

材料吸收对二维光子晶体带隙和光谱的影响

苗雷 时家明 赵大鹏

脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037

摘要 研究了材料和基底的吸收对二维光子晶体的影响, 采用传输矩阵法沿某一晶格方向对光子晶体进行分层, 然后基于各层传输矩阵求解能带结构。研究发现, 吸收使原来不存在带隙的频率上出现新带隙, 而原有带隙则得到拓展, 其中TE波受吸收的影响比TM波大。

关键词 材料; 二维光子晶体; 传输矩阵法; 吸收; 带隙; 光谱

中图分类号 O431.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.121601

Influence of Material Absorption Spectrum and Band Gap of Two Dimensional Photonic Crystal

Miao Lei Shi Jiaming Zhao Dapeng

State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei, Anhui 230037, China

Abstract The influence of the two dimensional photonic crystals on the absorption of materials and the substrate is studied. By using the transfer matrix method along with a certain direction of lattice photonic crystal, the energy band structure based on the transfer matrix method is solved. Researches show that absorption can bring new band gap to a frequency which doesn't have band gaps, while extending the range of the original band gap, and TE wave is more impacted than TM wave by the absorption.

Key words materials; two dimensional photonic crystal; transfer matrix method; absorption; band gaps; spectrum

OCIS codes 160.5298; 050.5298; 070.4970

1 引言

光子晶体^[1-2]是由不同折射率介电材料周期性排列组合而成的“人工晶体”材料, 二维光子晶体因结构简单、易于制备, 具有广泛的应用范围, 如光子微腔^[3]、光子晶体波导^[4]、滤波器^[5]等。许多应用都是基于较宽的光子晶体禁带的存在, 因此设计出尽可能大的光子晶体具有十分重要的意义。

本文采用传输矩阵法研究了二维正方晶格介质柱结构的光子晶体的带隙^[6]。系统地考虑了材料和基底吸收对带隙以及光谱的影响, 得出了获得新带隙以及拓展带隙的方法, 为二维光子晶体的实验和应用提供了一定的理论基础。

2 传输矩阵法理论推导

传输矩阵法的基本思想是: 将光子晶体沿某一个方向分成很多薄片, 薄片的入射场和出射场由传输矩阵, 计算传输矩阵的方法有很多种, 因此实现这种方法有多种方式, 如基于有限差分的、基于平面波展开的^[7]、基于特征模展开的^[8]、以及基于多次散射理论的LKKR方法^[9-11], 其中有限差分法可以处理各种形状的散射单元, 具有很大的灵活性, 处理二维问题时计算速度也较快, 所以本文选择有限差分法求解单个薄层的传输矩阵。

根据麦克斯韦方程组, 通过倒格空间的傅里叶变换, 得到实空间的差分方程, 其矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} E_x(\mathbf{r} + c\hat{z}) \\ E_y(\mathbf{r} + c\hat{z}) \\ H_x(\mathbf{r} + c\hat{z}) \\ H_y(\mathbf{r} + c\hat{z}) \end{bmatrix} = T_n \cdot \begin{bmatrix} E_x(\mathbf{r}) \\ E_y(\mathbf{r}) \\ H_x(\mathbf{r}) \\ H_y(\mathbf{r}) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

收稿日期: 2015-06-13; 收到修改稿日期: 2015-07-14; 网络出版日期: 2015-11-26

作者简介: 苗雷(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事光子晶体的制备及应用方面的研究。E-mail: miao927090eei@163.com

导师简介: 时家明(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事红外功能材料、等离子体及新型复合隐身材料等方面的研究。E-mail: shijiaming66@163.com

式中 T_n 表示第 n 个薄层的传输矩阵。如果一个周期的光子晶体被分为 L_z 个薄层, 则相应的电磁场为

$$\begin{bmatrix} E_x(r + L_z c \hat{z}) \\ E_y(r + L_z c \hat{z}) \\ H_x(r + L_z c \hat{z}) \\ H_y(r + L_z c \hat{z}) \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} E_x(r) \\ E_y(r) \\ H_x(r) \\ H_y(r) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中传输矩阵 $T = \prod_{n=1}^{L_z} T_n$ 。

