

色散对圆柱形光子晶体波导传输模式的影响

刘沁,刘启能

(1. 重庆工商大学设计艺术学院,重庆 400067;2. 重庆工商大学计算机科学与信息工程学院,重庆 400067)

摘要:利用材料的色散关系和特征矩阵法研究了一维圆柱形光子晶体波导中 TE 波和 TM 波模式禁带的变化特征,得出了 TE 波和 TM 波模式禁带随色散强度、色散厚度的变化规律。色散强度和色散厚度都会对一维圆柱形光子晶体波导中 TE 波和 TM 波的模式禁带产生影响。利用 TE 波和 TM 模式禁带随色散强度、色散厚度的变化规律,可实现对一维圆柱形光子晶体波导中 TE 波和 TM 波各传输模式的有效控制。

关键词:光子晶体;色散;波导;模式

中图分类号: O436 **文献标识码:** A

Influence of the Dispersion on Transfer Mode of 1D Cylindrical Photonic Crystal Waveguide

LIU Qin, LIU Qineng

(1. Design and Art Institute of Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China;

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

Abstract: Using the dispersion relation and the characteristic matrix method the mode band gap of TE wave and TM wave in 1D cylindrical photonic crystal waveguide are studied. Response curves of the mode band gap of TE wave and TM wave versus dispersion strength and dispersion thickness are obtained. Dispersion strength and dispersion thickness can produce apparent effect on the mode band gap. Using these laws can effectively control the mode band gap of TE wave and TM wave in 1D cylindrical photonic crystal waveguide.

Key words: photonic crystal; dispersion; waveguide; mode

0 引言

1987年, S. John 和 E. Yablonovitch 提出光子晶体的概念,光子晶体就是其介电常数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控制光波的传播,因此光子晶体成为近年来光学前沿领域内研究的热点问题。一维光子晶体由于结构简单,且易于制备,同时也具备其他高维光子晶体的性质,因而成为人们研究较多的一种光子晶体结构。

目前,人们已对各种结构的一维光子晶体进行了广泛而深入的研究,在带隙特性、缺陷模特性及滤波理论等方面都取得了丰富成果^[1-11]。但在上述研究中都是基于组成光子晶体的电介质材料的折射率和光波频率无关的前提下进行的,即认为介质的折射率为常量。但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。为研究材料的色散对光子晶体传输特性的影响,文献[12]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。文献[13]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。文献[14]研究了负折射材料的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隙的影响特征。文献[15]研究了各向异性圆柱形光子晶体中光的传输特性,但未考虑色散的影响。由于圆柱形光子晶体波导对于控制光的传输有重要的应用,因此,研究色散对圆柱形光子晶体波导中光的传输模式的影响具有理论价值和实用价值。

1 模型与理论

设计这样一种一维有限周期柱形光子晶体波导

收稿日期:2012-10-26

基金项目:重庆市教委科技项目基金资助项目(KJ130713)

作者简介:刘沁(1983-),女,四川泸州人,讲师,主要从事光学及照明设计的研究。E-mail: liuqinecho@163.com.

结构 $(AB)^N$, N 为周期数, A, B 几何厚度分别 d_A, d_B , 对应的介电常数分别为 ϵ_A, ϵ_B , 对应的磁导率分别为 μ_A, μ_B , 该光子晶体被限制在一个半径为 a 的金属圆筒内。入射空间和出射空间都为空气。由于电磁波的频率主要对介电常数产生影响, 因此本文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 $\mu_A = \mu_B = 1$, 则材料的折射率 $n = \sqrt{\epsilon}$ (ϵ 为介质的介电常数)。用洛伦兹振子模型来模拟色散介质的介电常数^[12]有

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

式中 $\epsilon_d, \omega, \omega_0, \gamma$ 和 χ_0 分别为背景材料的介电常数、光波频率、谐振频率、衰减系数和色散强度。改变 $\epsilon_d, \omega_0, \gamma$ 和 χ_0 等参量, 将改变介质材料的色散特性。由式(1)可知, 材料的介电常数为复数, 其 n 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。复折射率实部的色散特性为

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

由式(2)可看出, χ_0 是影响折射率色散特性最重要的因素。为研究 χ_0 对折射率色散特性的影响, 取 $\epsilon_d = 2, \omega_0 = 8 \times 10^{14}$ Hz, $\gamma = 4 \times 10^{14}$ Hz, 计算出 $\chi_0 = 0, 0.2, 0.4$ 三种情况下 $\text{Re } n$ 随 ω 的响应曲线, 如图 1 所示。由图可知, $\chi_0 = 0$ 为水平直线, 其 n 与 ω 无关, 这是通常研究的折射率无色散的情况。当 $\chi_0 = 0.2$ 时, ω 对 n 产生明显的影响, 当 $\omega = 6 \times 10^{14}$ Hz 时, $\text{Re } n = 1.51$, 随着 ω 的增加, n 逐渐减小, 当 ω 增加到 10^{15} Hz 时, $\text{Re } n = 1.36$ 。当 $\chi_0 = 0.4$ 时, $\text{Re } n$ 对 n 对影响更明显, 当 $\omega = 6 \times 10^{14}$ Hz 时, $\text{Re } n = 1.60$, 当 ω 增加到 10^{15} Hz 时, $\text{Re } n = 1.30$ 。

