

一维掺杂光子晶体中偏振光缺陷模的光场分布

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 利用 TM 波的边界条件, 推导出 TM 波在一维光子晶体中光场的分布公式, 研究了 TM 波和 TE 波在一维掺杂光子晶体中光场的分布规律。结果表明, 缺陷模中 TM 波和 TE 波在杂质层附近光场的分布呈现共振的特征。禁带中 TM 波和 TE 波的光场随着光程厚度的增加而迅速衰减。

关键词 材料; 光电子学; 光子晶体; 缺陷模; 偏振光; 光场

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1116001

Field Distribution of Polarized Light of Defect Mode in One-Dimensional Doping Photonic Crystal

Liu Qineng

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

Abstract Using the boundary conditions of TM wave, the light field of TM wave in one-dimensional (1D) doping photonic crystal is deduced, and the light fields of defect modes of TE wave and TM wave in 1D doping photonic crystal are studied. The light fields of defect modes of TE wave and TM wave exhibit the characteristic of resonance in impurity layer, and the light fields decrease with the increase of the optical thickness in band gap.

Key words materials; optoelectronics; photonic crystal; defect mode; polarized light; light field

OCIS codes 160.5298; 220.2560; 220.4830; 260.2160

1 引言

自 Yablonovitch^[1] 和 John^[2] 于 1987 年提出光子晶体的概念以来, 由于利用光子晶体的带隙可以十分方便地控制光波的传播, 因此对光子晶体的研究很快成为光学的前沿领域内一个活跃的课题。在光子晶体的研究中由于一维(1D)光子晶体的结构最简单, 研究最方便, 且具有其他高维光子晶体的基本属性, 因此对一维光子晶体的研究成为光子晶体研究领域内的重要内容。

近年来人们对一维光子晶体的带隙特性^[3-5]、缺陷模特性^[6-8]、滤波特性^[9-12]以及全反射隧穿特性^[13-16]等方面都做了深入的研究。最近, 文献^[17]对一维光子晶体中 TE 波的光强分布特征开展了研究, 推导出了 TE 波在一维光子晶体中的特征矩阵和光强分布公式, 利用特征矩阵和光强分布公式研

究了一维光子晶体中 TE 波的光强分布特征, 得出了很有意义的结果, 为人们认识一维光子晶体中 TE 波的光强分布规律提供了有价值的参考。但是, 文献^[17]在推导 TE 波特征矩阵的过程中关于 TE 波通过介质层的相位差公式出现了一个错误, 使计算结果与正确结论产生偏差, 没有对另一种偏振光 TM 波在一维光子晶体中的光场分布做研究。故本文将重新推导光通过介质层的相位差公式, 推导 TM 波在一维光子晶体中的光场分布公式, 利用这些公式研究在一维掺杂光子晶体内部 TE 波和 TM 波两种偏振光的光场分布规律。

2 公式推导

设平行光射入折射率为 n 、厚度为 a 的介质层, 其入射点为 A_1 , 出射点为 A_2 , 如图 1 所示^[18]。通过

收稿日期: 2013-05-08; 收到修改稿日期: 2013-06-15

基金项目: 重庆市教委科技项目(KJ130713)

作者简介: 刘启能(1957—), 男, 教授, 主要从事光学与声学等方面的研究。E-mail: liuqineng57@163.com

入射点 A_1 的等相位面为 Σ_1 (虚线), 通过出射点 A_2 的等相位面为 Σ_2 (虚线)。由图 1 可知, Σ_1 和 Σ_2 间的光程差为 $na \cos \theta$, Σ_1 和 Σ_2 间的相位差 δ_a 为^[19]

$$\delta_a = \frac{\omega}{c} na \cos \theta, \quad (1)$$

纠正了文献[17]中的相位差 $\delta_a = \frac{\omega}{c} na \frac{1}{\cos \theta}$, 其中 ω 为圆频率, c 为真空中的光速。

