

文章编号: 1001-3806(2013)03-0338-04

1 维方形掺杂光子晶体波导中缺陷模的色散特性

代洪霞, 刘启能

(重庆工商大学 计算机科学与信息工程学院, 重庆 400067)

摘要: 为了研究1维方形掺杂光子晶体波导中缺陷模的色散,采用特征矩阵的方法研究了1维方形掺杂光子晶体波导中TE波和TM波缺陷模的变化特征,得到了TE波和TM波的缺陷模随色散强度、色散厚度变化的结果。结果表明,色散强度和色散厚度都会对1维方形掺杂光子晶体波导中TE波和TM波的缺陷模产生明显的影响;利用TE波和TM波的缺陷模随色散强度、色散厚度的变化规律,可以有效地实现对1维方形掺杂光子晶体波导中TE波和TM波各传输模式的有效控制。

关键词: 材料;光子晶体;色散;波导;缺陷模

中图分类号: O436.3 文献标识码: A doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.03.016

Dispersion characteristics of defect mode in 1-D square doped photonic crystal waveguide

DAI Hong-xia, LIU Qi-neng

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

Abstract: In order to study the dispersion characteristics of 1-D square doped photonic crystal waveguide, the defect modes of TE wave and TM wave in 1-D square doped photonic crystal waveguide were studied based on the characteristic matrix. Response curves of the defect mode of TE wave and TM wave versus dispersion strength and dispersion thickness were obtained. Dispersion strength and dispersion thickness can produce apparent effect on the defect mode. The defect mode of TE wave and TM wave in 1-D square doped photonic crystal waveguide can be effectively controlled according to the dispersion characteristics of defect mode.

Key words: materials; photonic crystal; dispersion; waveguide; defect mode

引言

光子晶体是其介电常数呈周期性变化的人造带隙材料,由于光子晶体的周期性结构,使得光在其中传播时产生带隙。光子晶体的带隙的出现可以方便地控制光波的传播,因此,对光子晶体传输特性的研究成为光学前沿领域内研究的热点课题。由于1维光子晶体结构简单、制备方便,同时也具备2维、3维光子晶体的基本性质,因此,成为光子晶体领域内研究较多的一种结构。

目前对1维光子晶体已经进行了较为广泛和深入的研究,在能带特性、缺陷态性质、滤波理论等方面的研究取得了丰富成果^[1-43]。但在这些研究中,都是基于光子晶体的折射率和光波频率无关的前提下进行的,即认为光子晶体的折射率为常量。但是,严格说来构成光子晶体的材料其折射率是光频率的函数,即存在折射率的色散,因此,要准确地确定光子晶体中光的传输特性,必须考虑材料的色散关系。为了研究材料的色散对光子晶体传输特性的影响,人们已经开展了一些研究。参考文献[14]中研究了光正入射情况下材料色散对光子晶体缺陷模的影响,得出了缺陷模随杂质材料色散的变化特征。参考文献[15]中研究了光正入射情况下材料色散对光子晶体带隙的影响,得出了带隙随色散的变化特征。参考文献[16]中研究了负折射材料色散对光子晶体带隙的影响,得出了负折射材料的色散对带

基金项目: 重庆市教委科学技术研究资助项目 (KJ100717)

作者简介: 代洪霞(1969-),女,副教授,从事光学和理论物理的研究。

E-mail: fangyudhx@yahoo.com.cn

收稿日期: 2012-08-28; 收到修改稿日期: 2012-09-04

隙的影响特征。参考文献 [17] 中研究了矩形掺杂光子晶体中光的传输特性,但是没有考虑色散的影响。由于 1 维方形光子晶体波导对于控制光的传输有着重要的应用,因此,研究色散对 1 维方形光子晶体波导中光的传输模式的影响是一个具有理论价值和应用价值的问题,作者将研究色散对 1 维方形掺杂光子晶体波导中缺陷模的影响。

