

# 一维函数型光子晶体的光学传输特性

巴 诺<sup>1</sup> 吴向尧<sup>1</sup> 王 婧<sup>1</sup> 张斯淇<sup>1</sup> 刘晓静<sup>1</sup> 吴义恒<sup>2</sup> 郭义庆<sup>3</sup>

<sup>1</sup>吉林师范大学物理学院, 吉林 四平 136000  
<sup>2</sup>吉林大学物理学院, 吉林 长春 130000  
<sup>3</sup>中国科学院高能物理研究所, 北京 100049

**摘要** 研究了一维正弦函数型光子晶体的透射特性和缺陷层对透射特性的影响,同时分析了光在正弦函数型光子晶体中的光学传输特性,即电场在正弦函数型光子晶体中的分布。对正弦函数型光子晶体,在缺陷层处的场强既可局域增强,也可局域减弱。这与缺陷层介质的折射率大小有关。当缺陷层对场强的作用是增强或减弱时,缺陷层位置越靠前,它对其后场强的增强或减弱作用越大。这些结论对光子晶体的设计与应用具有一定指导意义。

**关键词** 材料;函数光子晶体;缺陷模;光学传输特性

中图分类号 O734 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0606001

## Light Transmission Properties of One-Dimensional Function Photonic Crystals

Ba Nuo<sup>1</sup> Wu Xiangyao<sup>1</sup> Wang Jing<sup>1</sup> Zhang Siqi<sup>1</sup> Liu Xiaojing<sup>1</sup>  
Wu Yiheng<sup>2</sup> Guo Yiqing<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Physics, Jilin Normal University, Siping, Jilin 136000, China  
<sup>2</sup>College of Physics, Jilin University, Changchun, Jilin 130000, China  
<sup>3</sup>Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Transmissivity of one-dimensional sine function photonic crystals is studied, and the characteristic of light transmission is analyzed. There are some important results: for one-dimensional sine function photonic crystals, the electric field can be increased or decreased at the defect layer, which depends on the refractive index of the defect layer; when the position of the defect layer is closer to the front side, the impact is larger on the distribution of electric field behind the defect layer. These results are important for the design and application of photonic crystals.

**Key words** materials; function photonic crystal; defect mode; characteristic of light transmission

**OCIS codes** 160.5298; 050.5298; 120.7000

## 1 引 言

光子晶体是介电常数(或折射率)周期性变化排布的材料。光子晶体的概念于 1987 年由 Yablonovitch 等<sup>[1,2]</sup>提出,由于光子晶体在能带和带隙方面的特殊性质,使它很快成为光学前沿领域中一个十分活跃的研究课题。光子晶体最根本的特征是具有类似于电子半导体能带结构的禁带——光子禁带,频率落在禁带中的光被禁止传播<sup>[3,4]</sup>。光子晶体的这一特性使它在许多方面有着重要的应用,

如光子晶体光纤、光子晶体波导、光子晶体滤波器<sup>[5,6]</sup>、光子晶体偏振器等<sup>[7~11]</sup>。在光子晶体中引入缺陷,可使光子局域化。利用掺杂光子晶体,使得缺陷层影响光子晶体能带结构,从而影响光子晶体光传输特性。对一维掺杂光子晶体缺陷模的研究已取得丰富成果<sup>[12~20]</sup>,在这些研究中使用的方法主要有两种:特征矩阵法<sup>[17~19]</sup>和法布里-珀罗(F-P)<sup>[20]</sup>法。这两种方法都是通过数值计算绘出光子晶体缺陷模的图像,通过图像分析缺陷模的特征,并得到缺

收稿日期: 2012-01-19; 收到修改稿日期: 2012-02-28

基金项目: 吉林省科技发展计划基金(20082112)资助课题。

作者简介: 巴 诺(1981—),女,博士,讲师,主要从事量子光学方面的研究。E-mail: banuo2008@163.com

陷模的有关数据。

本文提出一种新型函数光子晶体,它的两个介质层的折射率是随空间位置变化的周期函数。由费马原理给出光在函数光子晶体中的运动方程,给出在任意入射角下一维函数光子晶体的电场强度分布公式,具体讨论了正弦函数型光子晶体的光传输特性,即电场在正弦函数型光子晶体中的分布。分别研究了有缺陷、无缺陷对光子晶体传输特性的影响,该结果对光子晶体的制备及应用具有一定的指导意义。

## 2 光在一维函数光子晶体中的运动方程

对于函数光子晶体,介质层的折射率是一个随空间位置变化的周期函数,一维函数光子晶体所对应的介质层的折射率为  $n(z)$ 。当光在一维光子晶体中二维空间传播时,折射率为  $n=n(z)$ ,运动的轨迹在  $xz$  平面上。入射的光波照射在平面上的  $H$  点,曲线  $HG$  和  $GL$  分别表示光的入射路径和反射路径,如图 1 所示。