TM 波在一维光子晶体中光场的分布如图 2 所

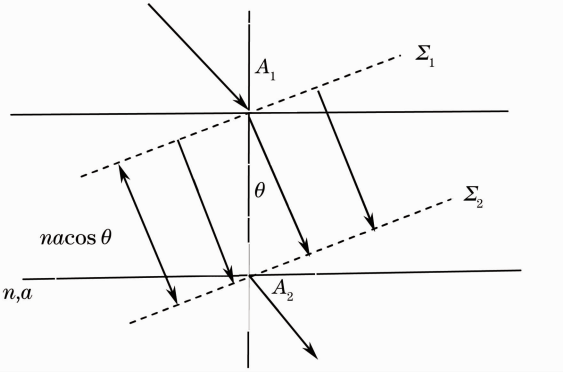


图 1 光波在介质层中的相位差

Fig. 1 Phase difference of light in dielectric layer

示。设 TM 波在入射空间磁矢量为 H_0 、电矢量的切向分量为 $E_{0//}$, TM 波通过一维光子晶体中任意一层 Δz_m 后的磁矢量为 H 、电矢量的切向分量为 $E_{//}$ 。根据特征矩阵的关系有

$$\begin{bmatrix} E_{0//} \\ H_0 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \mathbf{M}_3 \cdots \mathbf{M}_m \begin{bmatrix} E_{//} \\ H \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} E_{//} \\ H \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 \mathbf{M}_i 为 TM 波通过第 i 层介质中的特征矩阵, \mathbf{M} 为 TM 波通过前 m 层介质中的特征矩阵。由(2)式得

$$\begin{bmatrix} E_{//} \\ H \end{bmatrix} = \mathbf{M}^{-1} \begin{bmatrix} E_{0//} \\ H_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11}^{-1} & M_{12}^{-1} \\ M_{21}^{-1} & M_{22}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{0//} \\ H_0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

展开(3)式有

$$H = M_{21}^{-1} E_{0//} + M_{22}^{-1} H_0. \quad (4)$$

由图 2 可知:

$$\begin{aligned} E_{0//} &= E_{0i} \cos \theta_0 - E_{0r} \cos \theta_0 = E_{0i} \cos \theta_0 - \\ &r E_{0i} \cos \theta_0 = (1 - r) E_{0i} \cos \theta_0, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} H_0 &= H_{0i} + H_{0r} = (1 + r) H_{0i} = \\ &(1 + r) \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_0 E_{0i}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中 r 是该一维光子晶体对 TM 波的反射系数。

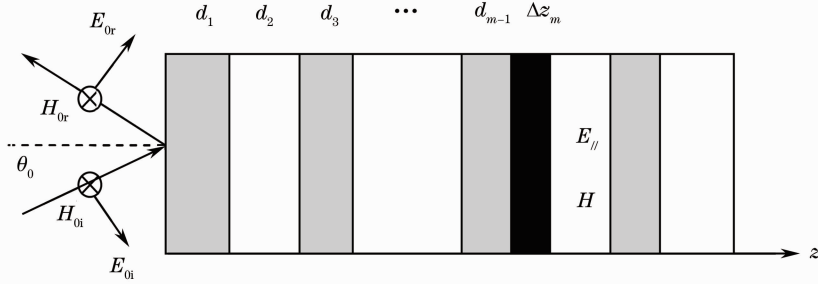


图 2 TM 波在一维光子晶体中的光场

Fig. 2 Light intensity of TM wave in 1D photonic crystal

将(5)式和(6)式代入(4)式, 并利用 $H = \sqrt{\epsilon_0/\mu_0} nE$, 得

$$\sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} nE = M_{21}^{-1} (1 - r) E_{0i} \cos \theta_0 + M_{22}^{-1} (1 + r) \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_0 E_{0i}. \quad (7)$$