3 计算结果分析

3.1 光子晶体组成材料含吸收的带隙和光谱

3.1.1 光子晶体材料含吸收时的带隙

假设二维光子晶体的周期平面在 xoz 平面如图 1 所示, 传输矩阵沿 z 轴方向分层, 则各层光子晶体沿 x 轴方向具有一维周期性, 其表面布里渊区位于 $-\pi/a < k_x \leq \pi/a$ 和 $-\infty < k_y < \infty$ 确定的区域^[12], 其中 a 为正方晶格的晶格常数。当波矢位于二维光子晶体的周期平面内时 $k_y = 0$, 下面考虑这种情况。

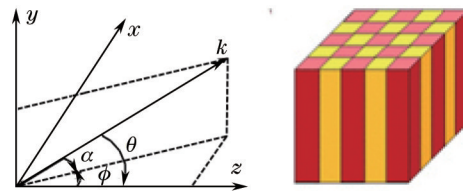


图 1 研究光子晶体所采用的坐标系

Fig.1 Coordinate system used in the research of photonic crystal

使用表面布里渊区可以得到光子晶体的投影能带图。具体方法是: 在表面布里渊区选取不同波矢 k_x 计算出光子晶体相对于 k_x 的能带, 然后将基于 k_x 的能带投影到频率轴上得到每一个 k_x 对应的投影能带, 最后以 k_x 为横坐标以频率为纵坐标画出投影能带图。

前文所述正方晶格的投影能带图如图 2 所示。图中横轴为归一化波矢, 而且只画出了简约布里渊区 $0 < |k_x| \leq \pi/a$ 的情况, 当归一化波矢取负值时表示 TM 波的投影能带图, 否则为 TE 波的投影能带图。图中蓝色区域标记的为通带, 白色为禁带, 浅蓝色为 TM 或 TE 波各自的全向带隙, 绿色区为完全带隙。

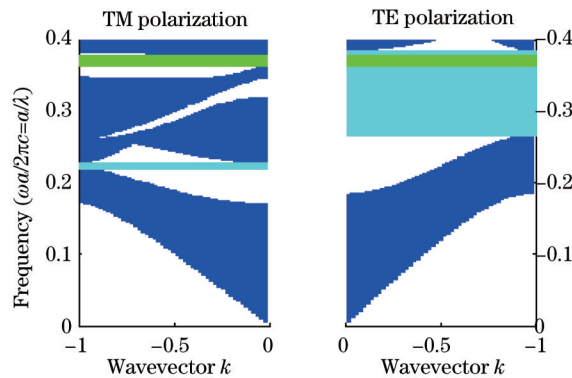


图 2 正方晶格光子晶体的投影能带图

Fig.2 Projection energy band diagram of affirmative lattice photonic crystal

当光子晶体材料的折射率虚部不为 0 时会产生吸收。为分析不同吸收对光子晶体带隙产生的影响, 在方柱的介电常数中引入虚部令 $\varepsilon = \varepsilon_r + i\varepsilon_i$ 。当 ε_i 取不同值时, 得到的投影能带图如图 3 所示。

图 3(a) 中 $\varepsilon_i = 0$ 不包含吸收, 给出这一投影能带图是为了便于比较。图 3(b) 中 $\varepsilon_i = 0.001$, 与无吸收的情况相比, 此时 TM 波在 0.909~0.911 处多了一个带隙, TE 波的原第一带隙和第三带隙略有拓宽, 在原第一和第二带隙之间 0.587~0.589 处多了一个带隙, 完全带隙仍旧位于 0.362~0.377 之间。图 3(c) 和图 3(d) 中带隙的变化规律和图 3(b) 的类似, 吸收越多原带隙展宽越大, 增加的带隙也越多, 而且 TE 波受吸收的影响要比 TM 波大。

