

含色散负折射率缺陷一维 Sinc 函数型光子晶体的光学传输特性

王 筠 刘 丹 刘 勇 李建明 靳海芹

(湖北第二师范学院物理与机电工程学院, 湖北 武汉 430205)

摘要 应用传输矩阵法对含色散负折射率缺陷一维 sinc 函数型光子晶体的光学传输特性进行了研究。结果表明: 含色散负折射率缺陷的 sinc 函数型光子晶体比含同样缺陷的余弦函数型光子晶体具有更宽阔的光子禁带; 该光子晶体的禁带宽度随着介质层折射率 $n_B(0)$ 、 $n_A(0)$ 或半周期厚度的增大迅速收缩变窄, 缺陷模消失; 当光波入射角增大时, 禁带宽度变宽, 缺陷模与禁带一起红移; 计算还发现该禁带结构对色散负折射率缺陷层的位置变动十分敏感; 但是, 缺陷层厚度的变化不会改变禁带的位置和宽度, 此时缺陷模会随着缺陷层厚度的增大向着禁带中心移动。这些结论对一维函数型光子晶体的设计具有重要参考意义。

关键词 材料; 函数光子晶体; 传输矩阵; 色散负折射率缺陷; 光学传输特性

中图分类号 O734 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0406001

Light Transmission Properties of One-Dimensional Sinc Function Photonic Crystals Containing a Dispersive Defect Layer with Negative Refractive Index

Wang Yun Liu Dan Liu Yong Li Jianming Jin Haiqin

(College of Physics and Electrical and Mechanical Engineering, Hubei University of Education, Wuhan, Hubei 430205, China)

Abstract Light transmission properties of one-dimensional sinc function photonic crystals containing a dispersive defect layer with negative refractive index are studied by transfer matrix method. The results show that one-dimensional sinc function photonic crystals containing a dispersive defect layer with negative refractive index have a broader forbidden-bands than one-dimensional cosine function photonic crystals containing the same defect layer. The forbidden bandwidth of this function photonic crystals is rapidly shrunk and narrowed with the increase of the refractive index $n_B(0)$ 、 $n_A(0)$ or half period thickness of the dielectric layer, and defect modes are disappeared. The forbidden bandwidth of this function photonic crystals is widened with the increase of angles of incidence, the defect modes are redshift with the forbidden-bands, and the structure of forbidden bands is also sensitive to changes on the position of a dispersive defect layer with negative refractive index. But the thickness variation of defect layers can not change the position and width of the forbidden band, and defect modes move toward the center of the band gap with the increase of the defect layer thickness. These results are important for the design of one-dimensional function photonic crystals.

Key words materials; function photonic crystals; transfer matrix; dispersive defect with negative refractive index; light transmission properties

OCIS codes 160.5298; 050.5298; 120.7000

收稿日期: 2013-10-21; 收到修改稿日期: 2013-11-01

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究计划指导性项目(B2013021)

作者简介: 王 筠(1966—), 女, 副教授, 主要从事光子晶体理论及其应用等方面的研究。

E-mail: wangyun.2007.6.5@163.com

1 引 言

光子晶体是一类由介电常数周期分布的非均匀人造光学材料构成的光学结构。光子晶体的概念最早是由美国 Yablonovitch^[1] 和 John^[2] 在 1987 年提出的。光在光子晶体中传播时与光子晶体相互作用形成光子带隙。光子带隙是光子晶体最重要的特征,频率落在光子带隙中的电磁波是禁止传播的,人们可以利用光子晶体的光子带隙来控制光波的传播。由于一维光子晶体具有结构简单、可靠性好、便于集成等优点,近年来利用一维光子晶体结构实现光信号的滤波功能越来越引起人们的关注^[3-14]。文献^[15]首次提出一种新型的函数光子晶体的概念,这种光子晶体的介质层折射率是随空间位置变化的周期函数,光波在其中沿曲线路径传播,它可以拥有比常规光子晶体更宽或更窄的光子带隙。已有文献^[15-18]研究了含常规介质缺陷层的一维折线型、阶梯型和正弦函数型光子晶体的光学传输特性,而对于含色散负折射率缺陷的一维 sinc 函数型光

子晶体传输特性的研究还未见报道。本文利用传输矩阵法,数值分析了一维含色散负折射率缺陷的 sinc 函数型光子晶体的光学传输性质,并将它与含有同样缺陷层的余弦函数型光子晶体进行比较分析,发现这种含缺陷的 sinc 函数型光子晶体的禁带宽度更宽,且禁带宽度可以通过改变介质层折射率或结构的半周期厚度来调节;给出了含缺陷的一维函数型光子晶体理论模型和各介质层折射率随空间位置变化的表示式;导出了该周期结构的透射率、反射率和内部电场和磁场分布表示式,最后对其进行了细致全面的数值分析与计算。