由(7)式可得, TM 波在一维光子晶体中任意一层 Δz_m 后的光场分布公式为

$$\left| E/E_{0i} \right| = \left| \frac{1}{n} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \left[M_{21}^{-1} (1 - r) \cos \theta_0 + M_{22}^{-1} (1 + r) n_0 \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \right] \right|. \quad (8)$$

对于 TE 波的光场公式文献[17]中的推导是正确的, 只不过要将特征矩阵中的相位差换为 $\delta_a = \frac{\omega}{c} na \cos \theta$ 就可以了。这里直接给出:

$$\left| E/E_{0i} \right| = \left| \left[M_{11}^{-1} (1 + r) + M_{12}^{-1} (1 - r) n_0 \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cos \theta_0 \right] \right|, \quad (9)$$

式中 r 是该一维光子晶体对 TE 波的反射系数。 \mathbf{M} 为 TE 波通过前 m 层介质中的特征矩阵。利用(8)式和(9)式就可以研究一维光子晶体中两种偏振光的光场分布规律。

3 光场分布

取具有对称结构 $(AB)^N C(BA)^N$ 的一维掺杂光子晶体作为研究对象。A层为氟化镁,其折射率 $n_1 = 1.38$ 、厚度为 d_1 。B层为硫化锌,其折射率 $n_2 = 2.38$ 、厚度为 d_2 。掺杂层C为氧化铝,其折射率 $n_3 = 2.97$ 、厚度为 d_3 。A、B两层介质的光学厚度相等, $n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda_0/4$,C层介质的光学厚度取 $n_3 d_3 = \lambda_0/2$ 。中心波长 $\lambda_0 = 600 \text{ nm}$,对应的中心圆频率 $\omega_0 = 2\pi c/\lambda_0$, c 为真空中光速。周期数 $N = 5$ 。该掺杂光子晶体置于空气中,其入射空间和透射空间的折射率都为 n_0 。

由特征矩阵法计算出TE波和TM波以入射角 $\theta_0 = \pi/6$ 入射该一维掺杂光子晶体时,在透射空间其透射率随圆频率 ω 的响应曲线,如图3和图4所示。由图3可知,由于掺杂,在禁带的中间圆频率 $\omega = 1.033\omega_0$ 处出现了TE波的缺陷模透射峰($T = 1$)。由图4可知,由于掺杂,在禁带的中间圆频率 $\omega = 1.035\omega_0$ 处出现了TM波的缺陷模透射峰($T = 1$)。但是在缺陷模和禁带中两种偏振光在该一维掺杂光子晶体内部的光场分布情况用求透射率的方法是不得知的。下面利用(8)式和(9)式对这一问题给予研究。