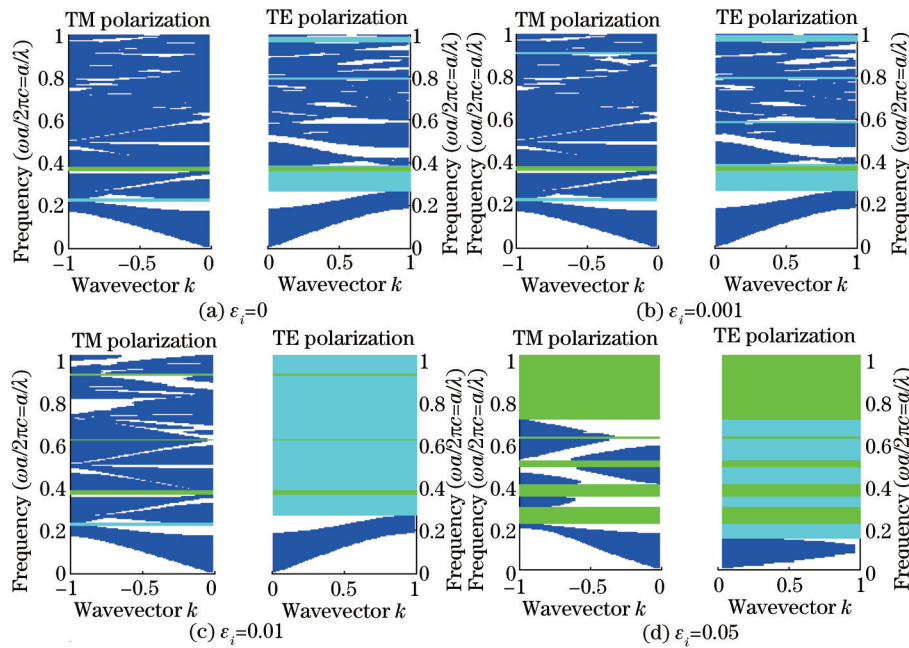


图3 不同介电常数的投影能带图

Fig.3 Projection energy band diagram of different dielectric constants

从以上各图可以看到,吸收的作用是打开白色区域标记的禁带,吸收越多禁带打开的越大,由此得到的带隙也越宽,原本不存在带隙的地方也因为禁带的拓展而出现新的带隙。光子晶体组成材料引入吸收后不但拓宽了原有带隙,而且还产生了新的带隙,这对光子晶体的应用存在影响。

3.1.2 光子晶体材料含吸收时的光谱

由带隙可以预测光子晶体低透射带的位置,但是无法给出透射率在带隙之外的大小值,同样也无法给出吸收率的值。在光子晶体应用中,经常需要得到其光谱,下面分析光子晶体材料含不同吸收时的光谱特性。

假设光子晶体具有图4所示的结构,厚度为16个周期,方柱宽0.82。当方柱的介电常数虚部取不同值时得到的透射谱和吸收谱如图5所示,其中虚部大小在图的左侧给出。

从图5中可以看到,虚部取值越大,光子晶体的吸收越多,吸收率越大,与带隙对应的频段透射率为0,与原带隙(光子晶体不含虚部时的带隙)对应的频段上吸收率比其他频率上的低,吸收率呈现出光谱选择性。虚部增加时会增大材料的吸收,同样厚度增加也会增大材料的吸收。随着厚度越来越大,吸收率也越来越大,而且与原带隙对应频段上的吸收率总是比其他频率上的低,这一变化规律与增加虚部时的变化规律类似。

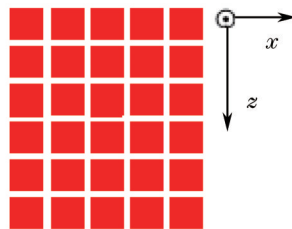


图4 二维光子晶体的结构

Fig.4 Structure of two dimensional photonic crystal

3.2 基底含吸收时的光谱

当光子晶体材料不含吸收而基底含吸收时,也可以实现对吸收率的调制。图7为计算出的结果,计算中使用的光子晶体由8层方柱和128个周期的基底组成,方柱为空气柱,背景材料折射率为16,基底的介电常数实部为16,虚部在图7的左侧给出。

从图中可以发现,随着基底折射率虚部增加,光子晶体材料的透射率越来越低,吸收率则不断增加。与图5所给的情况相比,吸收率在带隙外可以达到很大,而在带隙内却一直保持很低——接近于0。这完全是由于基底之上光子晶体的反射率决定的。在光子晶体带隙内反射率几乎为1,入射波很难到达基底被吸收,

