式量子数的增加其全反射贯穿谱线的频率宽度减小、相邻谱线的频率间隔减小。利用这些特性可以通过改变电磁波的入射角(即改变电磁波的模式量子数)来实现对滤波通道的频率和频率宽度的控制。

### 3.2 周期数对滤波特性的影响

固定平板厚度  $h=6\lambda_0$ , 研究  $J=7$  这个模式的电磁波其全反射贯穿效应随周期数的变化特征。计算出周期数  $N=3,4,6$  其全反射贯穿峰的透射率随归一化频率的响应曲线, 如图 3 所示。

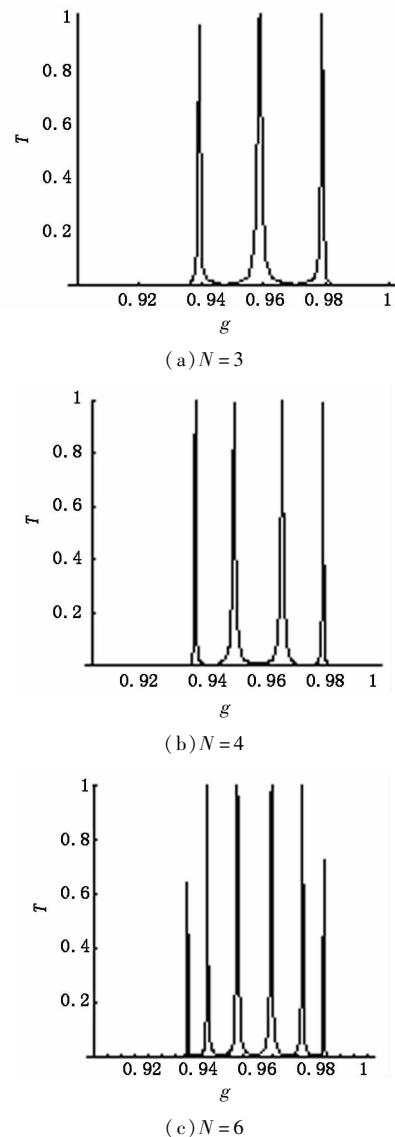


图3 透射率随归一化频率的响应曲线(厚度固定)

由图 2 和图 3 可知:

(1) 电磁波的全反射贯穿峰数和光子晶体的周

期数是相等的,利用这个特性可以通过改变周期数来准确控制多通道光子晶体滤波器的通道数,这是通常的光子晶体滤波器所不具有的优点。

(2)全反射贯穿峰的频率宽度随周期数的增加而减小,相邻全反射贯穿峰的频率间隔随周期数的增加而减小。利用这个特性可以通过改变周期数来控制多通道光子晶体滤波器的滤波通道频率宽度和频率间隔。

### 3.3 平板厚度对滤波特性的影响

固定周期数  $N=5$ , 研究  $J=6$  这个模式的电磁波其全反射贯穿效应随平板厚度的变化特征。计算出  $J=6$  模式电磁波其全反射贯穿峰的归一化频率随平板厚度的响应曲线,如图4所示。在图4中5条白色带就是全反射贯穿峰带。由图4可知:

(1) $J=6$  模式电磁波其全反射贯穿峰依赖平板厚度的变化而变化,5条全反射贯穿峰的频率随平板厚度的增加向低频方向移动。

(2)5条全反射贯穿峰的频率宽度都随平板厚度的增加而增大。

利用这两个特性可以通过改变平板厚度来控制多通道光子晶体滤波器的频率位置和滤波通道的频率宽度。

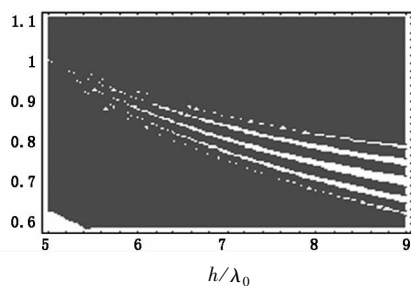


图4 归一化频率随平板厚度的响应曲线

## 4 结论

利用传输矩阵法研究了电磁波在大于全反射角入射一维平板光子晶体时所产生的全反射贯穿效应及其滤波特性。研究发现:各模式电磁波以大于全反射角入射一维平板光子晶体时都能够穿过平板光子晶体,即出现全反射贯穿效应。其全反射贯穿效应具有下特征:全反射贯穿峰谱的频率随模式量子数的增加而向高频方向移动;全反射贯穿峰数等于周期数;全反射贯穿峰的频率随平板厚度的增加向低频方向移动。平板光子晶体的全反射贯穿效应的这些特性为设计性能优良的光子晶体滤波器提供了理论依据。