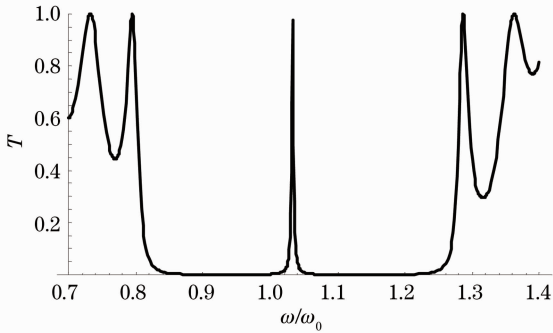


图3 TE波透射率随圆频率的响应曲线

Fig. 3 Transmittance T versus frequency for TE wave

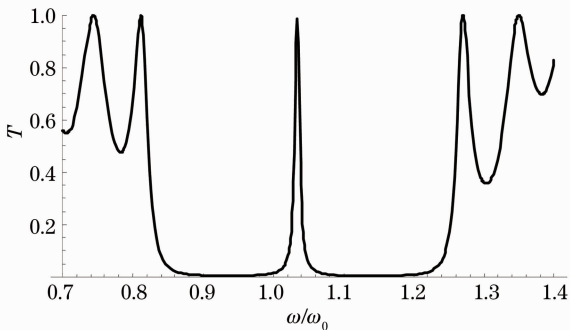


图4 TM波透射率随圆频率的响应曲线

Fig. 4 Transmittance T versus frequency for TM wave

3.1 TE波的光场分布

首先研究TE波在缺陷模中(即圆频率 $\omega = 1.033\omega_0$)其光场在该一维掺杂光子晶体内部的分布特征。固定入射角 $\theta_0 = \pi/6$ 、 $\omega = 1.033\omega_0$,利用(9)式计算出TE波的光场随光程厚度的响应曲线,如图5所示。图5中横坐标表示光在光子晶体内部传播的光程厚度,以 $\lambda_0/2$ 为单位。由于 $n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda_0/4$, $n_3 d_3 = \lambda_0/2$,一个周期的光程厚度在横坐标上对应1个单位,杂质层的光程厚度在横坐标上也对应1个单位。整个掺杂光子晶体的光程厚度在横坐标上的范围为 $0 \sim 11$, $11 \sim 14$ 为透射空间。由图5可知,在缺陷模中TE波光场的分布有如下特征:

1) 在掺杂光子晶体内部其光场是以杂质层为中心对称分布的。在杂质层内(5~6)出现了一个峰值较大的波峰,其峰值为5.8。在与杂质层左右相邻(4~5和6~7)的一个周期内各出现了一个峰值最大的波峰,其峰值为7.0。其他每个周期内也出现了一个波峰,随着离杂质层的距离增大各个周期内出现的波峰的峰值逐渐减小。

2) 在杂质层附近的光场分布呈现共振的特征,其光场的极大值均达到7.0,远大于入射面处和透射面处的光场。这和文献[20]和文献[21]中利用共振模型和干涉模型来解释一维掺杂光子晶体的缺陷模的产生机理吻合。

3) 透射空间的光场分布 $|E/E_{0i}|$ 为1,即透射系数 $t = |E/E_{0i}| = 1$ 。根据透射率 $T = nt^2 \cos \theta / (n_0 \cos \theta_0)$,又因入射空间和透射空间的折射率都为 n_0 ,有 $\theta = \theta_0$,由此得出缺陷模处TE波的透射率 $T = 1$ 。因此TE波能够顺利地穿过该一维掺杂光子晶体。

4) TE波在一维掺杂光子晶体内部的每个分界面处(即光程厚度为0.5、1、1.5、2、2.5、3、3.5、4、4.5、5、...处)光场都是连续分布的。这是因为电场在界面两侧切向分量连续,而TE波只有切向分量,所以在每个分界面处电场都是连续分布的。

通过图5从一维掺杂光子晶体内部可知TE波缺陷模的光场分布规律。

再研究TE波在禁带($T = 0$)中其光场的分布特征,由图3看出 ω 为 $0.91\omega_0 \sim 0.97\omega_0$ 和 $1.06\omega_0 \sim 1.23\omega_0$ 时都是TE波的禁带范围。固定入射角 $\theta_0 = \pi/6$,取 $\omega = 0.95\omega_0$,利用(9)式计算出TE波的光场随光程厚度的响应曲线,如图6所示。由图6可知在禁带中TE波光场的分布有如下特征:

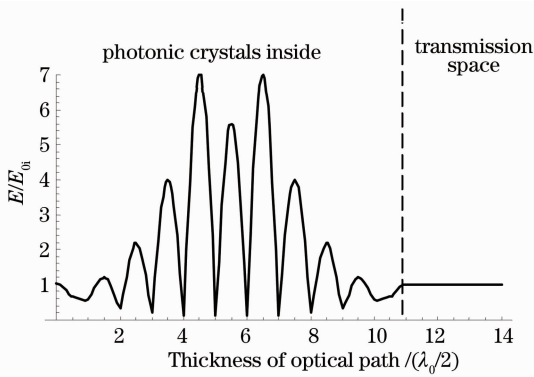


图 5 TE 波光强随光程厚度的响应曲线 ($\omega=1.033\omega_0$)