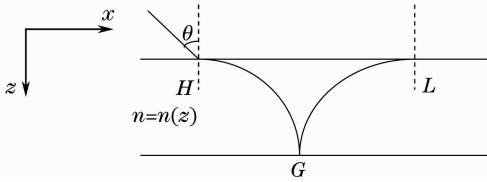


图 1 光在一维函数光子晶体二维运动空间的传播路径  
Fig. 1 Motion path of light in one-dimensional function photonic crystals and two-dimensional motion space  
光的运动方程可以由费马原理得到:

$$\delta \int_H^G n(z) ds = 0. \quad (1)$$

在二维传播空间中,线元  $ds$  为

$$ds = \sqrt{(dx)^2 + (dz)^2} = \sqrt{1 + z^2} dx. \quad (2)$$

因为  $z = \frac{dz}{dx}$ , (1)式变为

$$\delta \int_H^G n(z) \sqrt{1 + z^2} dx = 0. \quad (3)$$

把(3)式转换成

$$\int_H^G \left( \frac{\partial n(z)}{\partial z} \sqrt{1 + z^2} \delta z + \frac{\partial n(z)}{\partial z} \frac{\sqrt{1 + z^2}}{\partial z} \delta z \right) dx = 0, \quad (4)$$

对于  $H$  和  $G$  两个端点,变化为零,即  $\delta z(H) = \delta z(G) = 0$ ,由(4)式可以得到

$$\frac{\partial n(z)}{\partial z} - n(z) \frac{z}{1 + z^2} = 0. \quad (5)$$

(5)式即为光在一维光子晶体中二维空间传播的运动方程。

## 3 一维函数光子晶体非垂直入射的透射率和色散关系

对于常规光子晶体,光在每种介质中沿直线传播,但在函数光子晶体中光沿曲线传播。首先由费马原理计算出光在函数光子晶体中的曲线方程,计算结果直接给出,详细推导过程参见文献[21]。文献[21]提出函数光子晶体概念并研究了它的透射率和色散关系,本文在此基础上研究缺陷层对函数光子晶体透射特性的影响。

对于一维函数光子晶体,当入射角为  $\theta_i^l$  时,其  $M$  矩阵为<sup>[21]</sup>

$$M = M_g M_h, \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} M_g = \begin{pmatrix} \cos \delta_g & -\frac{i}{\eta_g} \sin \delta_g \\ -i\eta_g \sin \delta_g & \cos \delta_g \end{pmatrix}, \\ M_h = \begin{pmatrix} \cos \delta_h & -\frac{i}{\eta_h} \sin \delta_h \\ -i\eta_h \sin \delta_h & \cos \delta_h \end{pmatrix}, \end{cases} \quad (7)$$

$$\delta_g = \frac{\omega}{c} n_1(0) \times$$

$$\left\{ \cos \theta_i^l \cdot g + \sin \theta_i^l \int_0^g \frac{dz}{\sqrt{(1 + k_0^2) \left[ \frac{n_1(z)}{n_1(0)} \right]^2 - 1}} \right\}, \quad (8)$$

$$\delta_h = \frac{\omega}{c} n_2(0) \times$$

$$\left\{ \cos \theta_i^h \cdot h + \sin \theta_i^h \int_0^h \frac{dz}{\sqrt{(1 + k_1^2) \left[ \frac{n_2(z)}{n_2(0)} \right]^2 - 1}} \right\}, \quad (9)$$

$$k_0 = \cot \theta_i^l, \quad k_1 = \cot \theta_i^h, \quad (10)$$

$$\sin \theta_i^l = \frac{n_0}{n_1(0)} \sin \theta_i^0, \quad \sin \theta_i^h = \frac{n_0}{n_2(0)} \sin \theta_i^0, \quad (11)$$

$$\eta_g = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_1(0) \sqrt{1 - \frac{n_0^2}{n_g^2} \sin^2 \theta_{i1}^0}, \quad (12)$$

$$\eta_h = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_2(0) \sqrt{1 - \frac{n_0^2}{n_h^2} \sin^2 \theta_{i1}^0}. \quad (13)$$

从(6)~(13)式可知,函数光子晶体的  $M$  矩阵

与常规光子晶体的形式相同,但  $\delta_g$  和  $\delta_h$  与常规光子晶体不同,它们与折射率函数  $n(z)$  有关,即  $\delta_g$  和  $\delta_h$  中的积分项反映了函数光子晶体的新特点,常规光子晶体的  $\delta_g$  和  $\delta_h$  中没有积分项。当  $n(z)=n(0)$  为常数时,就成为常规光子晶体,把折射率是空间分布函数的光子晶体称为函数光子晶体,因为折射率的空间分布函数  $n(z)$  的形式不同, $\mathbf{M}$  矩阵不同,所以函数光子晶体是一般的光子晶体,常规光子晶体是函数光子晶体的特例。

