

doi:10.3788/gzxb20134205.0611

# 一维光子晶体全反射隧穿的色散特性

刘启能<sup>a</sup>, 刘沁<sup>b</sup>

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

**摘 要:**利用介质材料的色散关系和特征矩阵法研究了一维光子晶体中 TE 波和 TM 波的全反射隧穿效应随色散的变化特征. TE 波和 TM 波全反射隧穿导带的频率中心随色散强度的增加而降低, 频率宽度随色散强度的增加而增大. TE 波和 TM 波的全反射隧穿导带的频率中心随入射角的增加而升高, 频率宽度随入射角的增加而减小. 这些研究结果拓宽了对一维光子晶体中 TE 波和 TM 波波全反射隧穿效应的认识.

**关键词:**光子晶体; 色散; 全反射隧穿; 复折射率

**中图分类号:** O436

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2013)05-0611-4

## Dispersion Characteristics of Total Reflection Tunnel in 1D Photonic Crystal

LIU Qi-neng<sup>a</sup>, LIU Qin<sup>b</sup>

(a. Computer Science and Information Engineering ; b. Design and Art Institute ,  
Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

**Abstract:** Using the dispersion relation and the characteristic matrix method, dispersion characteristics of the total reflection tunnel of TE wave and TM wave in 1D photonic crystal are studied. The total reflection tunnel frequency center decreases with the increase of the dispersion intensity, and the total reflection tunnel frequency width increases with the dispersion of dispersion intensity. The total reflection tunnel frequency center increases with the dispersion of incident angle, and the total reflection tunnel frequency width decreases with the dispersion of incident angle. These findings expand the understanding of the total reflection tunnel of TE wave and TM wave in 1D photonic crystal.

**Key words:** Photonic crystal; Dispersion; Total reflection tunnel; Plural refraction index

## 0 引言

1987 年, S. John 和 E. Yablonovitch 分别提出光子晶体的概念, 所谓光子晶体就是其介电常量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、缺陷模特性以及滤波理论等方面都取得了丰富成果<sup>[1-8]</sup>. 近年来又发现了光以大于全反射角入射一维光子晶体时出现的全反射隧穿现象<sup>[9-10]</sup>, 并对其产生机理展开了研究<sup>[11]</sup>. 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. 文献[12]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

基金项目: 重庆市教委科技项目基金(No. KJ100717)资助

第一作者: 刘启能(1957-), 男, 教授, 主要研究方向为光学与声学. Email: liuqineng@yahoo.com.cn

收稿日期: 2012-08-09; 录用日期: 2012-09-28

化特征. 文献[13]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. 文献[14]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隙的影响特征. 本文将针对材料色散对光子晶体全反射隧穿的影响展开研究.

## 1 模型与理论

设计这样一种一维光子晶体结构, 它由 A 和 B 两种介质材料周期性地交替构成, 构成  $(AB)^N A$  结构,  $N$  为整数, A 和 B 的几何厚度分别  $d_A$  和  $d_B$ , 取  $d_A = d_B = 150$  nm, 对应的介电常量分别为  $\epsilon_A$  和  $\epsilon_B$ , 对应的磁导率分别为  $\mu_A$  和  $\mu_B$ . 由于电磁波的频率主要对介电常量产生影响, 因此本文仅就频率对介电常量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  $n = \sqrt{\epsilon}$ . 用洛伦兹振子模型来模拟色散介质的介电常量<sup>[12]</sup>

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

式中  $\epsilon_d$ 、 $\omega$ 、 $\omega_0$ 、 $\gamma$  和  $\chi_0$  分别为背景材料的介电常量、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  $\chi_0$  等参量, 将改变介质材料的色散特性. 由式(1)可以看出在影响折射率色散特性的诸多因素中色散强度  $\chi_0$  与介电常量  $\epsilon(\omega)$  成正比, 是影响色散关系最重要的因素. 由式(1)可知材料的介电常量为复数, 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.