Fig. 5 Response curve of light intensity versus thickness of optical path for TE wave ($\omega=1.033\omega_0$)

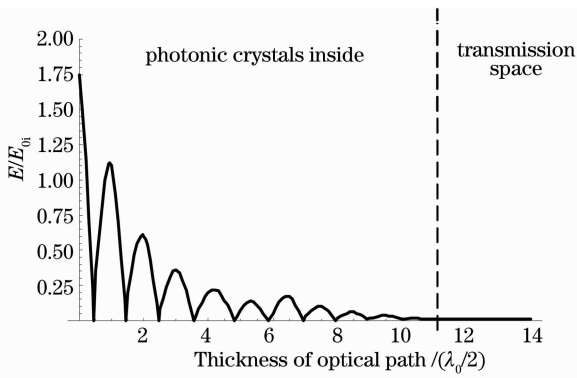


图 6 TE 波光强随光程厚度的响应曲线 ($\omega=0.95\omega_0$)

Fig. 6 Response curve of light intensity versus thickness of optical path for TE wave ($\omega=0.95\omega_0$)

1) 刚进入一维掺杂光子晶体处 TE 波的光场最大,其值为 1.75。随着光程深度的增加 TE 波的光场周期性地出现了多个峰,每个周期的光程为 $\lambda_0/2$ 。但各个峰的峰值随着光程深度的增加而迅速衰减。当 TE 波进入透射空间后其光场已经降低为 0,其透射率也为 0。因此 TE 波在禁带处不能穿过一维掺杂光子晶体。

2) 杂质层附近的光场的波峰远小于入射面处光场的峰值,没有呈现共振的特征。

3) 禁带中 TE 波在一维掺杂光子晶体内的每个分界面处电场也是连续分布的。

3.2 TM 波的光场分布

先研究 TM 波在缺陷模中(即圆频率 $\omega = 1.035\omega_0$)其光场的分布特征。固定入射角 $\theta_0 = \pi/6$ 、 $\omega=1.035\omega_0$,利用(8)式计算出 TM 波的光场随光程厚度的响应曲线,如图 7 所示。由图 7 可知,在缺陷模中 TM 波光场的分布有如下特征:

1) 在掺杂光子晶体内部其光场是以杂质层为

中心对称分布的。但是 TM 波光场分布形状与 TE 波差别很大, TM 波光场呈 V 形分布,每个周期内都出现了一个 V 形。在杂质层中(5~6)出现了一个极值较大的 V 形分布,其极大值为 4.1。在与杂质层左右相邻(4~5 和 6~7)的一个周期内各出现了一个极值最大的 V 形分布,其极大值为 5.2。随着离杂质层的距离增大各个周期内出现的 V 形分布的极大值逐渐减小。

2) 在杂质附近的光场的分布也呈现共振的特征,其光场的极大值均达到 5.2,远大于入射面处和透射面处的光场,这和 TE 波的情况相似。

3) 透射空间的光场分布 $|E/E_{oi}|$ 也为 1,即透射系数 $t = |E/E_{oi}| = 1$,这和 TE 波的情况相似,由此得出在缺陷模中 TM 波的透射率 $T=1$ 。因此 TM 波能够顺利地穿过一维掺杂光子晶体。

4) TM 波在一维掺杂光子晶体内部的每个分界面光场是不连续分布的。这是因为当 TM 波斜入射一维光子晶体时, TM 波的电场不仅有切向分量而且还有法向分量。电场切向分量满足了在界面两侧连续,则会使电场在界面两侧不连续。