对于第  $N$  个周期,电场强度  $E_N$ 、 $E_{N+1}$  和磁场强度  $H_N$ 、 $H_{N+1}$  满足的关系式为

$$\begin{pmatrix} E_N \\ H_N \end{pmatrix} = \mathbf{M}_N \begin{pmatrix} E_{N+1} \\ H_{N+1} \end{pmatrix}. \quad (14)$$

从(14)式最终得到  $N$  个周期光子晶体的特征方程:

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ H_1 \end{pmatrix} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \cdots \mathbf{M}_N \begin{pmatrix} E_{N+1} \\ H_{N+1} \end{pmatrix} = \mathbf{M}_g \mathbf{M}_h \mathbf{M}_g \mathbf{M}_h \cdots \mathbf{M}_g \mathbf{M}_h \begin{pmatrix} E_{N+1} \\ H_{N+1} \end{pmatrix} = \mathbf{M} \begin{pmatrix} E_{N+1} \\ H_{N+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{N+1} \\ H_{N+1} \end{pmatrix}, \quad (15)$$

其中  $\mathbf{M} = \mathbf{M}_g \mathbf{M}_h \mathbf{M}_g \mathbf{M}_h \cdots \mathbf{M}_g \mathbf{M}_h$  是一维函数光子晶体的传输矩阵。

透射系数为

$$t = \frac{E_{t,N+1}}{E_{i1}} = \frac{2\eta_0}{A\eta_0 + B\eta_0\eta_N + C + D\eta_{N+1}}, \quad (16)$$

透射率为

$$T = tt^*, \quad (17)$$

色散关系为

$$\cos kd = \cos \delta_g \cos \delta_h - \frac{1}{2} \left( \frac{\eta_g}{\eta_h} + \frac{\eta_h}{\eta_g} \right) \sin \delta_g \sin \delta_h. \quad (18)$$

## 4 一维函数光子晶体中的电场分布

### 4.1 无缺陷层的电场分布

由一维函数光子晶体的传输矩阵,可以得到

$$\begin{pmatrix} E_0 \\ H_0 \end{pmatrix} = \mathbf{M}_1(d_1) \mathbf{M}_2(d_2) \mathbf{M}_3(d_3) \cdots \mathbf{M}_{k-1}(d_{k-1}) \mathbf{M}_k(\Delta z) \begin{pmatrix} E_k(\Delta z) \\ H_k(\Delta z) \end{pmatrix}, \quad (19)$$

式中  $k$  表示第  $k$  周期,  $\Delta z$  为第  $k$  周期内的一部分。 $E_k(\Delta z)$ 、 $H_k(\Delta z)$  分别是在第  $k$  周期内的电场强度和磁场强度。

通过变换,则有

$$\begin{pmatrix} E_k(\Delta z) \\ H_k(\Delta z) \end{pmatrix} = \mathbf{M}_k^{-1}(\Delta z) \mathbf{M}_{k-1}^{-1}(d_{k-1}) \cdots \mathbf{M}_3^{-1}(d_3) \mathbf{M}_2^{-1}(d_2) \mathbf{M}_1^{-1}(d_1) \begin{pmatrix} E_0 \\ H_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A(\Delta z) & B(\Delta z) \\ C(\Delta z) & D(\Delta z) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_0 \\ H_0 \end{pmatrix}. \quad (20)$$

由(20)式,得到

$$\begin{aligned} E_k(\Delta z) &= A(\Delta z)E_0 + B(\Delta z)H_0 = A(\Delta z)E_0 + \\ B(\Delta z) \frac{E_0}{\mu c} &= \left[ A(\Delta z) + B(\Delta z) \frac{1}{\mu c} \right] E_0, \end{aligned} \quad (21)$$

则

$$\left| \frac{E_k(\Delta z)}{E_0} \right|^2 = \left| A(\Delta z) + B(\Delta z) \frac{1}{\mu c} \right|^2, \quad (22)$$

式中  $\mu$  为介质磁导率, $c$  为真空中光速。(22)式为一维函数光子晶体中无缺陷层的电场分布公式。

### 4.2 有缺陷层的电场分布

缺陷层位于第四周期和第五周期之间,由一维函数光子晶体传输矩阵有缺陷层,可以得出

$$\begin{pmatrix} E_0 \\ H_0 \end{pmatrix} = \mathbf{M}_1(d_1) \cdots \mathbf{M}_4(d_4) \mathbf{M}(d) \mathbf{M}_5(d_5) \cdots \mathbf{M}_k(\Delta z) \begin{pmatrix} E_k(\Delta z) \\ H_k(\Delta z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A'(\Delta z) & B'(\Delta z) \\ C'(\Delta z) & D'(\Delta z) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_0 \\ H_0 \end{pmatrix}. \quad (23)$$