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

为了研究色散强度  $\chi_0$  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  $\chi_0 = 0, 0.2, 0.4$  三种情况下复折射率实部随频率的响应曲线, 如图 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  $\chi_0 =$

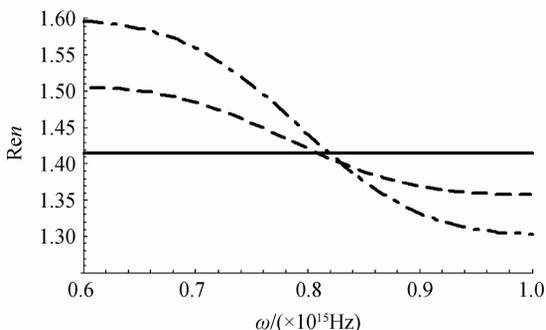


图 1 折射率随频率响应曲线

Fig. 1 Response curves of refractive index versus frequency

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  $\omega = 6 \times 10^{14}$  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  $\omega = 6 \times 10^{14}$  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, 一维光子晶体中光的两种偏振态其带隙机构也将出现一些新的变化. 为了研究这种变化可利用特征矩阵法, 该一维光子晶体 A、B 两层介质的特征矩阵分别为

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

式中  $\delta = (2\pi/\lambda) n d \cos \theta$ ,  $\lambda$  为入射光的波长. 对于 TE 波  $p = n \cos \theta$ ; 对于 TM 波  $p = \cos \theta/n$ . 一维光子晶体整体的特征矩阵  $M$  为

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

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

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

利用式(1)~(6)可以研究折射率的色散对一维光子晶体全反射隧穿效应的影响.

## 2 隧穿效应

为了能够产生全反射隧穿效应, 设该一维光子晶体置于折射率较大的介质中(其折射率为  $n_0$ ), 并且使 B 层介质也为该介质, 即令  $n_B = n_0 = 3.38$  为非色散材料. 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. 当  $\chi_0 = 0.4$  时, 在  $\omega = 0.6 \times 10^{15}$  Hz 对应的全反射角  $\theta_m = \arcsin(1.6/3.38) = 0.493$  rad. 计算出 TE 波和 TM 波以入射角  $\theta_0 = 0.62$  rad 入射, 在无色散  $\chi_0 = 0$  和有色散  $\chi_0 = 0.4$  两种情况下透射率随频率的响应曲线, 分别如图 2(a) 和 (b). 在图 2 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 可知:

1) 当 TE 波和 TM 波以大于全反射角入射该光子晶体时, 在无色散和有色散两种情况下都出现了

4 个明显的透射峰, 这表明 TE 波和 TM 波在有色散时也会产生全反射隧穿效应.

2) 色散对 TE 波和 TM 波的全反射隧穿效应会产生明显的影响, 有色散时 TE 波和 TM 波全反射隧穿峰的频率中心降低, 频率宽度增加. 并且 TM 波的变化比 TE 波的变化更加显著.

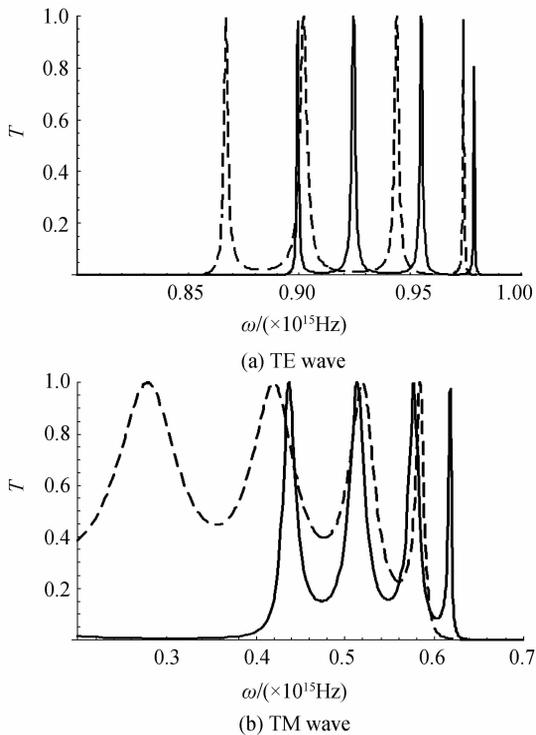


图 2 透射率随频率响应曲线

Fig. 2 Response curves of transmissivity versus frequency

为了进一步弄清色散对 TE 波和 TM 波全反射隧穿效应的影响规律, 下面研究 TE 波和 TM 波全反射隧穿导带的频率随色散强度的变化特征以及随入射角的变化特征.

