

文章编号: 0258-7025(2010)08-2041-04

一维矩形掺杂光子晶体的滤波特性

刘启能

(重庆工商大学计信学院, 重庆 400067)

摘要 利用电磁波在一维矩形掺杂光子晶体中横向受限的条件,推导出电磁波在一维矩形掺杂光子晶体中各个模式满足的关系式。研究了 TE 波和 TM 波各模式的缺陷模随模式量子数和杂质光学厚度的变化规律。利用缺陷模随模式量子数的变化规律可以实现多通道滤波,利用缺陷模随杂质光学厚度的变化规律可以实现调谐滤波。

关键词 矩形光子晶体;受限;缺陷模;滤波

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103708.2041

Filtering Feature of 1D Rectangle Doping Photonic Crystal

Liu Qineng

(Computer Science and Information Engineering College, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract Applying the condition of electromagnetic wave restricted in horizontal direction, the conditions that each mode should satisfy are concluded from the one-dimensional rectangle doping photonic crystal. The dependences of defect modes on the mode quantum number and doping thickness are obtained for TE wave and TM wave. These results can be used to design multi-channel filter with frequency tuning.

Key words rectangle photonic crystal; restrictions; defect mode; filter

1 引 言

光子晶体的概念自 1987 年分别由 S. John 和 E. Yablonovitch 提出后,由于它在带隙方面的特殊性质,使其很快成为光学前沿领域中一个十分活跃的研究课题。近年来人们已对光子晶体开展了广泛、深入的研究^[1~8],但在这些研究中都把一维光子晶体作为横向非受限来处理,而真实的光子晶体是有一定外形,它的横向受到一定的外形限制,这种限制必然会影响到电磁波在其中的传输特性。因此,研究一维光子晶体的横向受限问题对弄清真实的一维光子晶体的特性有着十分重要的理论价值和应用价值。文献[9]对一维光子晶体横向受限的问题做了一些研究,取得了一些成果,但仍有许多重要问题有待深入研究。在一维光子晶体的诸多应用中,利用它研制优质滤波器是一个重要的应用^[10~12]。本文将对一种典型的一维横向受限掺杂光子晶体(简称一维矩形掺杂光子晶体)的

滤波特性进行研究。

由电磁波的传输理论可知,当一维光子晶体横向受限时,必然会引起在其中传输的电磁波出现多模性,这也必然引起其滤波性能的变化。因此,研究的内容对深入认识一维光子晶体的滤波性能以及对一维光子晶体滤波器的设计有重要意义。

2 模 型

一维矩形掺杂光子晶体的结构如图 1 所示,沿 z 轴(对称轴)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 $n_2 = 2.38$ (硫化锌)、厚度为 d_2 的两种介质周期性地交替构成,中间掺了一层厚度为 d_3 、折射率为 $n_3 = 2.97$ (砷化铝)的杂质。该光子晶体被限制在一个横切面为矩形的金属筒内,矩形的长为 a (沿 x 方向)、宽为 b (沿 y 方向)。入射空间和出射空间的折射率都为 $n_0 = 1$ 。在计算

收稿日期: 2009-10-26; 收到修改稿日期: 2009-12-10

基金项目: 重庆市教委科技项目基金(KJ080720)资助课题。

作者简介: 刘启能(1957—),男,教授,主要从事光学与原子分子物理等方面的研究。E-mail: liuqineng@yahoo.com.cn 或 ybxyjwc@sina.com

