

doi: 10.3788/gzxb20124101.0116

# 各向异性光子晶体的全反射隧穿偏振特性

刘启能

(重庆工商大学 废油资源化技术与装备教育部工程研究中心; 计算机科学与信息工程学院, 重庆 400067)

**摘要:** 为了研究一维各向异性光子晶体的全反射隧穿偏振特性, 利用传输矩阵法计算了 TE 波和 TM 波以大于全反射角入射一维各向异性光子晶体时的透射率, 在透射波中发现了 TE 波和 TM 波的一、二级全反射隧穿带. 得出了与一维各向同性光子晶体的全反射隧穿效应的不同点, 即 TE 波和 TM 波的一、二级全反射隧穿带的频率中心和频率宽度存在着较大的差异, 利用这个特性可以将两种偏振光进行频率分离, 为设计优质偏振滤波器提供理论依据.

**关键词:** 各向异性光子晶体; 全反射; 隧穿效应; 偏振

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)01-0116-5

维各向异性光子晶体时的传输特性.

## 0 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<sup>[1-2]</sup>. 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>[2-13]</sup>. 文献[14]中研究了光以大于全反射角入射一维各向同性光子晶体时出现的全反射隧穿现象, 得出了一维各向同性光子晶体的全反射隧穿现象随入射角和结构参数的变化特征. 文献[15]进一步研究了一维各向同性光子晶体的全反射隧穿效应的滤波特性, 发现一维各向同性光子晶体的全反射隧穿效应比一维掺杂光子晶体具有更好的梳状滤波特性. 对于光子晶体出现的全反射隧穿这一新现象还有很多问题没有弄清楚, 有待做进一步的研究. 由于两种偏振光(TE 波和 TM 波)在各向异性介质中传播的光程不同, 会使两种偏振光在一维各向异性光子晶体中的传输特性与一维各向同性光子晶体相比有着很大差异<sup>[13]</sup>. 本文将利用传输矩阵法研究 TE 波和 TM 波两种偏振光以大于全反射角入射一

## 1 模型与方法

各异性材料/各向同性材料构成的一维光子晶体由各向异性介质硝酸钠和各向同性介质碲化铅周期性交替组成, 如图 1. 硝酸钠是单轴晶体, 其光轴如图中 $\otimes$ 所示, 它的两个折射率分别为  $n_o = 1.587$  和  $n_e = 1.336$ , 其厚度为  $d_1 = 95$  nm. 碲化铅折射率为  $n_2 = 4.1$ , 其厚度为  $d_2 = 37$  nm. 当 TE 波在硝酸钠传播时其折射率为  $n_e = 1.336$ , 当 TM 波在硝酸钠传播时其折射率为  $n_o = 1.587$ . 设入射空间和出射空间的介质也为碲化铅, 由于该光子晶体的两边空间都为碲化铅, 因此它的周期数为  $N + 0.5$ ,  $N$  为整数. 又因  $n_2 > n_o, n_2 > n_e$ , 所以当 TE 波和 TM 波以大于全反射角入射该一维各向异性光子晶体时都会出现全反射现象.

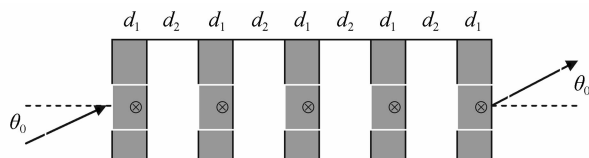


图 1 一维各向异性光子晶体

Fig. 1 1D anisotropic photonic crystal

为了研究 TE 波和 TM 波以大于全反射角入射该一维各向异性光子晶体时出现的全反射隧穿效应, 利用文献[16]中推出的分层介质中光波的传输矩阵, 其一个周期的传输矩阵  $m$  为

$$m = m_{21} m_1 m_{12} m_2 \quad (1)$$

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和声学. Email: liuqineng@yahoo.com.cn

收稿日期: 2011-06-27; 修回日期: 2011-10-30

式中

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

$$m_2 = \begin{bmatrix} e^{-ik_2 d_2 \cos \theta_2} & 0 \\ 0 & e^{ik_2 d_2 \cos \theta_2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