通过图 7 从一维掺杂光子晶体内部可知 TM 波缺陷模的光场的分布规律。

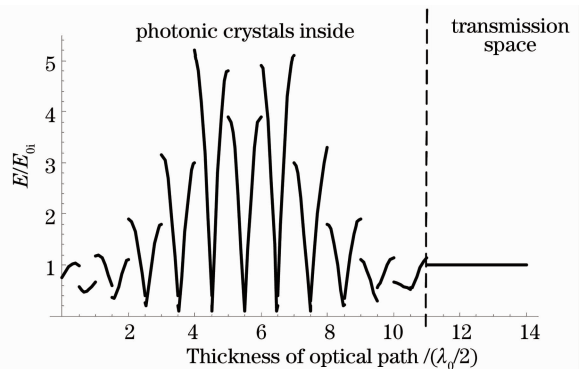


图 7 TM 波光强随光程厚度的响应曲线 ($\omega=1.035\omega_0$)

Fig. 7 Response curve of light intensity versus thickness of optical path for TM wave ($\omega=1.035\omega_0$)

再研究 TM 波在禁带中其光场的分布特征,由图 4 看出 ω 为 $0.87\omega_0 \sim 0.98\omega_0$ 和 $1.1\omega_0 \sim 1.2\omega_0$ 时都是 TM 波的禁带范围。固定入射角 $\theta_0 = \pi/6$,取 $\omega=0.95\omega_0$,利用(8)式计算出 TM 波的光场随光程厚度的响应曲线,如图 8 所示。由图 8 可知,在禁带处 TM 波光场的分布有如下特征:

1) TM 波在一维掺杂光子晶体内部仍然呈 V 形分布,第一周期内出现了光场的最大值,其值为 1.75。随着光程深度的增加 TM 波的光场周期性

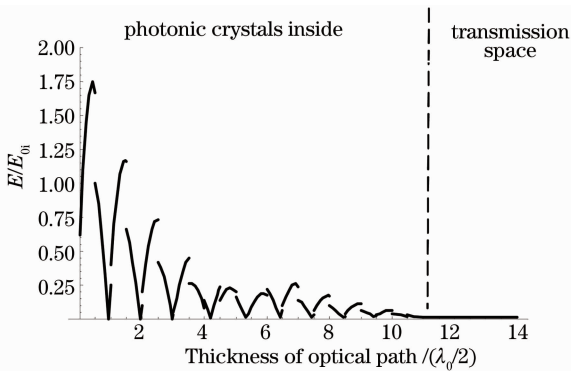
图8 TM波光强随光程厚度的响应曲线($\omega=0.95\omega_0$)

Fig. 8 Response curve of light intensity versus thickness of optical path for TM wave ($\omega=0.95\omega_0$)

地出现了多个V形分布,每个周期的光程为 $\lambda_0/2$ 。但各个V形分布的极大值随着光程深度的增加而迅速衰减。当TM波进入透射空间后其光场已经降低为0,其透射率也为0。因此TM波在禁带处也不能穿过一维掺杂光子晶体。

2) 在杂质附近的V形分布的极大值远小于第一周期内出现的光场最大值,没有呈现共振的特征。

3) 禁带中TM波在一维掺杂光子晶体内的每个分界面处其电场的分布也是不连续的。

4 结 论

利用平面波在介质层中传播的等相位面的关系,推导光通过折射率为 n 、厚度为 a 的介质层其相位差 $\delta_a = \omega n a \cos \theta / c$,纠正了文献[17]中的瑕疵。并利用TM波在界面切向分量连续的条件,推导出TM波在一维光子晶体中光场的分布公式。利用这些公式研究了TM波和TE波在一维掺杂光子晶体中光场的分布规律。结果发现,在缺陷模中TM波和TE波在杂质层附近光场的分布呈现共振的特征,因此TM波和TE波能够顺利穿过一维掺杂光子晶体。在禁带范围内TM波和TE波的光场随着光程深度的增加而迅速衰减,因此TM波和TE波不能穿过一维掺杂光子晶体。光场的分布规律的获得使对一维掺杂光子晶体中TM波和TE波的缺陷模的形成有了更深刻的认识。

参 考 文 献

1 E Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059-2062.
2 Sajeev John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(23): 2486-2489.