### 2.1 隧穿导带随色散强度变化

固定入射角  $\theta_0 = 0.62 \text{ rad}$ , 计算出 TE 波和 TM 波的全反射隧穿导带频率随色散强度的响应曲线分别如图 3(a) 和 (b), 在图 3 中白色带为隧穿导带, 黑色区域为禁带. 由图 3 可知:

1) 对于 TE 波, 4 条全反射隧穿导带的频率中心都随色散强度的增加而降低, 4 条全反射隧穿导带的频率宽度都随色散强度的增加而增大, 相邻两条全反射隧穿导带的频率中心间隔都随色散强度的增加而增大.

2) 对于 TM 波, 4 条全反射隧穿导带的频率中心、频率宽度以及相邻导带的频率中心间隔随色散强度的变化特征与 TE 波相似. 但也有不同之处, 即对于同一  $\chi_0$  值, TM 波的 4 条全反射隧穿导带的频率中心比对应的 TE 波低, 但频率宽度都比对应的 TE 波大.

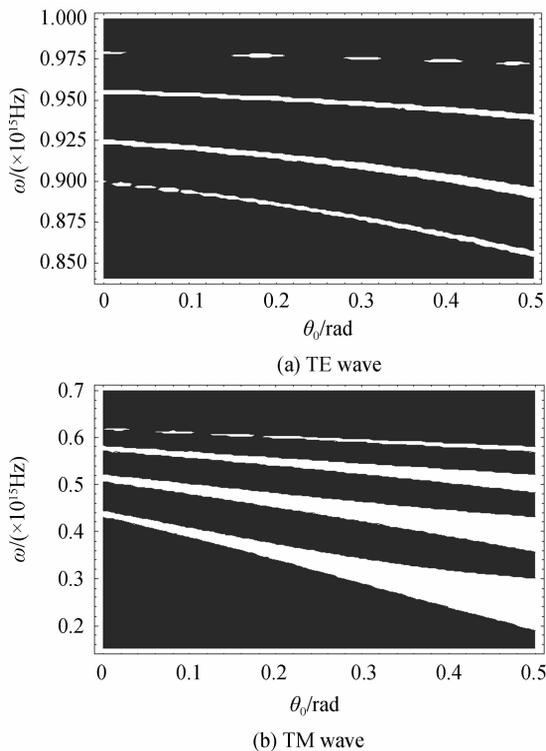


图 3 频率随色散强度响应曲线

Fig. 3 Response curves of frequency versus dispersion

### 2.2 隧穿导带随入射角变化

为了研究有色散情况下入射角对 TE 波和 TM 波全反射隧穿导带的影响, 固定  $\chi_0 = 0.4$ , 计算出 TE 波和 TM 波全反射隧穿导带的频率随入射角的响应曲线分别如图 4(a) 和 (b), 在图 4 中白色带为

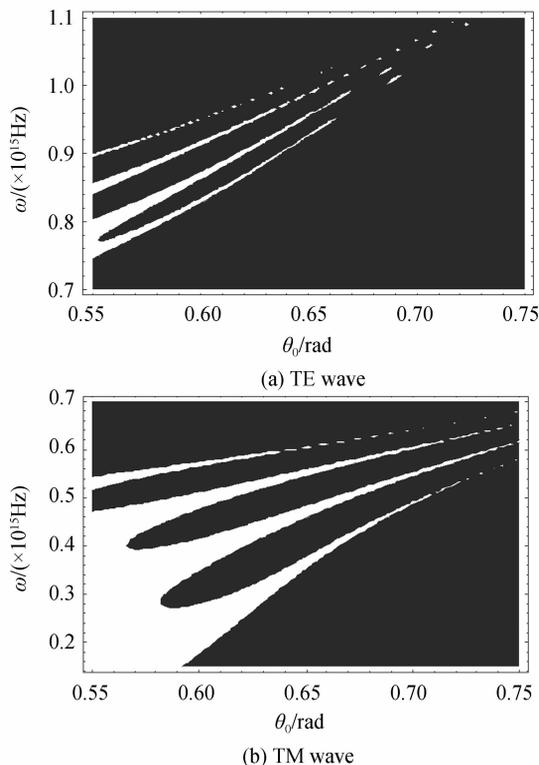


图 4 频率随入射角响应曲线

Fig. 4 Response curves of frequency versus incident angle

隧穿导带, 黑色区域为禁带. 由图 4 可知:

1) 对于 TE 波, 4 条全反射隧穿导带的频率中心都随入射角的增加而升高, 4 条全反射隧穿导带的频率宽度都随入射角的增加而减小, 相邻两条全反射隧穿导带的频率中心间隔都随入射角的增加而减小.