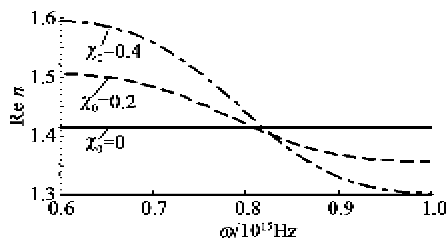


图 1 折射率随频率响应曲线

由于色散的出现, 圆柱形光子晶体波导中光的传输模式也将出现一些新的变化。为研究这种变化可利用特征矩阵法, 该一维圆柱形光子晶体波导的

A, B 两层介质的特征矩阵分别为:

$$m_A = \begin{bmatrix} \cos \delta_A & -\frac{i}{p_A} \sin \delta_A \\ -ip_A \sin \delta_A & \cos \delta_A \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$m_B = \begin{bmatrix} \cos \delta_B & -\frac{i}{p_B} \sin \delta_B \\ -ip_B \sin \delta_B & \cos \delta_B \end{bmatrix} \quad (4)$$

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 $p = \cos \theta/n$ 。该圆柱形光子晶体波导整体的特征矩阵 M 为

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = (m_A m_B)^N \quad (5)$$

当光子晶体置于空气时, 其反射系数为

$$r = \frac{(M_{11} + M_{12} p_0) p_0 - (M_{21} + M_{22} p_0)}{(M_{11} + M_{12} p_0) p_0 + (M_{21} + M_{22} p_0)} \quad (6)$$

其反射率

$$R = |r|^2 \quad (7)$$

由于光在圆柱形光子晶体波导中传播时径向受限, 只有入射角 θ_0 满足下面关系的光才能在圆柱形光子晶体波导中传播^[15]:

$$\sin \theta_0 = \frac{c \mu_i^{(0)}}{\omega a} \leq 1 \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (8)$$

式中: c 为光速; $\mu_i^{(0)}$ 为零阶贝塞尔函数的零点值(见表 1); i 为模式量子数, i 取一个值对应一个模式。中心波长 $\lambda_0 = 1500$ nm, $\omega_0 = 2\pi c/\lambda_0$, 设归一化频率 $g = \omega/\omega_0$, 令 $a = x\lambda_0$, 式(8)可化为

$$\sin \theta_0 = \frac{\mu_i^{(0)}}{2\pi x g} \leq 1 \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (9)$$

表 1 零阶贝塞尔函数的值

$\mu_1^{(0)}$	$\mu_2^{(0)}$	$\mu_3^{(0)}$	$\mu_4^{(0)}$
2.405	5.520	8.654	11.792
$\mu_5^{(0)}$	$\mu_6^{(0)}$	$\mu_7^{(0)}$	$\mu_8^{(0)}$
14.931	18.071	21.212	24.352

利用式(1)~(9)可研究材料色散对一维圆柱形光子晶体波导中 TE 波和 TM 波各传输模式的影响。

2 模式的禁带特性

为研究方便, 选介质 B 为非色散材料, 其复折射率实部 $n_B = 3.35$ 。选介质 A 为色散材料其复折射率实部 n_A 满足式(2), 取 $\epsilon_d = 2, \omega_0 = 8 \times 10^{14}$ Hz, $\gamma = 4 \times 10^{14}$ Hz, $d_A = d_B = \lambda_0/4$, 固定 $a = 2\lambda_0$ 。计算出 TE 波和 TM 波的 $i = 2$ 模式在 $\chi_0 = 0$ 和 $\chi_0 = 0.4$ 两种情况下 R 随 g 的响应曲线, 如图 2, 3 所示。

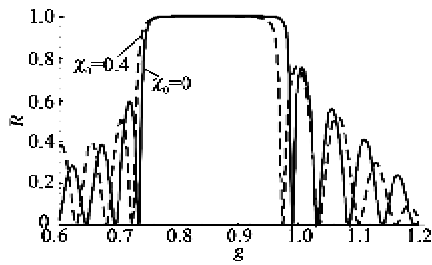


图2 反射率随频率响应曲线(TE波)