2 理论模型

如图 1 所示是由两种一维函数折射率介质层交替组成的含有缺陷层的周期结构,其中 A、B 介质层的折射率是随空间位置变化的周期函数,本文主要讨论 A、B 介质层为 sinc 函数型折射率分布的情况,并将它与余弦函数型折射率分布的情况进行比较。

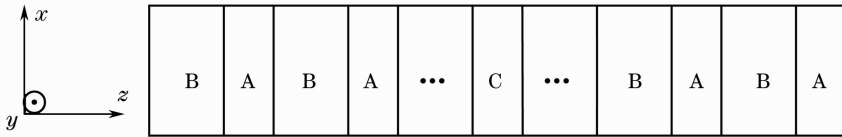


图 1 含色散负折射率缺陷的一维函数型光子晶体结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of one-dimensional function photonic crystals containing a dispersive defect layer with negative refractive index

Sinc 函数型折射率:

$$n_B(z) = n_B(0) + D_1 \operatorname{sinc}\left(\frac{4z - a + b}{4b}\right), \quad 0 \leq z \leq (a - b)/2, \quad (1)$$

$$n_A(z) = n_A(0) + D_2 \operatorname{sinc}\left(\frac{4z - 3a + b}{4a}\right), \quad (a - b)/2 \leq z \leq a, \quad (2)$$

此时,该结构光子晶体半周期厚度即介质层 B 和 A 的厚度分别为

$$d_B = (a - b)/2, d_A = (a + b)/2.$$

(1)、(2)式满足: $n_B(0) = n_B\left(\frac{a - b}{2}\right), n_A\left(\frac{a - b}{2}\right) = n_A(a)$ 。

余弦函数型折射率:

$$n_B(z) = n_B(0) + D_1 \cos\left(\frac{\pi z}{b}\right), 0 \leq z \leq 2b, (3)$$

$$n_A(z) = n_A(0) + D_2 \cos\left[\frac{2\pi(z - 2b)}{a}\right], \quad 2b \leq z \leq 2b + a, \quad (4)$$

此时,该结构光子晶体半周期厚度即介质层 B 和 A

的厚度分别为 $2b$ 和 a 。

如果取 $n_B(0) = 3.37, n_A(0) = 1.544, D_1 = 0.1, D_2 = 0.2, a = 483.211 \text{ nm}, b = 179.557 \text{ nm}$, 将这些数据代入(1)~(4)式中可以绘出 sinc 函数型和余弦函数型的折射率随空间位置分布曲线,如图 2 和图 3 所示。

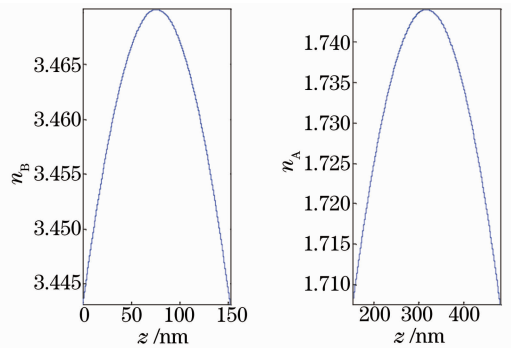


图 2 Sinc 函数型光子晶体折射率随位置分布曲线
Fig. 2 Refractive index curves of the sinc function photonic crystals with different positions

缺陷层 C 是色散各向同性均匀负折射率材料,

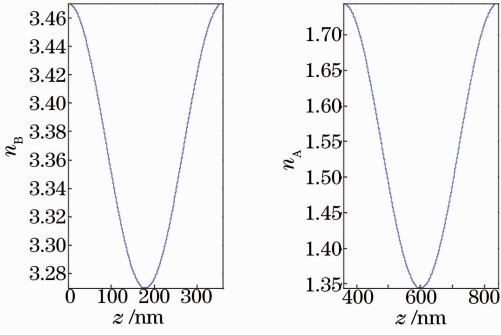


图 3 余弦函数型光子晶体折射率随位置分布曲线

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

其相对介电常数和相对磁导率随入射电磁波圆频率变化的关系式分别为

$$\begin{aligned}\epsilon_C &= 1.21 - \frac{100}{\omega^2}, \\ \mu_C &= 1.0 - \frac{100}{\omega^2},\end{aligned}$$