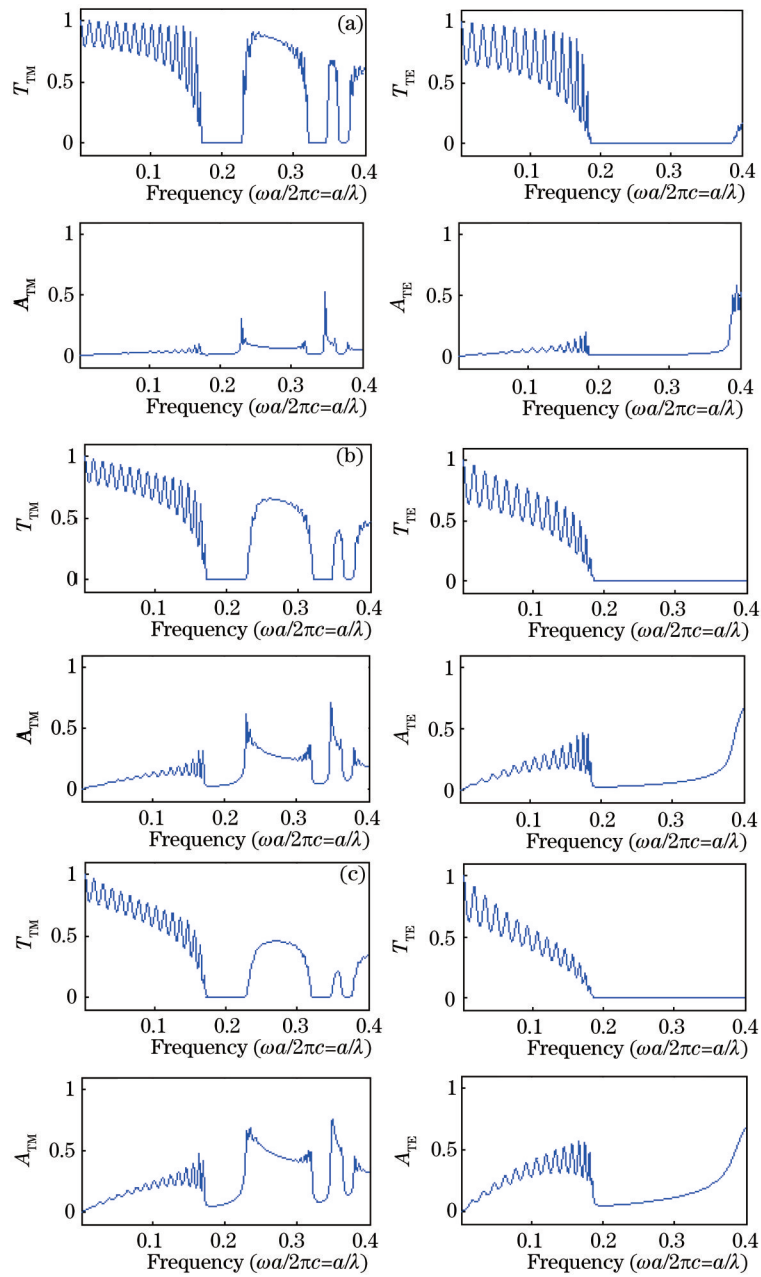


图5 方柱介电常数虚部取不同值时光子晶体的透射率和吸收率

Fig.5 Transmittance and absorption rate of the photonic crystal with different values of the imaginary part of the dielectric constant of square column