对 TE 波有

$$m_{ij} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + \frac{n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i} & 1 - \frac{n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i} \\ 1 - \frac{n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i} & 1 + \frac{n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i} \end{pmatrix} \quad (3)$$

对 TM 波有

$$m_{ij} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \frac{n_j + \cos \theta_j}{n_i} & \frac{n_j - \cos \theta_j}{n_i} \\ \frac{n_j - \cos \theta_j}{n_i} & \frac{n_j + \cos \theta_j}{n_i} \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中  $\theta$  为传播角,  $n$  为折射率,  $k=2\pi/\lambda$  为波矢. 整个光子晶体的传输矩阵  $M$  为

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = m^N (m_{21} m_1 m_{12}) \quad (5)$$

光通过该光子晶体的反射系数  $r$  分别为

$$r = M_{21}/M_{11} \quad (6)$$

不计材料的吸收时, 光通过该光子晶体的透射率  $T$  为

$$T = 1 - r^2 \quad (7)$$

利用式(1)~(7)可以研究 TE 波和 TM 波以大于全反射角入射该一维各向异性光子晶体时出现的全反射隧穿效应. 下面的计算中取中心波长  $\lambda_0 = 600 \text{ nm}$ 、 $N=5$ 、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  $g = \omega/\omega_0$  ( $\omega$  为入射光的圆频率).

## 2 全反射隧穿效应

由光的折射定律可知, 当光从折射率( $n_2$ )大的介质入射到折射率( $n_e$  和  $n_o$ )小的介质的分界面时会出现全反射现象, 对 TE 波其全反射角为  $\theta_{TE} = \arcsin n_e/n_2 = 0.33 \text{ rad}$ , 对 TM 波其全反射角为  $\theta_{TM} = \arcsin n_o/n_2 = 0.40 \text{ rad}$ . 为了便于比较, 计算出 TE 波和 TM 波从碲化铅中射入到硝酸钠单一界面上其透射率随入射角的响应曲线, 如图 2, 由图 2 可以清楚地看出:

1) 当 TE 波小于全反射角入射时透射率随入射角的增加而减小, 当入射角接近全反射角(0.33 rad)时透射率迅速降低为 0. 当入射角大于全反射角时透射率恒为 0, 这表明 TE 波不能进入硝酸钠内.

2) 当 TM 波小于全反射角入射时透射率随入射角的增加而增大, 当入射角接近全反射角(0.40 rad)

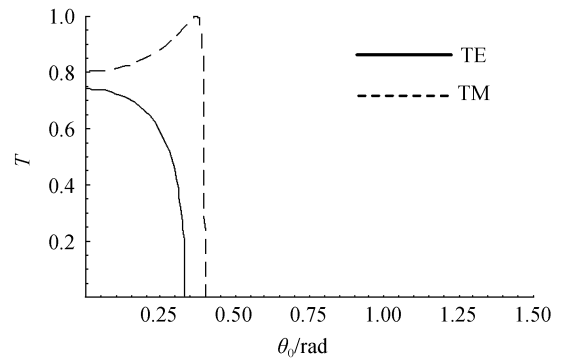


图 2 单一界面上透射率随入射角的响应曲线

Fig. 2 Response curves of transmissivity of interface versus incident angle

时透射率迅速降低为 0. 当入射角大于全反射角时透射率恒为 0, 这表明 TM 波也不能进入硝酸钠内.

上述结果这表明对于单一界面, 当 TE 波和 TM 波大于全反射角入射时都不能产生全反射隧穿现象, 并且这一特征与入射波的频率无关.

再来研究 TE 波和 TM 波入射该一维各向异性光子晶体的情况, 计算出归一化频率  $g=1$  的 TE 波和 TM 波入射该光子晶体时其透射率随入射角的响应曲线, 如图 3. 由图 3 可以清楚地看出它与图 2 有明显的不同.