通过计算可得

$$\left| \frac{E_k(\Delta z)}{E_0} \right|^2 = \left| A'(\Delta z) + B'(\Delta z) \frac{1}{\mu c} \right|^2. \quad (24)$$

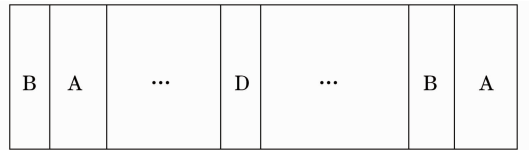


图2 一维函数光子晶体有缺陷层D的结构  
Fig. 2 Structure of one-dimensional function photonic crystals with a defect layer D

## 5 数值分析

通过上面的理论计算,由(17)、(22)和(24)式计算在非垂直入射情况下 TE 波一维函数光子晶体的透射率以及无缺陷和有缺陷时的电场分布。其中函数光子晶体的折射率选为正弦型函数分布

$$\begin{cases} n_b(z) = n_b(0) + A_1 \sin \frac{\pi}{b} z, 0 \leq z \leq b, \\ n_a(z) = n_a(0) + A_2 \sin \frac{\pi}{a} (z - b), b \leq z \leq b + a, \end{cases} \quad (25)$$

其折射率随位置分布曲线如图 3 所示。

在下列所有计算中,主要参数均取介质层 B 和 A 的宽度  $b, a$  分别为  $b=114.985 \text{ nm}, a=250.972 \text{ nm}$

以及  $n_b(0)=3.37, n_a(0)=1.544$ 。

图 4 为正弦型光子晶体随波长变化透射谱。比较图 4(a)与(b)可知,当振幅  $A_1, A_2$  取不同值时,禁带宽度发生明显变化,对函数光子晶体透射率有一定影响。由于图 4(a)中禁带相对较宽,故在下列计算中参数  $A_1, A_2$  均取为  $A_1=0.1, A_2=0.2$ 。

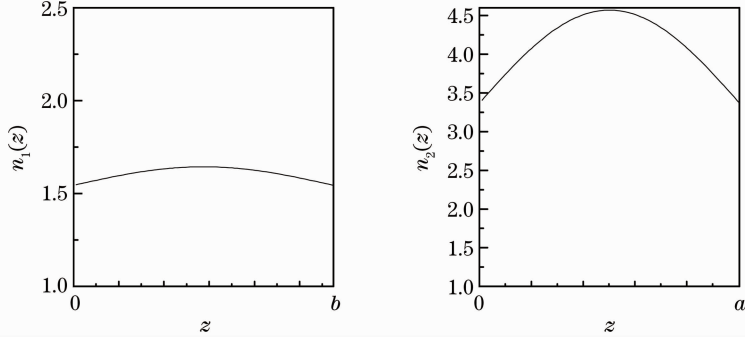


图 3 正弦函数型光子晶体折射率随位置分布曲线

Fig. 3 Refractive index curves of the sine function photonic crystals with different positions

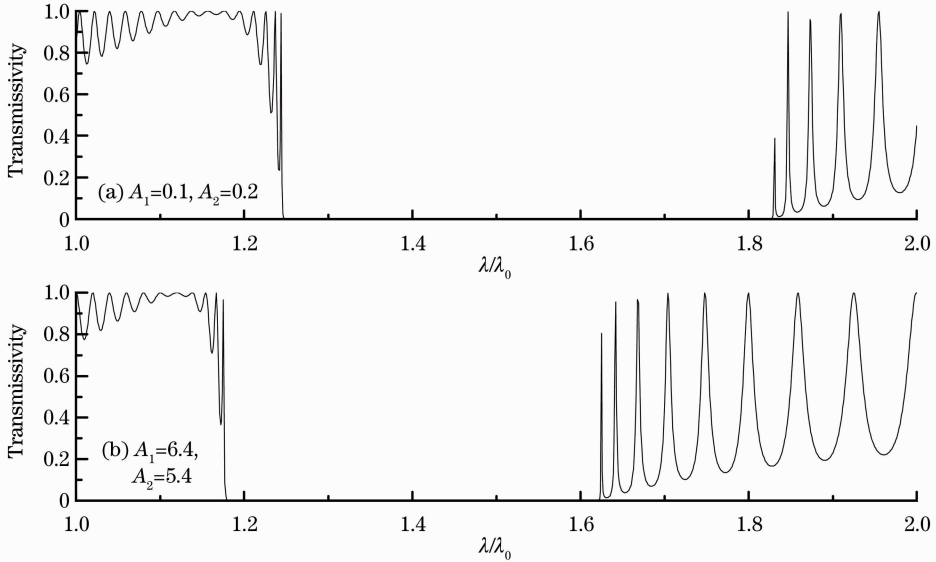


图 4 正弦函数型光子晶体透射率与波长曲线

Fig. 4 Transmissivity-wavelength curves of the sine function photonic crystals with different  $A_1$  and  $A_2$