所以带隙内的吸收很小;而带隙外光子晶体的反射率比较小,使基底可以吸收更多的入射波,从而表现出较高的吸收率。

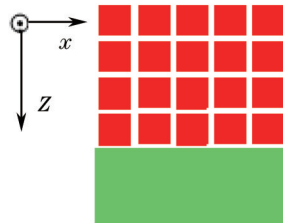


图6 含基底的二维光子晶体

Fig.6 Two dimensional photonic crystal containing substrate

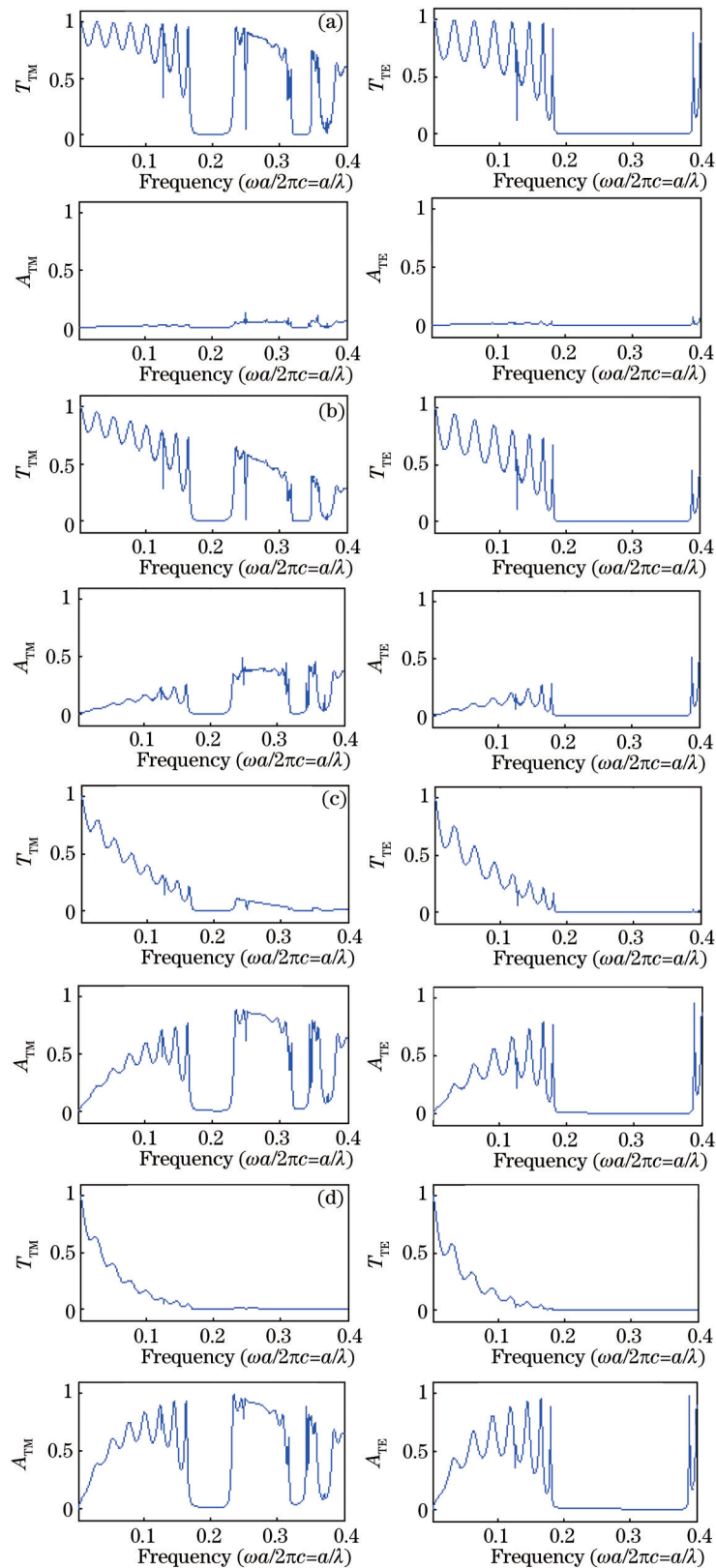


图7 基底的吸收对光子晶体透射率和吸收率的影响

Fig.7 Effect of the absorption of substrate on the transmittance and absorption rate of photonic crystal

类似的,如果改变基底的厚度也可以调节光子晶体的吸收率。相对于调节基底折射率来说,厚度的调节在实际中更容易实现,如图8所示。图中光子晶体由8周期的空气方柱组成,基底的介电常数为 $16+0.01i$,其厚度在图8的左侧给出。可以看到,当基底足够厚时,透射进来的电磁波几乎被全部吸收掉,吸收率将不再明显改变。当基底折射率虚部大小不同时,只要令基底足够厚都可以达到同样的吸收率。