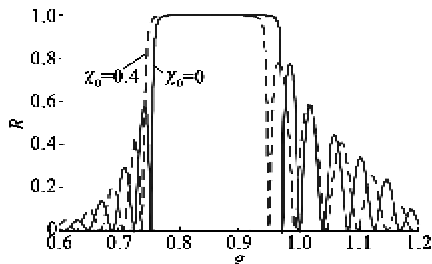


图3 反射率随频率响应曲线(TM波)

由图2、3可知:

1) 对于 $i=2$ 模式, TE 波和 TM 波在无色散 ($\chi_0 = 0$) 和有色散 ($\chi_0 = 0.4$) 都会出现禁带 ($R=1$) 和导带 ($R<1$)。且色散对 TE 波和 TM 波禁带频率和频率宽度的影响明显。

2) 对于 TE 波, 无色散 ($\chi_0 = 0$) 时, 禁带频率中心(归一化频率) $g=0.88$, 有色散 ($\chi_0 = 0.4$) 时, $g=0.87$, 禁带的频率宽度 Δg 约有减小。对于 TM 波, 色散 ($\chi_0 = 0$) 时, $g=0.87$, 有色散 ($\chi_0 = 0.4$) 时, $g=0.86$, Δg 也略有减小。在相同色散情况下, TM 波禁带的 Δg 较 TE 波窄。

2.1 模式禁带随色散强度变化

固定 $i=2$ 模式, 计算出 TE 波和 TM 波的禁带频率随色散强度的响应曲线分别如图 4、5 所示。由图 4、5 可知:

1) 对于 TE 波, 当 $\chi_0 = 0$ 时, $g=0.88$, 禁带的 $\Delta g=0.26$ 。随着色散强度的增加 g 单调降低, Δg 也单调减小。当 $\chi_0 = 1$ 时, $g=0.8$, $\Delta g=0.12$ 。

2) 对于 TM 波, 其模式禁带随色散强度的变化规律与 TE 波相似。但也有不同, 当色散强度相同时 TM 波的 g 较 TE 波低, Δg 较 TE 波小。

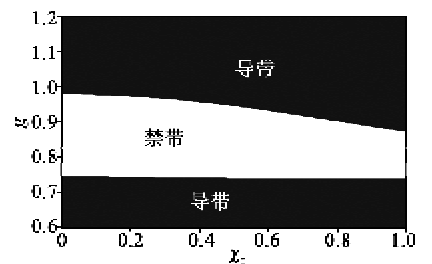


图4 频率随色散强度响应曲线(TE波)

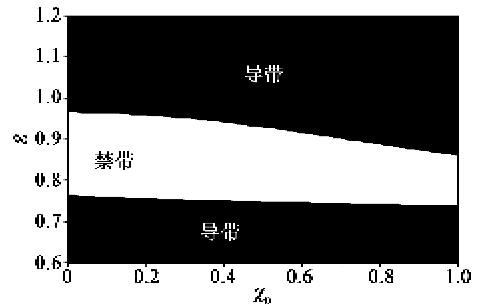


图5 频率随色散强度响应曲线(TM波)

利用 TE 波和 TM 波模式禁带随色散强度变化规律, 可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 模式禁带随色散厚度变化

色散厚度是指色散介质 A 的厚度 d_A , 由于 d_A 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模式的禁带产生影响。固定 $\chi_0 = 0.4$, $d_B = \lambda_0/4$, $i=2$, 计算出 TE 波和 TM 波的禁带频率随色散厚度的响应分别如图 6、7 所示。

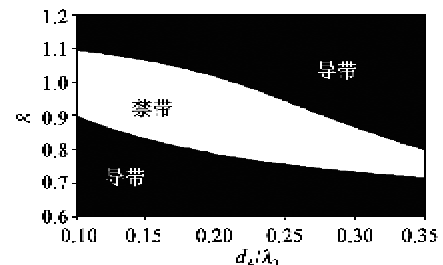


图6 频率随色散厚度响应曲线(TE波)

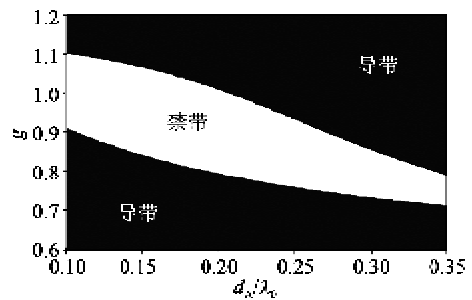


图7 频率随色散厚度响应曲线(TM波)

由图6、7可知:

1) 对于 TE 波, 当 $d_A = 0.1\lambda_0$ 时, $g=0.99$, $\Delta g=0.19$ 。随着 d_A 的增加 g 单调降低, 但禁带的 Δg 不随色散厚度单调变化, 在 d_A 为 $0.10\lambda_0 \sim 0.17\lambda_0$ 范围内 Δg 随着 d_A 的增加而增大, 在 d_A 为 $0.17\lambda_0 \sim 0.35\lambda_0$ 范围内 Δg 随着 d_A 的增加而减小。

2) 对于 TM 波, 其模式禁带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 波模式禁带随色散厚度变化

规律,可通过改变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 结束语

前面利用材料的色散关系和特征矩阵法研究了一维圆柱形光子晶体波导中 TE 波和 TM 波模式禁带的变化特征,得出了 TE 波和 TM 波模式禁带随色散强度、色散厚度的变化规律。色散强度和色散厚度都会对一维圆柱形光子晶体波导中 TE 波和 TM 波的模式禁带产生明显的影响。TE 波和 TM 波模式禁带的频率中心都随色散强度的增加而降低,频率宽度都随色散强度的增加而减小。TE 波和 TM 波模式禁带的频率中心都随色散厚度的增加而降低,但模式禁带的频率宽度不随色散厚度单调变化。利用 TE 波和 TM 模式禁带随色散强度、色散厚度的变化规律,可有效地实现对一维圆柱形光子晶体波导中 TE 波和 TM 波各模式的有效控制。

参考文献:

- [1] 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.
WANG Rui, ZHANG Cunxi, NIE Yihang. Band structure and propagation properties of one-dimension anisotropy photonic crystals[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 35(1):89-92.
- [2] 刘启能. 一种新型优质光子晶体偏振滤波器的设计[J]. 压电与声光, 2010, 32(4):642-645.
LIU Qineng. Design of novel kind of polarization filter on high grade photonic crystal[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2010, 32(4):642-64.
- [3] 刘启能,代洪霞,于奇文. 方形光子晶体的全反射隧穿效应的滤波特性[J]. 压电与声光, 2012, 34(3):351-354.
LIU Qineng, DAI Hongxia, YU Qiwen. Filtering properties of total reflection tunnel effect of square photonic crystal[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2012, 34(3):351-354.
- [4] 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.
LIU Qineng. The mode and defect mode of electromagnetic wave in rectangular doped photonic crystal[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(4):2551-2555.
- [5] 许静平,王立刚,羊亚平. 利用含负折射率材料的光子晶体实现角度滤波器[J]. 物理学报, 2006, 55(6):2765-2768.
XU Jingping, WANG Ligang, YANG Yaping. Realization of an angular filter using one-dimensional photonic crystal containing negative refractive metamaterials[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(6):2765-2768.
- [6] 刘启能. 各向异性圆柱掺杂光子晶体的缺陷模及其量子效应[J]. 物理学报, 2011, 60(1):0142171-0142174.
LIU Qineng. The defect mode and the quantum effect of light wave in cylindrical anisotropic photonic crystal[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(1):0142171-0142174.
- [7] 徐旭明,方利广,刘念华. 含负折射率层的多层体系的反常光子隧穿[J]. 光学学报, 2005, 25(12):1676-1679.
XU Xuming, FANG Liguang, LIU Nianhua. Unusual photonic tunneling in multilayer system with a negative refraction Index layer[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(12):1676-1679.
- [8] 尚廷义,郑义,张会云. 含负折射率材料一维光子晶体的全方位带隙和缺陷模[J]. 光子学报, 2007, 36(4):663-666.
SHANG Tingyi, ZHENG Yi, ZHANG Huiyun. Omnidirectional gap and defect mode of one-dimensional photonic crystals with negative-index materials[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(4):663-666.
- [9] 刘启能. 光子晶体全反射贯穿偏振滤波器的理论研究[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(4):1091-1094.
LIU Qineng. Theoretic study of total reflection through effect polarization filter of photonic crystal[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(4):1091-1094.
- [10] 刘启能. 一维光子晶体的全反射隧穿效应的解析研究[J]. 光学学报, 2012, 32(2):02190021-02190025.
LIU Qineng. Analytical study on the total reflection tunnel effect of 1D photonic crystal[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2):02190021-0219002.
- [11] 韩国军,王伟,张黎明. 山字脊波导传输特性分析[J]. 重庆工学院学报:自然科学版, 2008(7):97-101.
HAN Guojun, WANG Wei, ZHANG Liming. Analysis on transmission characteristics of SHAN ZI-ridge waveguide[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology, Natural Science, 2008(7):97-101.
- [12] 王宏,欧阳征标,韩艳玲,等. 含色散介质的二维光子晶体微腔的光学特性和模式调节[J]. 光学学报, 2007, 27(5):940-943.
WANG Hong, OUYANG Zhengbiao, HAN Yanling, 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.

(下转第 642 页)