在图 5 中,由(17)式可以给出含不同缺陷层的正弦函数型光子晶体透射率与波长的关系曲线,其中缺陷层折射率  $n_d = 4.8$ ,厚度  $d = \frac{\lambda_0}{8n_d} = 80.729 \text{ nm}$ 。

图 5(a)结构为  $(BA)^8 D (BA)^8$ ,即含单个缺陷层,存在一个强度较大的缺陷模,且缺陷模宽度较大。图 5(b)结构为  $(BA)^8 D^2 (BA)^8$ ,即含两个缺陷层,有较图 5(a)强度减弱、宽度变窄的缺陷模,且缺陷模位置向左移动,即蓝移。存在一个强度较大的缺陷模,且缺陷模宽度较大。图 5(c)结构为  $(BA)^8 D^3$

$(BA)^8$ ,即含三个缺陷层,较图 5(b)缺陷模强度更弱、宽度变窄,缺陷模位置进一步蓝移。也即缺陷层越多,缺陷模强度越低,宽度越窄,且缺陷模位置随缺陷层数目增加而蓝移。

在图 6 中,通过加入消光系数来降低或消除缺陷模对透射率的影响。此时缺陷层的折射率为函数,即  $\bar{n}_d = n_d + ik_e$ ,其中虚部  $k_e$  为消光系数。图 6(a~d)中的消光系数  $k_e$  分别为  $0, 0.003, 0.008, 0.02$ 。从图中可看出随着  $k_e$  的增大,缺陷模的强度逐渐降低,但  $k_e > 0.02$  时,缺陷模将消失。

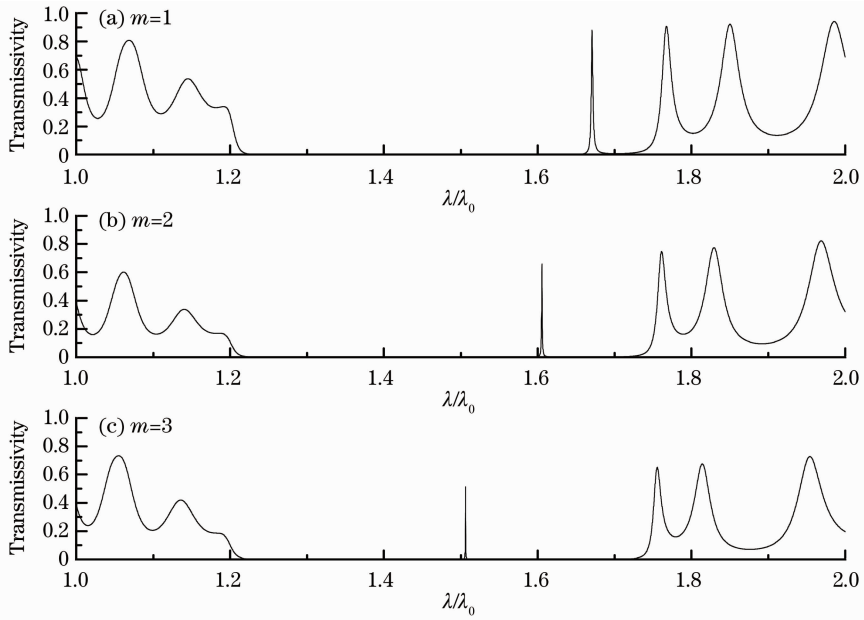


图 5 结构为(a)  $(BA)^8D(BA)^8$ ; (b)  $(BA)^8D^2(BA)^8$ ; (c)  $(BA)^8D^3(BA)^8$  正弦型的函数光子晶体透射率与波长曲线  
Fig. 5 Transmissivity-wavelength curves of the sine function photonic crystals with different structures.