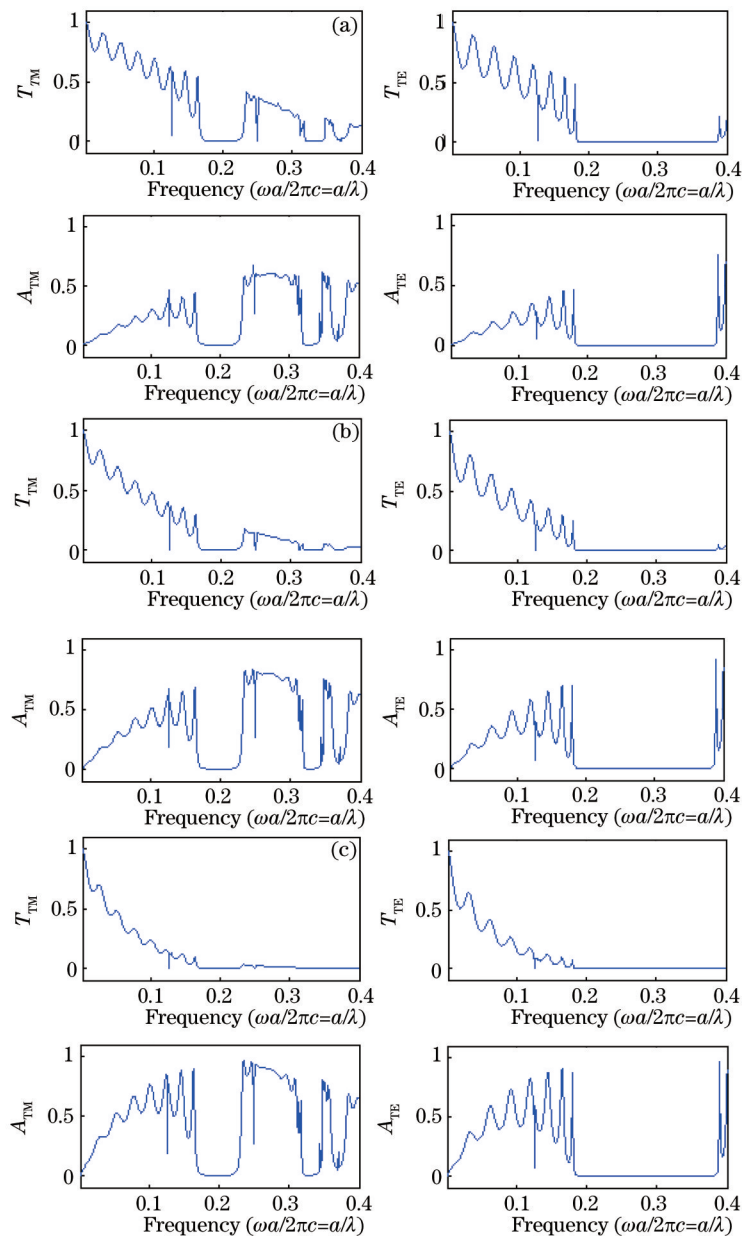


图8 基底的厚度对光子晶体透射率和吸收率的影响

Fig.8 Influence of the thickness of the substrate on the transmittance and the absorption rate of the photonic crystal

以上讨论的情况均为法向入射时的透射率和吸收率,图9给出了电磁波沿周期平面内的任意方向入射时含吸收光子晶体的透射率和吸收率。图中使用灰度值表示吸收率的大小,黑色吸收率为1,白色为0。其中图9(a)为基底含有吸收的情况,图9(b)为光子晶体组成材料含有吸收的情况。

比较图9(a)和图9(b)会发现两者异常相似,只是基底含吸收时吸收率的取值范围更大。当入射角偏离法向时,低吸收带会向高频方向发生偏移,只有在完全带隙内的吸收率才始终都很低。

4 结 论

使用传输矩阵法深入研究了材料吸收对二维光子晶体的能带以及光谱的影响,研究发现光子晶体中的吸收会展宽禁带区,使原来不存在带隙的频率上出现新带隙,而原有带隙则得到拓展,其中TE波受吸收的影响比TM波大。当光子晶体的组成材料含有虚部时,虚部越大吸收率也越大,当光子晶体所处的基底含有虚部时,吸收率可以在较大的范围得到调制。吸收率在带隙内几乎等于0的同时,在带隙外可以达到很高。当电磁波偏离法向入射时,光子晶体的吸收谱会向高频方向偏移,只有在完全带隙内可以保持低发射率。