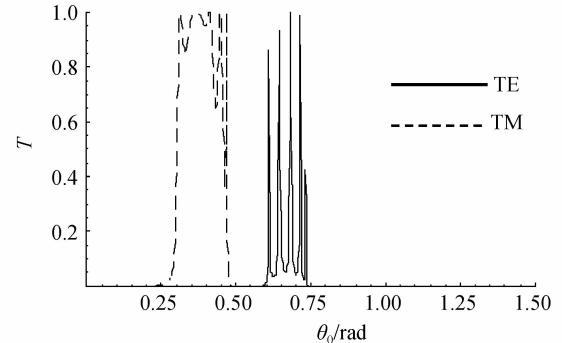


图 3 光子晶体的透射率随入射角的响应曲线

Fig. 3 Response curves of transmissivity of photonic crystal versus incident angle

1) 当归一化频率  $g=1$  的 TE 波小于全反射角入射时透射率都为 0, 即在  $\theta_0 = 0 \sim 0.33 \text{ rad}$  范围内出现了禁带, 这是光子晶体的基本特性. 但当 TE 波大于全反射角(0.33 rad)入射时出现了新的现象, 在入射角  $\theta_0 = 0.60 \sim 0.75 \text{ rad}$  间出现了多个明显的透射峰, 将这一新现象称为全反射隧穿效应.

2) 当归一化频率  $g=1$  的 TM 波小于全反射角入射时, 在  $\theta_0 = 0 \sim 0.27 \text{ rad}$  范围内透射率为 0 是禁带, 在  $\theta_0 = 0.27 \sim 0.40 \text{ rad}$  范围内其透射率为 1 是导带. 但当 TM 波大于全反射角(0.40 rad)入射时也出现了新的现象, 在入射角  $\theta_0 = 0.40 \sim 0.47 \text{ rad}$  间出现了透射率为 1 的透射峰带. 这表明 TM 波大于全反射角入射该一维各向异性光子晶体时也会产

生全反射隧穿效应.

上述结果表明当 TE 波和 TM 波两个偏振光以大于全反射角入射一维各向异性光子晶体时都会出现全反射隧穿效应.

为了弄清两个偏振光的全反射隧穿效应的变化规律,分别从三个方面给予研究,即 TE 波和 TM 波的全反射隧穿效应随入射角的变化特征、随频率的变化特征、随各向异性介质厚度的变化特征.

### 2.1 隧穿效应随入射角的响应

为了研究 TE 波和 TM 波的全反射隧穿效应随入射角的响应特征,固定  $N=5$ ,计算出 TE 波和 TM 波的全反射隧穿效应的频率随入射角的响应曲线,如图 4.在图 4 中横坐标表示入射角,纵坐标表示入射波的归一化频率,白色部分为全反射隧穿带,黑色部分为禁带.由图 4 可以看出:

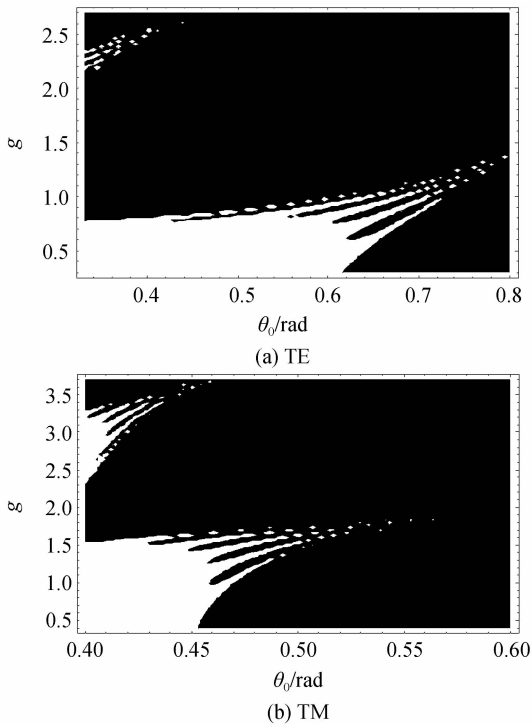


图 4 隧穿带的频率随入射角的响应曲线

Fig. 4 Response curves of frequency versus incident angle

1) 对于 TE 波在入射角大于全反射角  $\theta_{TE} = 0.33$  rad 的区域内出现了两条全反射隧穿带,归一化频率较低的一条其频率范围较宽、对应的入射角范围较大,全反射隧穿带明显,作者将其称为一级全反射隧穿带.归一化频率较高的一条其频率范围较窄、对应的入射角范围较小,全反射隧穿效应较弱,作者将其称为二级全反射隧穿带.在文献[12]的研究中没有发现二级全反射隧穿带.对于一级全反射隧穿带,随着入射角的逐渐增大其频率中心逐渐增加、而频率宽度逐渐减小.当入射角增大到 0.80 rad 时,全反射隧穿带的频率宽度减小为零,全