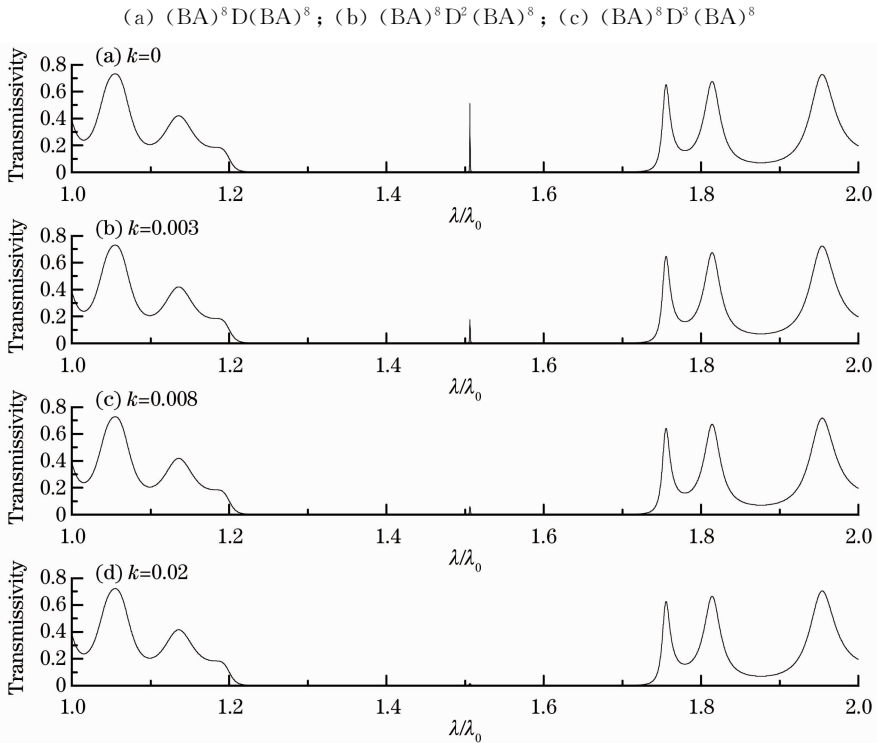


图 6 缺陷层消光系数对缺陷模的影响。(a)  $k_e=0$ ; (b)  $k_e=0.003$ ; (c)  $k_e=0.008$ ; (d)  $k_e=0.02$   
Fig. 6 Effect of different extinction coefficients  $k_e$  on defect mode. (a)  $k_e=0$ ; (b)  $k_e=0.003$ ;  
(c)  $k_e=0.008$ ; (d)  $k_e=0.02$

可见消光系数越大,缺陷模对透射率影响越小。

下面考虑加入缺陷层对一维函数光子晶体场强分布的影响。由(24)式计算得到有缺陷的函数光子晶体场强分布曲线,其中入射角均为  $\theta_i^0 = \pi/4$ 。图 7(a)~(c)结构分别为  $(BA)^{16}$ ,  $(BA)^{10}D(BA)^6$ 、

$(BA)^5D(BA)^{11}$ ,即图 7(a)没有加缺陷层时的场强分布,图 7(b)表示在第十与第十一周期之间加一个缺陷层。缺陷层 D 的折射率为  $n_d = 4$ ,厚度  $d = 96.875 \text{ nm}$ 。从图 7(b)可以看出,在缺陷层后[图 7(b)加粗线为缺陷层位置],电场强度较无缺陷

层的图 7(a)减弱,但在缺陷层前(即 1~10 周期)电场分布的强度及形状都没有改变。从图 7(c)也可得到相同结论[其中图 7(c)粗线为缺陷层位置]。

比较图 7(b)、(c)可知,缺陷层越靠前,它对其后场强的减弱程度越大。

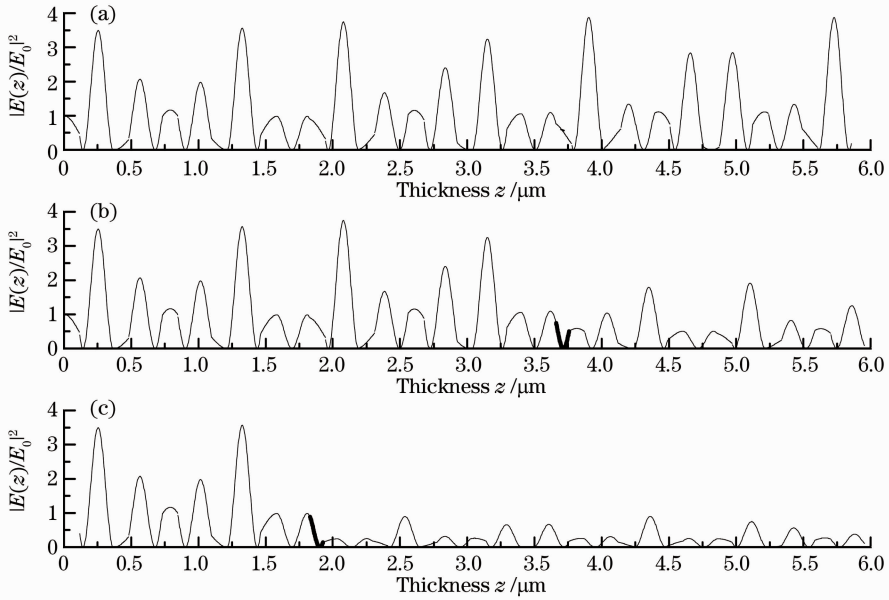


图 7 (a)结构为 $(BA)^{16}$ 无缺陷函数光子晶体的场强分布;(b)结构为 $(BA)^{10}D(BA)^6$ 有缺陷函数光子晶体的场强分布;(c)结构为 $(BA)^5D(BA)^{11}$ 有缺陷函数光子晶体的场强分布

Fig. 7 Distributions of electric field for the function photonic crystals with different structures.