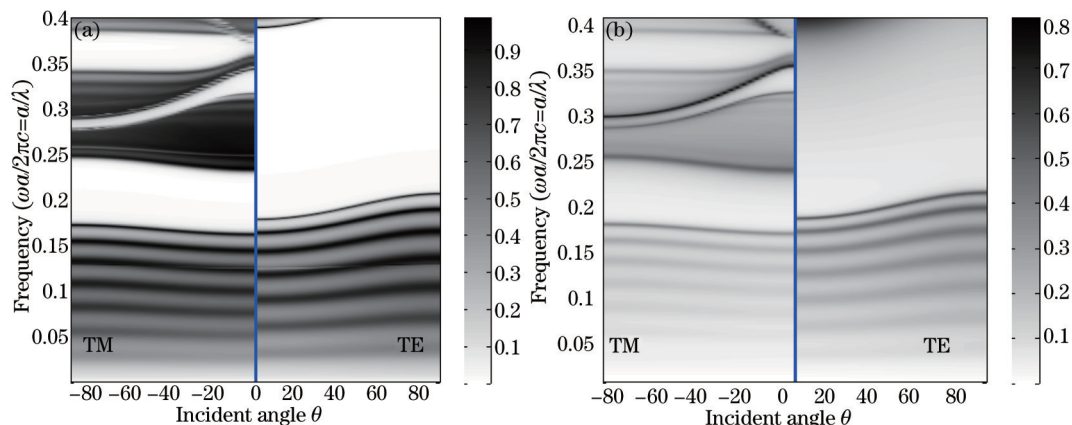


图9 不同角度入射时光子晶体的吸收率。(a) 基底含吸收; (b) 光子晶体含吸收

Fig.9 Absorption rate of the incident time sub crystal at different angles. (a) Substrate absorption; (b) Photonic crystal absorption

参考文献

- 1 Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics[J]. Phys Rev Lett, 58(20): 2059.
- 2 John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Phys Rev Lett, 58(23): 2486.
- 3 Tong Kai, Zhang Zhenguo, Lu Jianru, *et al.*. Hybrid plasmonic photonic crystal nano micro-cavity[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0905009.
- 童 凯, 张振国, 卢建如, 等. 混合光子晶体等离子激元纳米微腔[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0905009.
- 4 Li Lei, Liu Guiqiang, Chen Yuanhao, *et al.*. An optical switch based on coupled heterostructure photonic-crystal waveguides [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0123002.
- 黎 磊, 刘桂强, 陈元浩, 等. 光子晶体异质结构耦合波导光开关[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0123002.
- 5 Chen Zhiyong, Hao Xiaolong, Zheng Yanmin, *et al.*. Large-angle polarization-independent broadband filters based on silicon photonic crystal slabs[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0305002.
- 陈志勇, 郝小龙, 郑彦敏, 等. 大角度偏振无关硅光子晶体带宽滤波器[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0305002.
- 6 Cai X B, Yang J, Hu G K. Optimization on microlattice materials for sound absorption by an integrated transfer matrix method [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2015, 137(4): 334-339.
- 7 Li Z Y, Ho K M. Application of structural symmetries in the plane-wave-based transfer-matrix method for three-dimensional photonic crystal waveguides[J]. Physical Review B, 2003, 68(24): 245117.
- 8 Elson J M, Tran P. Dispersion in photonic media and diffraction from gratings: A different modal expansion for the R-matrix propagation technique[J]. JOSA A, 1995, 12(8): 1765-1771.
- 9 Abrishamian F, Morishita K. Transfer-matrix method based on a discrete coupling model for analyzing uniform and nonuniform codirectional fiber grating couplers[J]. Applied optics, 2012, 51(13): 2367-2372.
- 10 Stefanou N, Yannopoulos V, Modinos A. Heterostructures of photonic crystals: Frequency bands and transmission coefficients [J]. Computer physics communications, 1998, 113(1): 49-77.
- 11 Stefanou N, Yannopoulos V, Modinos A. MULTEM 2: A new version of the program for transmission and band-structure calculations of photonic crystals[J]. Computer physics communications, 2000, 132(1): 189-196.
- 12 Wang R, Wang X H, Gu B Y, *et al.*. Effects of shapes and orientations of scatters and lattice symmetries on the photonic band gap in two-dimensional photonic crystals[J]. Journal of Applied Physics, 2001, 90(9): 4307-4313.

栏目编辑: 张浩佳