2) 对于 TM 波, 4 条全反射隧穿导带的频率中心、频率宽度以及相邻导带的频率中心间隔随入射角的变化特征与 TE 波相似. 但也有不同之处, 即对于同一入射角, TM 波 4 条全反射隧穿导带的频率中心比对应的 TE 波低, 但频率宽度都比对应的 TE 波大.

### 3 结论

前面利用介质材料的色散关系和特征矩阵法研究了一维光子晶体中 TE 波和 TM 波的全反射隧穿效应随色散的变化特征. 得出: 介质材料的色散会对一维光子晶体中 TE 波和 TM 波全反射隧穿导带产生明显的影响. TE 波和 TM 波的全反射隧穿导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增大. TE 波和 TM 波的全反射隧穿导带的频率中心都随入射角的增加而升高, 频率宽度都随入射角的增加而减小. 这些研究结果拓宽了对一维光子晶体中 TE 波和 TM 波的全反射隧穿效应的认识.

#### 参考文献

- [1] WANG Rui, ZHANG Cun-xi, NIE Yi-hang. Band structure and propagation properties of one-dimension anisotropy photonic crystals[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **35**(1): 89-92.  
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.
- [2] LI Rong, REN Kun, REN Xiao-bin. 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.
- [3] LIU Qi-neng. Transmission characteristics of electromagnetic wave in 1d rectangle photonic crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(5): 847-850.  
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.
- [4] LIU Qi-neng. The mode and defect mode of electromagnetic wave in rectangular doped photonic crystal[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(4): 2551-2555.  
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.
- [5] XU Jing-ping, WANG Li-gang, YANG Ya-ping. Realization of an angular filter using one-dimensional photonic crystal containing negative refractive metamaterials[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(6): 2765-2768.  
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.
- [6] LIU Qi-neng. The defect mode and the quantum effect of light wave in cylindrical anisotropic photonic crystal [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(1): 0142171-0142174.  
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.
- [7] XU Xu-ming, FANG Li-guang, LIU Nian-hua. Unusual photonic tunneling in multilayer system with a negative refraction index layer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12): 1676-1679.  
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.
- [8] WANG H, FANG Y T. Tunable multi-channeled filter based on ultra-compact coupled-resonators [J]. *European Physical Journal-Applied Physics*, 2010, **52**(3): 30703.
- [9] FANG Yun-tuan, LIANG Zhong-cheng. Unusual transmission through usual one-dimensional photonic crystal in the presence of evanescent wave[J]. *Optics Communications*, 2010, **283**(2): 2102-2106.
- [10] LIU Qi-neng. Total reflection through effect of light in 1D photonic crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 232-235.  
刘启能. 光在一维光子晶体中的全反射贯穿效应[J]. *光子学报*, 2011, **40**(2): 232-235.
- [11] LIU Qi-neng. Analytical study on the total reflection tunnel effect of 1D photonic crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 02190021-02190025.  
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.
- [12] WANG Hong, OU-YANG Zheng-biao, HAN Yan-ling, *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.  
王宏, 欧阳征标, 韩艳玲, 等. 含色散介质的一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.
- [13] GAO Jin-xia, WU Ji-jiang. 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.  
高金霞, 武继江. 材料色散对一维光子晶体带隙的影响研究[J]. *宁夏大学学报(自然版)*, 2011, **32**(3): 243-246.
- [14] XI Feng, HU Li. Defect states in one-dimensional photonic crystal with dispersive negative refractive index metamaterial [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, **24**(1): 85-88.  
席锋, 胡莉. 色散负折射特异介质的 1 维光子晶体缺陷态[J]. *强激光与粒子束*, 2012, **24**(1): 85-88.