(a)  $(BA)^{16}$ ; (b)  $(BA)^{10}D(BA)^6$ ; (c)  $(BA)^5D(BA)^{11}$

图 8(a)~(c)对应的结构分别为 $(BA)^{16}$ ,  $(BA)^{10}D(BA)^6$ ,  $(BA)^4D(BA)^{12}$ ,图 8(a)是没有加缺陷层时的场强分布,图 8(b)表示在第十与第十一

周期之间加一个缺陷层。缺陷层 D 折射率为  $n_d = \sqrt{1.9} \approx 1.3784$ ,厚度  $d = 281.122$  nm。从图 8(b)可以看出,在缺陷层后[图 8(b)加粗线为缺陷层位置],电

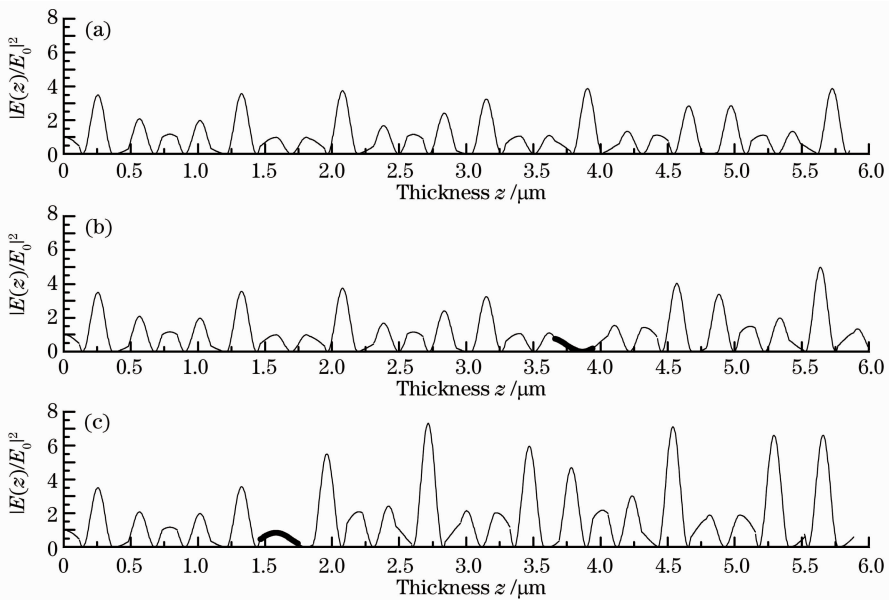


图 8 (a)结构为 $(BA)^{16}$ 无缺陷函数光子晶体的场强分布;(b)结构为 $(BA)^{10}D(BA)^6$ 有缺陷函数光子晶体的场强分布;(c)结构为 $(BA)^4D(BA)^{12}$ 有缺陷函数光子晶体的场强分布

Fig. 8 Distributions of electric field for the function photonic crystals with different structures. (a)  $(BA)^{16}$ ;

(b)  $(BA)^{10}D(BA)^6$ ; (c)  $(BA)^4D(BA)^{12}$

场强度较无缺陷层的图 8(a) 增强,但在缺陷层前(即 1~10 周期)电场分布的强度及形状都没有改变。从图 8(c) 也可得到相同结论[其中图 8(c) 粗线为缺陷层位置]。比较图 8(b)、(c) 可知,缺陷层越靠前,它对其后场强的增强程度越大。

## 6 结 论

通过系统地分析正弦函数型光子晶体的透射率和光学传输特性,得到了以下结论:1) 缺陷层数目越多,则缺陷模强度越低,宽度越窄,且随着缺陷层数目的增加缺陷模位置蓝移。2) 消光系数越大,缺陷模强度越低,也即缺陷模对透射率影响越小。3) 对常规光子晶体(折射率为常数),在缺陷层处场强是局域增强的。对正弦函数型光子晶体,在缺陷层处的场强既可局域增强,也可局域减弱。这与缺陷层介质的折射率大小有关。4) 当缺陷层对场强的作用是增强或减弱时,缺陷层位置越靠前,它对其后场强的增强或减弱作用越大。这些结论对光子晶体的设计与应用具有一定指导意义。