反射隧穿现象消失.对于二级全反射隧穿带其频率中心和频率宽度随入射角的变化规律与一级全反射隧穿带相似.一级和二级全反射隧穿带随入射角的逐渐增大会分裂为多条细带.

2) 对于 TM 波在入射角大于全反射角  $\theta_{TM} = 0.40$  rad 的区域内也出现了一级和二级全反射隧穿带. TM 波的二级全反射隧穿带比 TE 波的更加明显,但 TM 波的一级和二级全反射隧穿带对应的入射角范围比 TE 波小. TM 波一级和二级全反射隧穿带的频率中心随入射角的增大而增加,其频率宽度随入射角的增大而减小.

### 2.2 隧穿效应的频率特性

为了研究 TE 波和 TM 波的一级、二级全反射隧穿带的频率特性,对于 TE 波固定入射角  $\theta_0 = 0.35$  rad,对于 TM 波固定入射角  $\theta_0 = 0.43$  rad,计算出 TE 波和 TM 波的透射率随频率的响应曲线,如图 5.由图 5 可以看出:

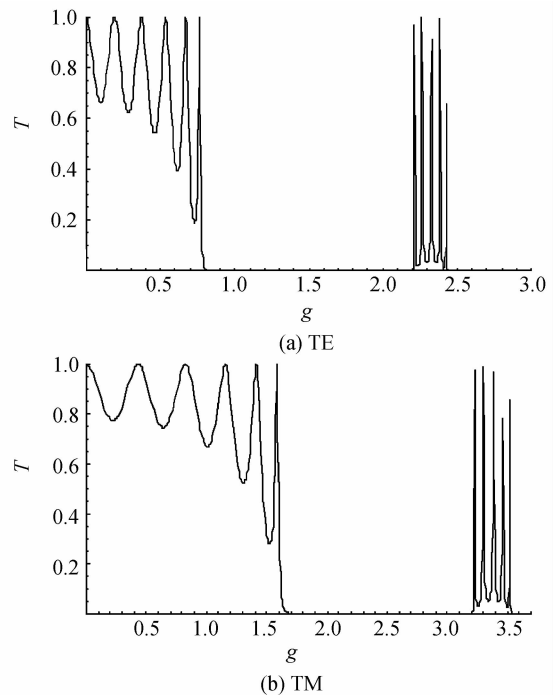


图 5 透射率随频率的响应曲线

Fig. 5 Response curves of transmissivity versus frequency

1) 当 TE 波以入射角  $\theta_0 = 0.35$  rad 入射时,一级全反射隧穿带的频率范围在  $g=0\sim 0.8$  之间,一级全反射隧穿带由 5 个峰组成.二级全反射隧穿带的频率范围在  $g=2.2\sim 2.4$  之间,二级全反射隧穿带也是由 5 个峰组成,并且这 5 个峰之间的间隔清晰、频率间距均匀,具有很好的梳状滤波特性,可以利用它来设计优质梳状 TE 波偏振滤波器.

2) 当 TM 波以入射角  $\theta_0 = 0.43$  rad 入射时,一级全反射隧穿带的频率范围在  $g=0\sim 1.6$  之间,比 TE 波的频率范围宽,一级全反射隧穿带也由 5 个

峰组成. 二级全反射隧穿带的频率范围在  $g=3.2\sim 3.5$  之间, 二级全反射隧穿带也是由 5 个峰组成, 并且这 5 个峰之间的间隔清晰, 频率间距均匀, 具有很好的梳状滤波特性, 可以利用它来设计优质梳状 TM 波偏振滤波器.