## 参考文献:

- [1] Fang Yuntuan, Shen Tinggen, Tan Xilin. Study on one dimensional photonic crystal with impurity defect [J]. Acta Optic Sinica, 2004, 24(11): 1557-1560. (in Chinese)  
方云团, 沈廷根, 谭锡林. 一维光子晶体掺杂缺陷模研究 [J]. 光学学报, 2004, 24(11): 1557-1560.
- [2] Zhou Jingou, Du Guiqiang, Zhang Yawen. Electromagnetic modes of thickness-modulated dual-periodic one-dimensional photonic crystals [J]. Acta Phys. Sin, 2005, 54(8): 3703-3707. (in Chinese)  
周金苟, 杜桂强, 张亚文. 双周期厚度调制的一维光子晶体的电磁模 [J]. 物理学报, 2005, 54(8): 3703-3707.
- [3] Du Guiqiang, Liu Nianhua. Optical transmission spectra of one-dimensional photonic crystals with a mirror symmetry [J]. Acta Phys. Sin, 2004, 53(4): 1095-1097. (in Chinese)  
杜桂强, 刘念华. 具有镜像对称结构的一维光子晶体的透射谱 [J]. 物理学报, 2004, 53(4): 1095-1097.
- [4] Zhang Dengguo, Ni Na, An Henan. Electromagnetic field analysis and numerical calculation of one-dimensional magneto-photonic crystal [J]. Acta Photnica Sinica, 2004, 33(8): 1007-1010. (in Chinese)  
张登国, 倪娜, 安鹤南. 一维磁性光子晶体的电磁场分析和数值计算 [J]. 光子学报, 2004, 33(8): 1007-1010.
- [5] Wang Rui, Zhang Cunxi, Nie Yihang. Band structure and propagation properties of one-dimension anisotropy photonic crystals [J]. Acta Photnica Sinica, 2007, 35(1): 89-92. (in Chinese)  
王瑞, 张存喜, 聂一行. 一维各向异性光子晶体的带隙结构和传输特性 [J]. 光子学报, 2007, 35(1): 89-92.
- [6] Li Rong, Ren Kun, Ren Xiaobin. Angular and wavelength selectivity of band gaps of holographic photonic crystals for different polarizations [J]. Acta Phys. Sin, 2004, 53(8): 2520-2523. (in Chinese)  
李蓉, 任坤, 任晓斌. 一维光子晶体带隙结构对不同偏振态的角度和波长响应. [J]. 物理学报, 2004, 53(8): 2520-2523.
- [7] Liu Qineng. Transmission characteristics of electromagnetic wave in 1D rectangle photonic crystal [J]. Acta Photnica Sinica, 2010, 39(5): 847-850. (in Chinese)  
刘启能. 一维矩形光子晶体中电磁波的传输特性 [J]. 光子学报, 2010, 39(5): 847-850.
- [8] Liu Qineng. Filtering feature of 1D rectangle doping pho-

- tonic crystal [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(8):2041-2044. (in Chinese)
- 刘启能. 一维矩形掺杂光子晶体的滤波特性[J]. 中国激光, 2010, 37(8):2041-2044.
- [9] Liu Qineng. A new simple and convenient method for study of properties forbidden band of one-dimensional photonic crystal[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(6):1031-1034. (in Chinese)
- 刘启能. 一种简便的研究一维光子晶体禁带特征的新方法[J]. 光子学报, 2007, 36(6):1031-1034.
- [10] Liu Qineng. The mode and defect mode of electromagnetic wave in rectangular doped photonic crystal [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(4):2551-2555. (in Chinese)
- 刘启能. 矩形掺杂光子晶体中电磁波的模式和缺陷模[J]. 物理学报, 2010, 59(4):2551-2555.
- [11] Liu Qineng. New dispersive method of stratified medium and its application in photonic crystal[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(6):665-668. (in Chinese)
- 刘启能. 分层介质的新色散法及其在光子晶体中的应用[J]. 激光与红外, 2009, 39(6):665-668.
- [12] Fang Yuntuan, Liang Zhongcheng. Unusual transmission through usual one-dimensional photonic crystal in the presence of evanescent wave [J]. Opt Commun, 2010, 283:2102-2106.
- [13] Liu Qineng. Filtering feature of 1-D flat-panel doping photonic crystal [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(4):427-430. (in Chinese)
- 刘启能. 一维平板掺杂光子晶体的滤波特性[J]. 激光与红外, 2010, 40(4):427-430.
- [14] Liu Qineng. A new method that study electromagnetic waves transfer in stratified medium [J]. Laser Journal, 2009, 30(3):14-15. (in Chinese)
- 刘启能. 一种研究电磁波在分层介质中传输的新方法[J]. 激光杂志, 2009, 30(3):14-15.