1 模型与理论

设计这样一种 1 维方形掺杂光子晶体波导结构 $(AB)^N C (BA)^N$, N 为周期数, C 层为杂质层, A, B, C 的几何厚度分别为 d_A, d_B, d_C , 对应的介电常数分别为 $\epsilon_A, \epsilon_B, \epsilon_C$, 对应的磁导率分别为 μ_A, μ_B, μ_C 。该 1 维掺杂光子晶体波导被限制在一个边长为 a 的方形金属筒内,入射空间和出射空间的折射率都为 $n_0 = 1$ 。由于电磁波的频率主要对介电常数产生影响,因此,本文中仅就频率对介电常数的影响而引起折射率的色散效应展开研究,并令 $\mu_A = \mu_B = \mu_C = 1$, 则材料的折射率 $n = \sqrt{\epsilon}$ 。用洛伦兹振子模型来模拟色散介质的介电常数有^[15]:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_b + \frac{\chi_0 \omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\gamma\omega} \quad (1)$$

式中 $\epsilon_b, \omega_0, \gamma, \omega$ 和 χ_0 分别为背景材料的介电常数、谐振频率、衰减系数、光波频率和色散强度。由 (1) 式可知,材料的介电常数为复数,其折射率 $n = \sqrt{\epsilon}$ 也为复数,称为材料的复折射率。复折射率的实部描述材料对光的折射性质,复折射率的虚部描述材料对光的吸收性质。下面仅研究复折射率实部的色散特性:

$$\text{Re } n = \text{Re} \left(\epsilon_b + \frac{\chi_0 \omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\gamma\omega} \right)^{1/2} \quad (2)$$

由 (2) 式可看出,在影响折射率色散特性的诸多因素中,色散强度 χ_0 是最重要的因素。为了研究色散强度 χ_0 对折射率色散特性的影响,取 $\epsilon_b = 2, \omega_0 = 8 \times 10^{14} \text{ Hz}, \gamma = 4 \times 10^{14} \text{ Hz}$, 计算出 $\chi_0 = 0, \chi_0 = 0.2, \chi_0 = 0.4$ 共 3 种情况下复折射率实部随频率的响应曲线,见图 1。在图 1 中,实线对应 $\chi_0 = 0$ 的情况,虚线对应 $\chi_0 = 0.2$ 的情况,点划线对应 $\chi_0 = 0.4$ 的情况。由图 1 可知: $\chi_0 = 0$ 为水平直线,其折射率与频率无关,这是通常研究的折射率无色散的情况;当 $\chi_0 = 0.2$ 时,频率对折射率产生明显的影响,当频率 $\omega = 6 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 时,折射率为 1.51,随着频率的增加,折射率逐渐减小,当频率增加到 10^{15} Hz 时,折射率

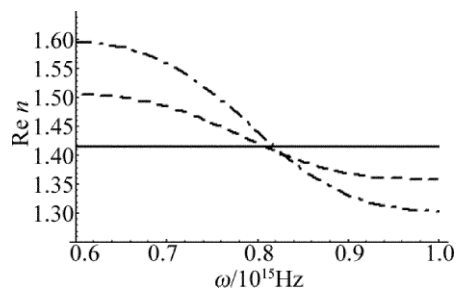


Fig. 1 Response curves of refractive index versus frequency

减小为 1.36; 当 $\chi_0 = 0.4$ 时,频率对折射率的影响更加明显,当频率 $\omega = 6 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 时,折射率为 1.60,当频率增加到 10^{15} Hz 时,折射率减小为 1.30。

由于色散的出现,1 维方形掺杂光子晶体波导中光的缺陷模也将出现一些新的变化。可利用特征矩阵法研究这种变化,该 1 维光子晶体 A, B, C 3 层介质的特征矩阵分别为:

$$\begin{cases} m_A = \begin{bmatrix} \cos\delta_A & -\frac{i}{p_A}\sin\delta_A \\ -ip_A\sin\delta_A & \cos\delta_A \end{bmatrix} \\ m_B = \begin{bmatrix} \cos\delta_B & -\frac{i}{p_B}\sin\delta_B \\ -ip_B\sin\delta_B & \cos\delta_B \end{bmatrix} \\ m_C = \begin{bmatrix} \cos\delta_C & -\frac{i}{p_C}\sin\delta_C \\ -ip_C\sin\delta_C & \cos\delta_C \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\delta = (2\pi/\lambda) nd\cos\theta$, λ 为入射光的波长。对于 TE 波 $p = n\cos\theta$; 对于 TM 波 $p = \cos\theta/n$ 。1 维方形掺杂光子晶体波导整体的特征矩阵 M 为:

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = (m_A m_B)^N m_C (m_B m_A)^N \quad (4)$$