C 层折射率为

$$n_C = -\sqrt{\epsilon_C \mu_C}, \quad (5)$$

式中 ω 是入射电磁波的圆频率。

3 计算方法

3.1 一维函数型光子晶体的传输矩阵及透射率和反射率

设一电场 \mathbf{E} 沿 y 轴负方向的 TE 波由空气以入射角 θ_i^j 斜入射到由 B、A 两种函数介质层交替生成的一维函数型光子晶体 $(BA)_m C (BA)_m$ 结构上 ($z > 0$), 如图 1 所示, 其中 m 是介质层周期数。由于光在函数光子晶体中沿曲线传播, 文献[15]由费马原理出发, 利用电场和磁场的切向分量在分界面连续的条件推导得到, 在该结构同一介质层的两个分界面位置 z 和 $z + \Delta z$ 处的电场强度分量和磁场强度分量间满足以下矩阵关系^[15-18]:

$$\mathbf{M}_j(\Delta z, \omega) = \begin{pmatrix} \cos \delta_j & -\frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ -i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{pmatrix}, \quad (6)$$

式中 $j = A, B, C$ 分别代表各介质层。

对介质层 B:

$$\delta_B = \frac{\omega}{c} n_B(0) \left\{ \cos \theta_t^I \cdot d_B + \sin \theta_t^I \int_0^{d_B} \frac{dz}{\sqrt{(1+k_1^2) [n_B(z)/n_B(0)]^2 - 1}} \right\}, \quad (7)$$

$$\eta_B = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_B(0) \cos \theta_t^I. \quad (8)$$

对介质层 A:

$$\delta_A = \frac{\omega}{c} n_A(0) \left\{ \cos \theta_t^{II} \cdot d_A + \sin \theta_t^{II} \int_0^{d_A} \frac{dz}{\sqrt{(1+k_2^2) [n_A(z)/n_A(0)]^2 - 1}} \right\}, \quad (9)$$

$$\eta_A = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_A(0) \cos \theta_t^{II}. \quad (10)$$

对缺陷层 C:

$$\delta_C = \frac{\omega}{c} n_C d_C \cos \theta_t^C, \quad (11)$$

$$\eta_C = \sqrt{\epsilon_0/\mu_0} n_C \cos \theta_t^C, \quad (12)$$

式中 d_C 是缺陷层 C 的厚度, $k_1 = \cot \theta_t^I, k_2 = \cot \theta_t^{II}$ 。而

$$\sin \theta_t^I = \frac{n_0}{n_B(0)} \sin \theta_i^0, \sin \theta_t^{II} = \frac{n_0}{n_A(0)} \sin \theta_i^0, \cos \theta_t^C =$$

$\sqrt{1 - \frac{n_0^2}{n_C^2} \sin^2 \theta_i^0}$, $\theta_t^j (j = B, A, C)$ 是电磁波入射到各介质层的折射角。则一维函数光子晶体一个周期的传输矩阵 \mathbf{M} 为^[17]

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_B \mathbf{M}_A = \begin{pmatrix} \cos \delta_B & -\frac{i}{\eta_B} \sin \delta_B \\ -i\eta_B \sin \delta_B & \cos \delta_B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \delta_A & -\frac{i}{\eta_A} \sin \delta_A \\ -i\eta_A \sin \delta_A & \cos \delta_A \end{pmatrix}. \quad (13)$$

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

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

于是可以得到 N 个周期光子晶体的特征方程:

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

式中 $\mathbf{M} = \mathbf{M}_B \mathbf{M}_A \mathbf{M}_B \mathbf{M}_A \cdots \mathbf{M}_C \cdots \mathbf{M}_B \mathbf{M}_A$ 是一维函数型光子晶体的传输矩阵, E_1 和 H_1 是图 1 周期结构左侧第一个界面上的切向电场强度和切向磁场强度, 而 E_{N+1} 和 H_{N+1} 是图 1 右侧最后一个界面上的切向电场强度和切向磁场强度。

根据电磁场的边界条件可得如图 1 所示周期结构的透射系数为^[17-19]

$$t = \frac{2\eta_0 \cos \theta_i^0}{A\eta_0 \cos \theta_i^0 + B\eta_0 \eta_{N+1} \cos \theta_i^0 + C + D\eta_{N+1}}, \quad (16)$$

透射率为

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

反射系数为

$$r = \frac{A\eta_0 \cos \theta_i^0 + B\eta_0 \eta_{N+1} \cos \theta_i^0 - C - D\eta_{N+1}}{A\eta_0 \cos \theta_i^0 + B\eta_0 \eta_{N+1} \cos \theta_i^0 + C + D\eta_{N+1}}, \quad (18)$$