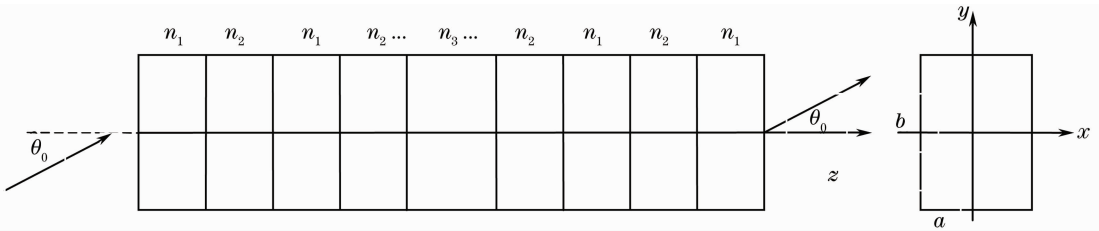


图1 一维矩形掺杂光子晶体

Fig. 1 1D rectangle doping photonic crystal

中,两边的周期数取7,中心波长取 $\lambda_0 = 600 \text{ nm}$, $n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda_0 / 4$,中心圆频率 $\omega_0 = 2\pi c / \lambda_0$,设归一化频率 $g = \omega / \omega_0$ 。

在该一维矩形掺杂光子晶体中传播的电磁波的波矢 \mathbf{k} [$\mathbf{k} = n\omega / (2\pi c)$, ω 为圆频率, c 为光速, n 为折射率]的三个分量 k_x, k_y, k_z 有

$$k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2. \quad (1)$$

由于电磁波在 x 方向和 y 方向受限, k_x 和 k_y 必须满足驻波条件

$$\begin{aligned} k_x &= \frac{J_x}{2a}, \quad J_x = 0, 1, 2, 3, \dots \\ k_y &= \frac{J_y}{2b}, \quad J_y = 0, 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (2)$$

而 $k_z = k \cos \theta$ (θ 为波矢 \mathbf{k} 与 z 轴的夹角),由(1),(2)式得

$$\begin{aligned} k^2 \sin^2 \theta &= [J_x / (2a)]^2 + [J_y / (2b)]^2, \\ J_x &= 0, 1, 2, 3, \dots \\ J_y &= 0, 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (3)$$

将 J_x, J_y 称为模式量子数,由(3)式可知 J_x, J_y 各取一个值,对应于一个 \mathbf{k} 即电磁波的一个模式。因此在一维矩形掺杂光子晶体中传播的电磁波存在多个 \mathbf{k} 分离的模式,其中 $J_x = 0, J_y = 0$ 的模式对应电磁波正入射,其他模式对应电磁波斜入射的情况。(3)式就是一维矩形掺杂光子晶体中电磁波各模式满足的关系式。由于一维矩形掺杂光子晶体中电磁波出现了多个 k_x 分离的模式,其缺陷模也会出现对应的模式特征,这就必然会引起滤波特性的变化。

3 模式的特征

由(3)式分析该一维矩形掺杂光子晶体中电磁波各个模式的透射角 θ_0 与归一化频率 g , a 和 b 的关系。令 $a = X\lambda_0, b = Y\lambda_0$,由(3)式可得

$$\begin{aligned} \sin \theta_0 &= \frac{1}{g} \sqrt{[J_x / (2X)]^2 + [J_y / (2Y)]^2}, \\ J_x &= 0, 1, 2, 3, \dots \\ J_y &= 0, 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (4)$$

若电磁波沿 xoz 面入射,则

$$\sin \theta_0 = J_x / (2gX), \quad J_x = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad J_y = 0$$

若电磁波沿 yoZ 面入射,则

$$\sin \theta_0 = J_y / (2gY), \quad J_x = 0, \quad J_y = 0, 1, 2, 3, \dots$$

由(4)式可知,该一维矩形掺杂光子晶体中电磁波各个模式有以下特征:

1) 一维矩形光子晶体中电磁波存在许多模式,每个模式由模式量子数 J_x 和 J_y 确定,记为 $[J_x, J_y]$ 。而在一维非受限光子晶体中电磁波不存在模式。

2) 当 a 和 b (X 和 Y)一定时,模式量子数越大对应的透射角越大。同一模式的电磁波, a 和 b (X 和 Y)越大对应的透射角越小。透射角一定时, a 和 b 越大对应的模式量子数越大。

3) 透射波中出现一级禁带(频率最低的禁带)的缺陷模其模式量子数的取值范围:一级禁带的缺陷模出现在 $g = 1$ 附近,将(4)式中的 g 取1,而 $\sin \theta_0 \leq 1$,则有

$$\begin{aligned} \text{在 } x \text{ 方向 } J_x &\leq 2X, \quad J_x = 0, 1, 2, 3, \dots \\ \text{在 } y \text{ 方向 } J_y &\leq 2Y, \quad J_y = 0, 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (5)$$