当光子晶体置于空气时,其反射系数为:

$$r = \frac{(M_{11} + M_{12}p_0)p_0 - (M_{21} + M_{22}p_0)}{(M_{11} + M_{12}p_0)p_0 + (M_{21} + M_{22}p_0)} \quad (5)$$

其透射率 T 为:

$$T = 1 - |r|^2 \quad (6)$$

由于光在方形光子晶体波导中传播时横向受限,只有入射角 θ_0 满足下面关系的光才能在方形光子晶体波导中传播^[17]:

$$k^2 \sin^2 \theta_0 = \left(\frac{J_x}{2a} \right)^2 + \left(\frac{J_y}{2a} \right)^2,$$

$$(J_x = 0, 1, 2, 3, \dots; J_y = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (7)$$

式中 k 为入射波的波数, J_x, J_y 为模式量子数。 J_x, J_y 各取一个值,对应于光的一个模式。取中心波长

$\lambda_0 = 600\text{nm}$, $\omega_0 = 2\pi c/\lambda_0$, 设归一化频率 $g = \omega/\omega_0$, 令 $a = x\lambda_0$, (7) 式可化为:

$$\sin\theta_0 = \frac{1}{2xg} \sqrt{J_x^2 + J_y^2},$$

$$(J_x = 0, 1, 2, 3, \dots; J_y = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (8)$$

利用(1)式~(8)式可以研究材料色散对1维方形掺杂光子晶体波导中TE波和TM波各缺陷模的影响。

2 模式的缺陷模特性

为了研究方便,选介质A和B为非色散材料,其折射率分别为 $n_A = 1.38$, $n_B = 3.38$ 。选杂质C为色散材料其复折射率实部 n_C 满足(2)式,取 $\epsilon_b = 2$, $\omega_0 = 8 \times 10^{14}\text{Hz}$, $\gamma = 4 \times 10^{14}\text{Hz}$, $d_A = d_B = \lambda_0/4$, $d_C = \lambda_0/2$, 固定边长 $a = 4\lambda_0$ 。计算出TE波和TM波的 $J_x = 2$, $J_y = 2$ 模式在 $\chi_0 = 0$ 和 $\chi_0 = 0.4$ 两种情况下透射率随归一化频率的响应曲线,分别如图2和图3所示。在图2和图3中,实线对应 $\chi_0 = 0$ 的情况,虚线对应 $\chi_0 = 0.4$ 的情况。由图2和图3可知:(1)对于 $J_x = 2$, $J_y = 2$ 模式,TE波和TM波在无色散($\chi_0 = 0$)和有色散($\chi_0 = 0.4$)都会出现缺陷模,并且色散强度对TE波和TM波缺陷模频率和频率宽度的影响明显;(2)对于TE波,无色散($\chi_0 = 0$)时缺陷模的频率为 $g = 0.82$,有色散($\chi_0 = 0.4$)时缺陷模的频率为 $g = 0.795$,缺陷模的频率宽度略有增大;对于TM波,色散($\chi_0 = 0$)时缺陷模的频率为 $g = 0.825$,有色散($\chi_0 = 0.4$)时缺陷模的频率为 $g = 0.80$,缺陷模的频率宽度也略有增大;在相同色散情况下,TM波缺陷模的频率宽度较TE波宽。

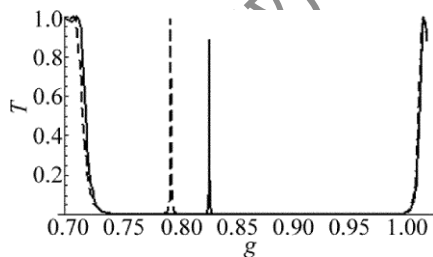


Fig. 2 Response curves of transmissivity versus frequency(TE wave)

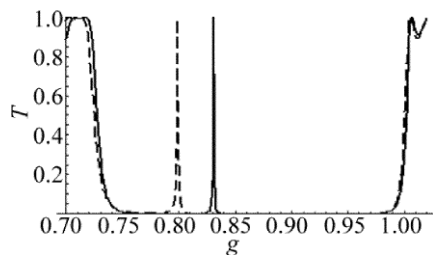


Fig. 3 Response curves of transmissivity versus frequency(TM wave)