## 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 S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 3 Tong Kai, Cui Weiwei, Li Zhiquan. Strain-measurement of one-dimensional photonic crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 837~840  
童 凯, 崔卫卫, 李志全. 一维光子晶体的应变测量[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 837~840
- 4 Yin Jianling, Huang Xuguang, Liu Songhao. A variable optical attenuator based on the photonic crystal waveguide[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5): 671~674  
殷建玲, 黄旭光, 刘颂豪. 光子晶体波导可调光衰减器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 671~674
- 5 Liu Jing, Zheng Zhiqiang, Feng Zhuohong *et al.*. Tunable optical filter based on two-dimensional heterostructure photonic crystal with neighboring dot-defects and curved waveguide [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 2034~2037  
刘 璟, 郑志强, 冯卓宏 等. 二维异质结光子晶体中含近邻点缺陷的弯曲波导的可调谐滤波特性[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 2034~2037
- 6 Meng Qingsheng, Ouyang Zhengbiao, Wang Zhongchun *et al.*. Mode types and their related properties of one-dimensional photonic crystal resonant cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1290~1294  
孟庆生, 欧阳征标, 王仲淳 等. 一维光子晶体谐振腔的模式类型及其性质[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1290~1294
- 7 O. Panter, K. Leer, A. Scherer *et al.*. Two-dimensional photonic band-gap defect mode laser [J]. *Science*, 1999, **284**(5421): 1819~1821
- 8 A. Yariv, Y. Xu, R. K. Lee *et al.*. Coupled-resonator optical waveguide: a proposal and analysis [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(11): 711~713
- 9 Y. Fink, J. N. Winn, S. Fan *et al.*. A dielectric omnidirectional reflector[J]. *Science*, 1998, **282**(5394): 1679~1682
- 10 Zhu Zhihong, Ye Weimin, Ji Jiarong *et al.*. Analysis of photonic crystal filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 700~703  
朱志宏, 叶卫民, 季家熔 等. 光子晶体滤波特性分析[J]. *光子学报*, 2004, **33**(6): 700~703
- 11 S. Node, M. Yokoyama, M. Imada *et al.*. Polarization mode control of two-dimensional photonic crystal laser by unit cell structure design[J]. *Science*, 2001, **293**(5532): 1123~1125
- 12 Fu Lingli, Chen Weizong, Zheng Xinliang *et al.*. Modulation of incidence angle to impurity state in photonic crystal[J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(2): 22~25  
付灵丽, 陈慰宗, 郑新亮 等. 入射角对光子晶体杂质模的调制[J]. *激光杂志*, 2005, **26**(2): 22~25
- 13 Fang Yuntuan, Shen Tinggen, Tan Xilin. Study on one-dimensional photonic crystal with impurity defect[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11): 1557~1560  
方云团, 沈廷根, 谭锡林. 一维光子晶体掺杂缺陷模研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(11): 1557~1560
- 14 Zhou Jingou, Du Guiqiang, Zhang Yawen *et al.*. Electromagnetic modes of thickness modulated dual-periodic one-dimensional photonic crystal [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(8): 3703~3707  
周金苟, 杜桂强, 张亚文 等. 双周期厚度调制的一维光子晶体的电磁模[J]. *物理学报*, 2005, **54**(8): 3703~3707
- 15 Du Guiqiang, Liu Nianhua. Optical transmission spectra of one-dimensional photonic crystals with a mirror symmetry[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(4): 1095~1097  
杜桂强, 刘念华. 具有镜像对称结构的一维光子晶体的透射谱[J]. *物理学报*, 2004, **53**(4): 1095~1097
- 16 Huang Hanjuan, Ouyang Zhangbiao, Xu Guixia *et al.*. Investigation of perfect multi-channel filtering properties of complex-period photonic crystals[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2003, **14**(1): 50~53  
黄韩娟, 欧阳征标, 许桂霞 等. 复周期光子晶体的理想多通道滤波特性[J]. *光电子·激光*, 2003, **14**(1): 50~53
- 17 Mao Huibing, Yang Changli, Lai Zongsheng. Theoretical study of the tunable optical filter properties based on photonic crystals [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(7): 2201~2205  
茅惠兵, 杨昌利, 赖宗生. 光子晶体可调谐滤波特性的理论分析[J]. *物理学报*, 2004, **53**(7): 2201~2205
- 18 Tian Guoxun, Wu Yonggang, Wang Zhanshan *et al.*. Design and modification of double channel of one-dimensional photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 661~664  
田国勋, 吴永刚, 王占山 等. 一维光子晶体的双通道位置设计及调整[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5): 661~664
- 19 Liu Qineng. The complete picture of defect mode of doping one-dimensional photonic crystal[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, **28**(2): 224~227  
刘启能. 一维掺杂光子晶体缺陷模的全貌特征[J]. *半导体光电*, 2007, **28**(2): 224~227
- 20 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
- 21 Xiangyao Wu, Baijun Zhang, Jinghai Yang *et al.*. Function photonic crystals[J]. *Physica E*, 2011, **43**(9): 1694~1700