(5)式为透射波中出现一级禁带的缺陷模的模式量子数的取值范围公式。由(5)式可知,一级禁带的缺陷模的模式量子数的取值范围由 X 和 Y (a 和 b)唯一确定, X 和 Y 越大,对应的模式量子数的取值范围就越大。

4 滤波特性

利用一维矩形掺杂光子晶体的缺陷模可以实现滤波,可以通过研究缺陷模的特征来认识一维矩形掺杂光子晶体的滤波特性,其计算采用特征矩阵法。

4.1 滤波通道随模式量子数的变化

固定 $a = 3\lambda_0, b = 4\lambda_0, n_3 d_3 = \lambda_0 / 2$ 。由(5)式可知,模式量子数的取值范围为 $J_x \leq 6, J_y \leq 8$ 。计算出TE波 $[0, 0], [0, 1], [0, 2]$ 三个模式的透射率 T 随归一化频率 g 的响应曲线和透射率 T 随透射角 θ_0 的响应曲线,如图2(a),(b)所示。计算出TM波 $[0, 0], [0, 1], [0, 2]$ 三个模式的透射率 T 随归一化频率 g 的响应曲

线和透射率 T 随透射角 θ_0 的响应曲线,如图 2(c), (d)所示。由图 2 可知:

1) 对于 TE 波和 TM 波,当模式量子数为 $[0,0]$, $[0,1]$, $[0,2]$ 时,在禁带的中间都分别出现一个缺陷模。这表明 TE 波和 TM 波的各个模式都会出现缺陷模,每一个缺陷模都可以作为一个滤波通道。

2) 对于 TE 波 $[0,0]$, $[0,1]$, $[0,2]$, 三个滤波通道的频率中心分别为 $g=1.00, 1.002, 1.008$; 对

于 TM 波 $[0,0]$, $[0,1]$, $[0,2]$, 三个滤波通道的频率中心分别为 $g=1.00, 1.002, 1.009$ 。

3) 对于 TE 波和 TM 波 $[0,0]$, $[0,1]$, $[0,2]$, 三个滤波通道的频率半峰全宽 $g_{1/2}$ 几乎都相等,都为 0.0006。

4) 对于 TE 波和 TM 波 $[0,0]$, $[0,1]$, $[0,2]$, 三个滤波通道对应的透射角都分别在 y 轴方向上 $\theta_0=0, 0.125, 0.250$ rad 处。