为了进一步弄清杂质色散对TE波和TM波缺

陷模的影响,下面从两个方面研究TE波和TM波的缺陷模的变化特征。

2.1 缺陷模随色散强度变化

固定模式量子数 $J_x = 2$, $J_y = 2$, $\mu = 4\lambda_0$, 计算出TE波和TM波的缺陷模频率随色散强度的响应曲线分别见图4和图5,图中,白色带为缺陷模,黑色区域为禁带。由图4和图5可知:(1)对于TE波,当 $\chi_0 = 0$ 时,缺陷模的频率为 $g = 0.82$,缺陷模的频率宽度 $\Delta g = 0.002$ 。随着色散强度的增加,缺陷模的频率单调降低,而缺陷模的频率宽度单调增大;当 $\chi_0 = 1$ 时,缺陷模的频率降低为 $g = 0.76$,频率宽度增大为 $\Delta g = 0.006$; (2)对于TM波,其缺陷模随色散强度的变化规律与TE波相似,但也有不同之处,当色散强度相同时,TM波缺陷模的频率较TE波高,缺陷模的频率宽度较TE波大。

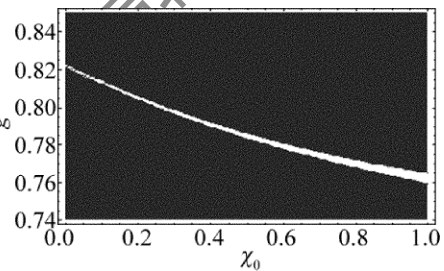


Fig. 4 Response curves of frequency versus dispersion strength(TE wave)

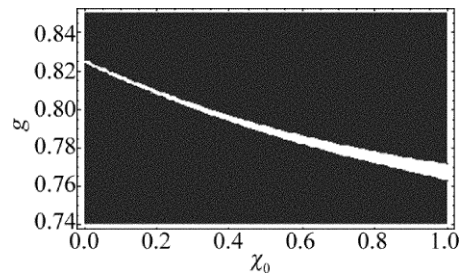


Fig. 5 Response curves of frequency versus dispersion strength(TM wave)

利用TE波和TM波缺陷模随色散强度变化规律,可以通过改变色散强度的大小来实现对波导中TE波和TM波传输特性的控制。

2.2 缺陷模随色散厚度变化

色散厚度是指色散介质C的厚度 d_C ,由于 d_C 变化会引起光在色散介质中的光程变化,因此色散厚度的变化会对波导中缺陷模产生影响。固定 $\chi_0 = 0.4$, $d_A = d_B = \lambda_0/4$, $\mu = 4\lambda_0$, 模式量子数 $J_x = 2$, $J_y = 2$, 计算出TE波和TM波的缺陷模频率随色散厚度的响应分别见图6和图7。在图6和图7中,白色带为缺陷模,黑色区域为禁带。由图6和图7可知:(1)对于TE波,当 $d_C = 0.4\lambda_0$ 时,缺陷模的频率

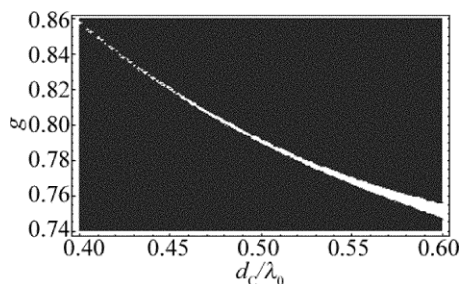


Fig. 6 Response curves of frequency versus dispersion thickness (TE wave)

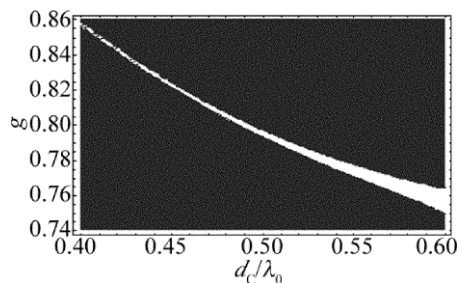


Fig. 7 Response curves of frequency versus dispersion thickness (TM wave)

为 $g = 0.858$, 缺陷模的频率宽度 $\Delta g = 0.001$, 随着色散厚度的增加, 缺陷模的频率单调降低, 而缺陷模的频率宽度单调增大; 当 $d_c = 0.6\lambda_0$ 时, 缺陷模的频率降低为 $g = 0.75$, 频率宽度增大为 $\Delta g = 0.008$; (2) 对于 TM 波, 其缺陷模随色散厚度的变化规律与 TE 波相似, 两者的差别很小。