### 2.3 隧穿效应随各向异性介质厚度的响应

引起各向异性光子晶体与各向同性光子晶体的传输特性差异的原因在于各向异性介质折射率的特殊性质, 这里研究各向异性介质的厚度对全反射隧穿效应产生的响应. 固定  $d_2=37\text{ nm}$ , 令各向异性介质的厚度  $d_1=X\times 37\text{ nm}$ ,  $X$  为无量纲的参变量, 通过  $X$  的变化来描述各向异性介质的厚度变化. 为了便于对比, 令 TE 波和 TM 波以同一入射角  $\theta_0=0.42\text{ rad}$  入射, 计算出 TE 波和 TM 波的全反射隧穿带的频率随各向异性介质厚度的响应曲线, 如图 6. 图 6 白色部分为全反射隧穿带, 黑色部分为禁带. 由图 6 可以看出:

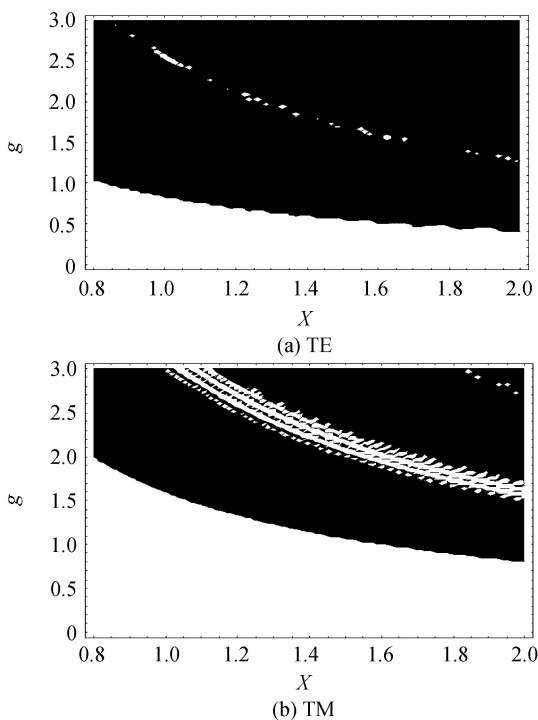


图 6 频率随各向异性介质厚度的响应曲线

Fig. 6 Response curves of frequency versus thickness

1) 当 TE 波以入射角  $\theta_0=0.42\text{ rad}$  入射时, 一级全反射隧穿带为图中下部分的白色宽带, 其下边缘的归一化频率为  $g=0$ , 其上边缘的归一化频率随各向异性介质厚度的增加而减小. 二级全反射隧穿带为图中中间的细白色带, 其归一化频率随各向异性介质厚度的增加而减小.

2) 当 TM 波以入射角  $\theta_0=0.42\text{ rad}$  入射时, 一级全反射隧穿带也为图中下部分的白色宽带, 其下边缘的归一化频率为  $g=0$ , 上边缘的归一化频率随各向异性介质厚度的增加而减小. TM 波的一级

全反射隧穿带的频率宽度明显大于 TE 波. 二级全反射隧穿带也为图中中间的细白色带, 其归一化频率随各向异性介质厚度的增加而减小. TM 波的一级全反射隧穿带的频率宽度明显大于 TE 波, 并且在相同各向异性介质厚度下 TM 波的一级全反射隧穿带的频率中心较 TE 波大, 利用这一特征可以将两种偏振光进行频率分离, 这为设计优质偏振滤波器提供理论依据. 这一特征一维各向同性光子晶体不具有的.

## 3 结论

本文利用传输矩阵法研究了 TE 波和 TM 波以大于全反射角入射一维各向异性光子晶体时所产生的全反射隧穿效应. 通过计算发现当 TE 波和 TM 波以大于全反射角入射一维各向异性光子晶体时不仅会出现一级全反射隧穿带, 而且还会出现二级全反射隧穿带. TE 波和 TM 波的一、二级全反射隧穿带随入射角和各向异性介质厚度的变化有相似的特征. 它们的频率中心都随入射角的增大而增大, 全反射隧穿效应都随入射角的增大而减弱. 它们的频率中心都随各向异性介质厚度增大而减小. 得出了与一维各向同性光子晶体的全反射隧穿效应的不同点, 即 TE 波和 TM 波的一、二级全反射隧穿带的频率中心和频率宽度存在较大的差异, 利用这个特性可以将 TE 波和 TM 波两种偏振光进行频率分离, 为设计优质偏振滤波器提供理论依据.