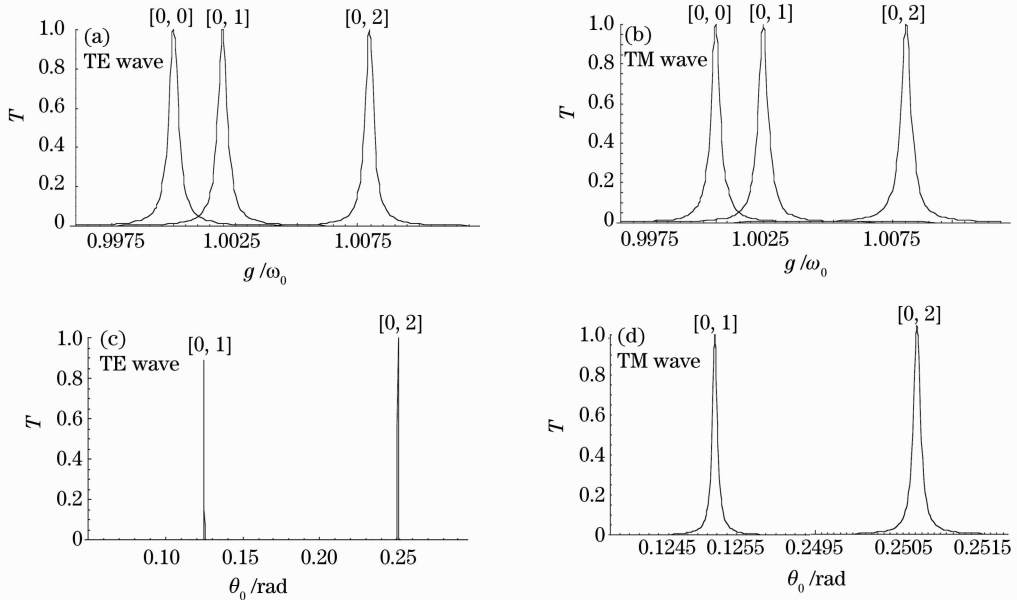


图 2 TE 波和 TM 波在各模式的响应曲线。(a), (b) 透射率随 g 的响应曲线(c), (d) 缺陷模随 θ_0 的响应曲线

Fig. 2 Response curves in different modes with TE wave and TM wave. (a), (b) transmissivity versus g ; (c), (d) defect mode versus θ_0

利用上述特性,在透射空间的 y 轴方向上 $\theta_0=0, 0.125, 0.250$ rad 三个方向分别可以获得归一化频率为 $g=1.00, 1.002, 1.008$, 归一化频率半峰全宽 $g_{1/2}=0.0006$ 的电磁波。即当频率和入射角连续变化的电磁波入射到该光子晶体时,会在透射空间的不同方向上得到频率不同的缺陷模,这样就实现了多通道滤波的目的。

4.2 滤波通道随杂质光学厚度的变化

固定 $a=3\lambda_0, b=4\lambda_0$, 计算出 TE 波和 TM 波的模式 $[1,1]$ 的缺陷模随杂质的光学厚度 $n_3 d_3$ 和归一化频率 g 变化的立体图,如图 3(a) (TE 波和 TM 波的图几乎没有区别) 所示。为了更清楚地观察滤波通道随杂质光学厚度的变化,计算 $n_3 d_3=0.45\lambda_0, 0.50\lambda_0, 0.55\lambda_0$ 时的缺陷模随归一化频率 g 的响应

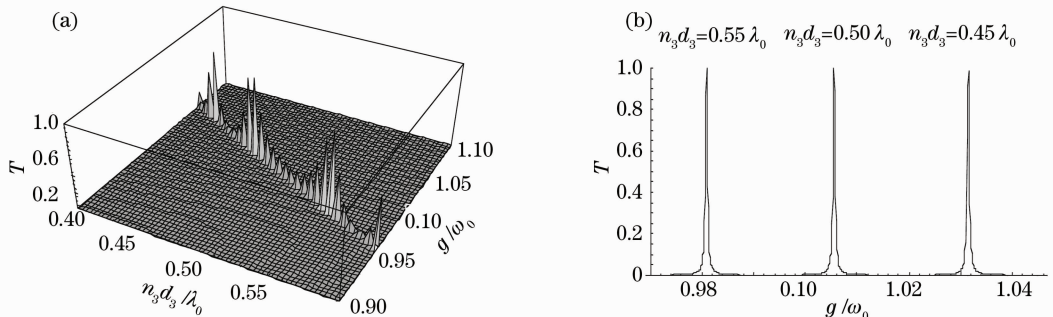


图 3 TE 波和 TM 波对杂质厚度的响应曲线。(a) 透射率随 $n_3 d_3$ 和 g 的变化; (b) 缺陷模式在不同光学厚度下随 g 的响应曲线

Fig. 3 Response curves versus optical thickness with TE and TM wave. (a) transmissivity versus $n_3 d_3$ and g ;

(b) defect mode versus g at different optical thicknesses

曲线如图 3(b)所示。由图 3(a)和(b)可知:

1) 对于 TE 波和 TM 波,模式[1,1]的滤波通道的频率中心都随杂质光学厚度的增加近似呈线性减小趋势。当 $n_3d_3 = 0.45\lambda_0, 0.50\lambda_0, 0.55\lambda_0$ 时,滤波通道的频率中心分别为 $g = 1.032, 1.006, 0.981$ 。

2) 对于 TE 波和 TM 波,当 $n_3d_3 = 0.45\lambda_0, 0.50\lambda_0, 0.55\lambda_0$ 时,滤波通道的频率半峰全宽都不变。