利用 TE 波和 TM 波缺陷模随色散厚度变化规律, 可以通过改变杂质色散厚度的大小来实现对波导中 TE 波和 TM 波传输特性的控制。

3 结论

利用色散关系和特征矩阵法研究了 1 维方形掺杂光子晶体波导中 TE 波和 TM 波缺陷模的变化特征, 得出了 TE 波和 TM 波的缺陷模随色散强度、色散厚度的变化规律。色散强度和色散厚度都会对 1 维方形掺杂光子晶体波导中 TE 波和 TM 波的缺陷模产生明显的影响。TE 波和 TM 波缺陷模的频率都随色散强度的增加而单调降低, 频率宽度都随色散强度的增加而单调增大; TE 波和 TM 波缺陷模的频率都随色散厚度的增加而单调降低, 频率宽度都随色散厚度的增加而单调增大。利用 TE 波和 TM 波的缺陷模随色散强度、色散厚度的变化规律, 可以有效地实现对 1 维方形掺杂光子晶体波导中 TE 波和 TM 波各传输模式的有效控制。

参 考 文 献

[1] WANG R, ZHANG C X, NIE Y H. Band structure and propaga-

tion properties of one-dimension anisotropy photonic crystals [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(1): 89-92 (in Chinese).

- [2] LI R, REN K, REN X B. Angular and wavelength selectivity of band gaps of holographic photonic crystals for different polarizations [J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(8): 2520-2523 (in Chinese).
- [3] LIU Q N. Filtering feature of 1-D rectangle doping photonic crystal [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(8): 2041-2044 (in Chinese).
- [4] XU J P, WANG L G, YANG Y P. Realization of an angular filter using one-dimensional photonic crystal containing negative refractive metamaterials [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(6): 2765-2768 (in Chinese).
- [5] LIU Q N. The defect mode and the quantum effect of light wave in cylindrical anisotropic photonic crystal [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(1): 0142171 (in Chinese).
- [6] XU X M, FANG L G, LIU N H. Unusual photonic tunneling in multilayer system with a negative refraction index layer [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(12): 1676-1679 (in Chinese).
- [7] SHANG T Y, ZHENG Y, ZHANG H Y. Omnidirectional gap and defect mode of one-dimensional photonic crystals with negative-index materials [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(4): 663-666 (in Chinese).
- [8] LIU Q N. Theoretic study of total reflection through effect polarization filter of photonic crystal [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(4): 1091-1094 (in Chinese).
- [9] LIU Q N. Analytical study on the total reflection tunnel effect of 1-D photonic crystal [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 02190021 (in Chinese).
- [10] LIU Q N. The design of double channel polarization tunable filter of photonic crystal [J]. Laser Technology, 2008, 32(1): 24-27 (in Chinese).
- [11] LIU Q N, LONG T. The defect mode of electromagnetic wave in flat-panel doping photonic crystal [J]. Laser Technology, 2010, 34(3): 363-367 (in Chinese).
- [12] LIU Q N, HU Ch H. Polarization and total reflection tunnel effect of flat-panel photonic crystal [J]. Laser Technology, 2012, 36(1): 114-118 (in Chinese).
- [13] LIU Q N. Quantum effect and defect mode of anisotropic rectangle doping photonic crystal [J]. Laser Technology, 2011, 35(4): 499-503 (in Chinese).
- [14] WANG H, OUYANG Zh G, HAN Y L *et al.* Optical properties and mode tuning of defect modes in one-dimensional photonic crystal micro-cavity containing dispersive medium [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(5): 940-943 (in Chinese).
- [15] GAO J X, WU J J. Influence of the material dispersion on the bandgap of one-dimensional photonic crystal [J]. Journal of Ningxia University (Natural Science Edition), 2011, 32(3): 243-246 (in Chinese).
- [16] XI F, HU L. Defect states in one-dimensional photonic crystal with dispersive negative refractive index metamaterial [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(1): 220-224 (in Chinese).
- [17] LIU Q N. The mode and defect mode of electromagnetic wave in rectangular doped photonic crystal [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(4): 2551-2555 (in Chinese).