3 Wang Rui, Zhang Cunxi, Nie Yihang. Band structure and propagation properties of one-dimension anisotropy photonic crystals [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(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.
4 Li Rong, Ren Kun, Ren Xiaobin, et al.. Angular and wavelength selectivity of band gaps of holographic photonic crystals for different polarizations [J]. Acta Physics Sinica, 2004, 53(8): 2520-2523.
李蓉,任坤,任晓斌,等. 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.
5 Liu Qineng. A new simple and convenient method for study of properties of 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新方法[J]. 光子学报, 2007, 36(6): 1031-1034.
6 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.
7 Liu Qineng. 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.
8 Liu Qineng. The defect mode and the quantum effect of light wave in cylindrical anisotropic photonic crystal [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(1): 014217.
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): 014217.
9 Liu Qineng. Defect modes of Ag-doped photonic crystal [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2009, 30(5): 702-706.
刘启能. 金属掺杂一维光子晶体的缺陷模特性[J]. 半导体光电, 2009, 30(5): 702-706.
10 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.
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.
11 Shang Tingyi, Zheng Yi, Zhang Huiyun, et al.. Omnidirectional gap and defect mode of one-dimensional photonic crystals with negative-index materials [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(4): 663-666.
尚廷义,郑义,张会云,等. 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.
12 Yu Jianli, Shen Hongjun, Ye Song, et al.. Design of novel highly efficient photonic crystal multi-channel drop filter [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1106003.
余建立,沈宏君,叶松,等. 一种新型高效光子晶体多信道下载滤波器设计[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1106003.
13 Gong Lixia, Liu Guiqiang, Huang Kuan, et al.. Influence of the disorders induced by the doped dielectric spheres on the optical properties of photonic crystals [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0916005.
龚丽霞,刘桂强,黄宽,等. 介质球掺杂导致的无序效应对光子晶体光学性能的影响[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0916005.
14 Dai Hongxia, Liu Qineng. Total reflection tunneling effect of photonic crystal containing negative refractive index in finite period [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2012, 33(3): 370-373.
代红霞,刘启能. 有限周期含负折射率光子晶体的全反射隧穿效应[J]. 半导体光电, 2012, 33(3): 370-373.
15 Liu Qineng. Analytical study on total reflection tunnel effect of

- 1-D photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0219002.
- 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): 0219002.
- 16 Liu Qineng. Comb filtering properties of total reflection tunnelling in cylindrical photonic crystals [J]. *Chinese J Computational Physics*, 2012, 29(1): 133–137.
- 刘启能. 圆柱光子晶体全反射隧穿梳状滤波特性[J]. *计算物理*, 2012, 29(1): 133–137.
- 17 Liu Xiaojing, Zhang Bojun, Wang Jing, *et al.*. The analysis on the properties of light field distribution in one-dimensional photon crystals [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(23): 237801.
- 刘晓静, 张伯军, 王 婧, 等. 一维光子晶体中光场分布特性分析[J]. *物理学报*, 2012, 61(23): 237801.
- 18 Ji Jiarong. *Higher Optical Tutorial* [M]. Beijing: Science Press, 2007. 133–134.
- 季家镛. *高等光学教程* [M]. 北京: 科学出版社, 2007. 133–134.
- 19 M Born, E Wolf. *Principles of Optics* [M]. Yang Jiasun Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. 52–55.
- 马科斯·波恩, 埃米尔·沃耳夫. *光学原理* [M]. 杨葭孙译. 北京: 电子工业出版社, 2005. 52–55.
- 20 Liu Qineng. Resonance theory of the defect mode of 1-D doping photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(4): 446–450.
- 刘启能. 一维掺杂光子晶体的缺陷模的共振理论[J]. *光子学报*, 2012, 41(4): 446–450.
- 21 Liu Qineng. Interference theory of the defect mode in 1D doped photonic crystal [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(8): 0806001.
- 刘启能. 一维掺杂光子晶体缺陷模的干涉理论[J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0806001.

栏目编辑: 王晓球