利用上述特性,可以通过改变杂质的光学厚度来实现调谐滤波的目的。

5 结 论

利用电磁波在一维矩形掺杂光子晶体中横向受限的条件,推导出电磁波各个模式在一维矩形掺杂光子晶体中的关系式。结合特征矩阵法利用这个关系式研究了 TE 波和 TM 波各模式的缺陷模随模式量子数和杂质光学厚度的变化规律。利用这种变化规律可以实现多通道滤波,即当频率和入射角连续变化的电磁波入射到该光子晶体时,会在透射空间的不同方向上得到频率不同的缺陷模;利用缺陷模随杂质光学厚度的变化规律可以实现调谐滤波。虽然普遍的一维非横向受限掺杂光子晶体也能实现滤波^[10,12],但各缺陷模的透射角的分离没有本文这样明显,并且真实的一维光子晶体都是横向受限的,因此这里得到的结论更具有实际意义。

参 考 文 献

- 1 Chen Weizong, Shen Ying, Hu Manli. Structure of basic period of one-dimensional photonic crystal and the characters of forbidden bands [J]. *Acta Photnica Sinica*, 2001, **30**(12): 1453~1456
陈慰宗, 申 影, 忽满利. 一维光子晶体的基本周期结构及其禁带特征 [J]. *光子学报*, 2001, **30**(12): 1453~1456
- 2 Duan Xiaofeng, Niu Yanxiong, Zhang Chu *et al.*. Light propagation characteristics of 1-D photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9): 1086~1089
段晓峰, 牛燕雄, 张 雏等. 一维光子晶体的光学传输特性分析 [J]. *光子学报*, 2003, **32**(9): 1086~1089
- 3 Fang Yuntuan, Shen Tinggen, Tan Xilin. Study on one-

- dimensional photonic crystal with impurity defects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11): 1557~1560
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
- 4 Yuan Jinhui, Hou Lantian, Zhou Guiyao *et al.*. Anti-Stokes phenomenon in photonic crystal fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1935~1939
苑金辉, 侯蓝田, 周桂耀等. 光子晶体光纤中的反斯托克斯现象的研究 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1935~1939
- 5 Meng Jia, Hou Lantian, Zhou Guiyao *et al.*. Fabrication and study on the small-core index-guiding photonic crystal fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1350~1354
孟 佳, 侯蓝田, 周桂耀等. 小芯径折射率引导型光子晶体光纤的制备和研究 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1350~1354
- 6 Zhang Dengguo, Ni Na, An Henan. Electromagnetic field analysis and numerical calculation of one-dimensional magneto-photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 1007~1010
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
- 7 Liu Qineng. Effect of impurity absorption on one-dimensional photonic crystal defect mode [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 777~780
刘启能. 杂质吸收对一维光子晶体缺陷模的影响 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 777~780
- 8 Li Rong, Ren Kun, Ren Xiaobin. Angular and wavelength selectivity of band gaps of holographic photonic crystals for different polarizations [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(8): 2520~2523
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
- 9 Song Yuling, Wang Xuanzhang. Properties of a one-dimensional confined antiferromagnetic photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2404~2407
宋玉玲, 王选章. 一维受限反铁磁光子晶体的性质 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2404~2407
- 10 Liu Qineng. Theoretical study of multi-channel polarization tunable filter of photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2): 305~308
刘启能. 光子晶体多通道可调谐偏振滤波器的理论研究 [J]. *光子学报*, 2008, **37**(2): 305~308
- 11 Liu Qineng. Theoretic study of a novel kind of tunable filter based on 1-D photonic crystal [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2007, **18**(5): 574~577
刘启能. 一种新型可调谐光子晶体滤波器的理论研究 [J]. *光电子·激光*, 2007, **18**(5): 574~577
- 12 Liu Qineng. An effect of absorption of dopant on design of photonic crystal filters [J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(3): 327~330
刘启能. 杂质吸收对光子晶体滤波器设计的影响 [J]. *激光技术*, 2008, **32**(3): 327~330