反射率为

$$R = rr^*. \quad (19)$$

3.2 含缺陷层时的内部电场和磁场分布

由(15)式可得^[15-18]

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

式中 E_0 和 H_0 是图 1 周期结构最左侧第一个界面上的入射切向电场强度和磁场强度, k 表示第 k 个周期, Δz 是第 k 个周期内的一部分, $E_k(\Delta z)$ 和 $H_k(\Delta z)$ 分别是在第 k 个周期内的电场强度和磁场强度, 经过变换可得

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

进一步得到其磁场分布表示式为

$$\left| \frac{H_k(\Delta z)}{H_0} \right|^2 = \left| C'(\Delta z)(1+r) + D'(\Delta z) \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cos \theta_i^0 (1-r) \right|^2. \quad (21)$$

4 数值计算与分析

本节主要研究含色散负折射率缺陷的一维 sinc 函数型光子晶体, 其结构式为 $(BA)_{10}C(BA)_{10}$ 。在下面计算中取 $n_B(0) = 3.37$, $n_A(z) = 1.544$, $D_1 = 0.1$, $D_2 = 0.2$, $a = 483.211 \text{ nm}$, $b = 179.557 \text{ nm}$, 该结构光子晶体的半周期厚度 $d_B = 151.827 \text{ nm}$ 和 $d_A = 331.384 \text{ nm}$, 中心圆频率 $\omega_0 = 4.6026935 \times 10^{14} \text{ rad/s}$ 。

据(1)~(17)式, 对含色散负折射率缺陷的一维 sinc 函数型光子晶体和含同样缺陷的余弦函数型光子晶体的透射谱进行了数值计算, 计算时取入射角 $\theta_i^0 = \pi/4$, 缺陷层厚度 $d_C = 120 \text{ nm}$, 计算结果如图 4 所示, 图中横坐标是归一化圆频率, 归一化因子是中心圆频率 $\omega_0 = 4.6026935 \times 10^{14} \text{ rad/s}$, 纵坐标是透射率 T 。图 4(a)是余弦函数型光子晶体的透射谱, 图 4(b)是 sinc 函数型光子晶体的透射谱。比较图 4(a)与图 4(b), 可以看到含色散负折射率缺陷层

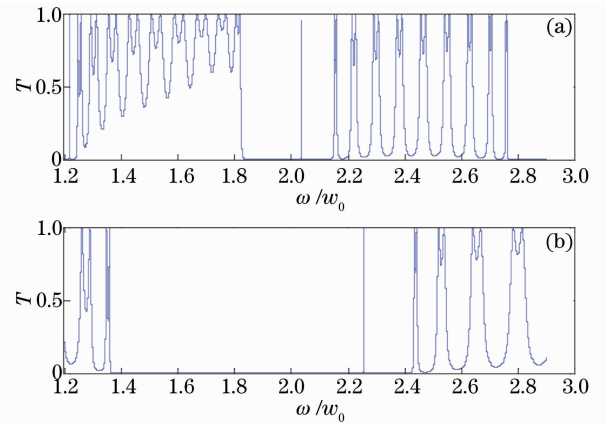


图 4 含相同缺陷层的一维 sinc 函数型光子晶体和余弦函数型光子晶体的透射谱比较。(a) 余弦型; (b) sinc 型
Fig. 4 Comparison of transmission spectra of one-dimensional sinc function and a cosine function photonic crystals containing the same defect layer. (a) Cosine type; (b) sinc type

的 sinc 函数型光子晶体较之含同样缺陷层的余弦函数型光子晶体有着更宽的光子禁带宽度。

图 5 分别绘出含色散负折射率缺陷的 sinc 函数型光子晶体(BA)₁₀C(BA)₁₀[如图 5(a)所示]与不含缺陷层的 sinc 函数型光子晶体(BA)₂₀[如图 5(b)所示]的透射谱。从图 5 可知,在含有色散负折射率缺陷的 sinc 函数型光子晶体的禁带中出现了隧穿模,而不含缺陷层的 sinc 函数型光子晶体的禁带中没有隧穿模,所以图 5(a)中的隧穿模为缺陷模。

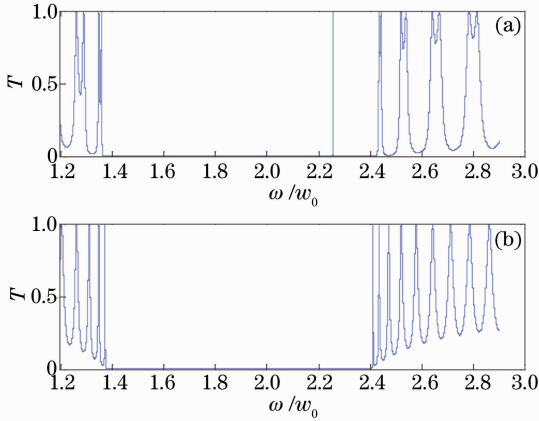


图 5 两种一维 sinc 函数型光子晶体透射谱比较图。

(a) 结构式为(BA)₁₀C(BA)₁₀; (b) 结构式为(BA)₂₀

Fig. 5 Two kinds of one-dimensional sinc function photonic crystals transmission spectra comparison.