### 参考文献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission solid-state physics and electronics[J]. *Physical Review Letters*, 1987, **58**(20): 2059-2061.
- [2] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Physical Review Letters*, 1987, **58**(23): 2486-2489.
- [3] ZHANG Deng-guo, NI Na, AN He-nan. Electromagnetic field analysis and numerical calculation of one-dimensional magneto-phonic crystal[J]. *Acta Photnica 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.
- [4] WANG Rui, ZHANG Cun-xi, NIE Yi-hang. Band structure and propagation properties of one-dimension anisotropy photonic crystals[J]. *Acta Photnica 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, **36**(1): 89-92.
- [5] LIU Qi-neng. Properties of polarization of defect mode of one-dimensional photonic crystal[J]. *Acta Photnica Sinica*, 2007, **36**(8): 1432-1435.  
刘启能. 一维光子晶体缺陷模偏振特性的研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(8): 1432-1435.
- [6] LIU Qi-neng. Theoretical study of multi-channel polarization tunable filter of photonic crystal[J]. *Acta Photnica 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.
- [7] 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.
- [8] LIU Qi-neng. Filtering feature of 1D rectangle doping photonic crystal[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(8): 2041-2044.  
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 Qi-neng. A new simple and convenient method for study of poroperties forbidden band of one-dimensional photonic crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 1031-1034.  
刘启能. 一种简便的研究一维光子晶体禁带特征的方法[J]. 光子学报, 2007, **36**(6): 1031-1034.
- [10] LIU Qi-neng. Defect mode and mode of electromagnetic wave in cylindrical doping photonic crystal[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(4): 991-994.  
刘启能. 圆柱形掺杂光子晶体中电磁波的模式和缺陷模[J]. 中国激光, 2010, **37**(4): 991-994.
- [11] 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.
- [12] ZHU Zhi-hong, YE Wei-min, JI Jia-rong. Cascaded taper for mode coupling between photonic crystal waveguide and classical waveguide[J]. *Acta Photonica Sinica* 2008, **37**(8): 1411-1414  
朱志宏, 叶卫民, 季家镛. 用级联渐变结构实现光子晶体波导和传统波导的耦合[J]. 光子学报, 2008, **37**(8): 1411-1414.
- [13] FANG Liang, ZHAO Jian-lin, GAN Xue-tao. Generation and control of supercontinuum in photonic crystal fibers with two-zero dispersion wavelengths[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(11): 1801-1804.  
方亮, 赵建林, 甘雪涛. 双零色散光子晶体光纤中超连续谱的产生及控制[J]. 光子学报, 2010, **39**(11): 1801-1804.
- [14] 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.
- [15] LIU Qi-neng. Theoretic study of total reflection through effect polarization filter of photonic crystal[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(4): 1091-1094.  
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.
- [16] LIU Qi-neng. A new method that study electromagnetic waves transfer in stratified medium [J]. *Laser Journal*, 2009, **30**(3): 14-15.  
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.

## Polarization Properties of Total Reflection Tunnel Effect of 1D Anisotropic Photonic Crystal

LIU Qi-neng

(Engineering Research Center for Waste Oil Recovery Technology and Equipment (Ministry of Education);  
Computer Science and Information Engineering College, Chongqing Technology and Business University,  
Chongqing 400067, China)

**Abstract:** For studying polarization properties of total reflection tunnel effect of 1D anisotropic photonic crystal, the transition matrix method is adopted, and the transmissivity of TE wave and TM wave are studied when incident angle greater than full reflection angle. 1 grade and 2 grade total reflection tunnel effects are found in the transmission wave. Some new properties of total reflection tunnel effect of 1D anisotropic photonic crystal are btained. Tunnel frequencies of TE wave and TM wave have great differences, and this feature can be achieved using frequency separation of TE wave and TM wave, which can be used in the design of high-quality polarizing filter.

**Key words:** Anisotropic photonic crystal; Total reflection; Tunnel effect; Polarization