(a) (BA)₁₀C(BA)₁₀; (b) (BA)₂₀

由(1)、(2)、(5)~(17)式可知,含色散负折射率缺陷的一维 sinc 函数型光子晶体的透射谱与介质层 B 和 A 的折射率 $n_B(\omega)$ 和 $n_A(\omega)$ 有关,在图 6 中计算了 $n_B(\omega)$ 和 $n_A(\omega)$ 分别取两组不同值时的透射

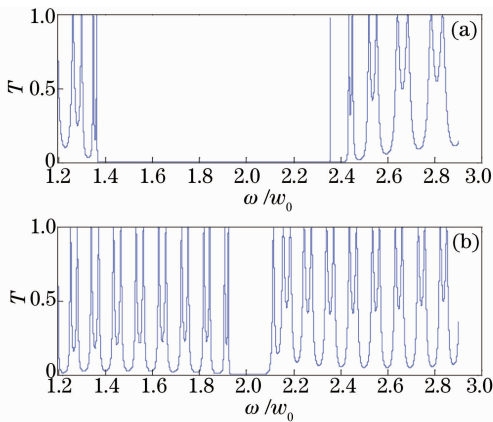


图 6 不同折射率的透射谱。(a) $n_B(0)=3.37$, $n_A(0)=1.544$; (b) $n_B(0)=5.37$, $n_A(0)=3.544$

Fig. 6 Transmission spectra with different refractive indexes. (a) $n_B(0)=3.37$, $n_A(0)=1.544$; (b) $n_B(0)=5.37$, $n_A(0)=3.544$

谱,计算中取入射角 $\theta^i = \pi/4$, 缺陷层厚度 $d_c = 60$ nm,其中图 6(a)的 $n_B(0) = 3.37$, $n_A(0) = 1.544$;图 6(b)的 $n_B(0) = 5.37$, $n_A(0) = 3.544$ 。从图 6 可以看到,随着介质层 B 和 A 的折射率 $n_B(0)$ 和 $n_A(0)$ 的增大,透射谱中禁带宽度急剧变窄,缺陷模消失。

由(1)、(2)式可知,这种结构光子晶体的 B、A 介质层折射率 $n_B(z)$ 和 $n_A(z)$ 还与系数 D_1 和 D_2 有关,在图 7 中绘出了 D_1 和 D_2 分别取两组不同值时的透射谱,其中图 7(a) $D_1 = 0.1, D_2 = 0.2$;图 7(b) $D_1 = 0.3, D_2 = 0.6$ 。比较这两个图可以发现,随着 D_1 和 D_2 的值成倍增大,光子禁带发生微小蓝移,隧穿模也随之向着高频微微移动。

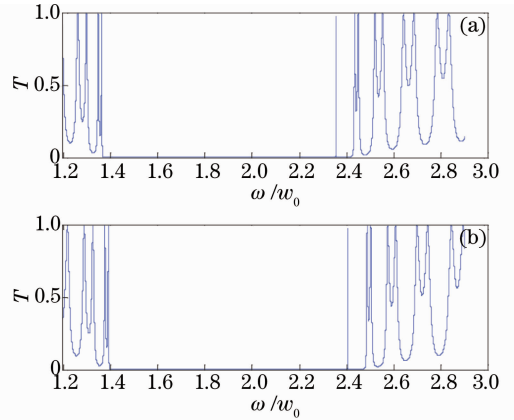


图 7 不同 D_1 和 D_2 值的透射谱。(a) $D_1 = 0.1$, $D_2 = 0.2$; (b) $D_1 = 0.3$, $D_2 = 0.6$

Fig. 7 Transmission spectra when taking two sets of values in D_1 and D_2 . (a) $D_1 = 0.1$, $D_2 = 0.2$; (b) $D_1 = 0.3$, $D_2 = 0.6$

下面考察 TE 波入射角 θ^i 对该光子晶体透射率的影响,计算结果如图 8 所示,其中图 8(a)~(c)的入射角依次是 $\pi/4, \pi/6, \pi/12$, 缺陷层厚度 $d_c = 120$ nm。从图 8 可以发现,随着入射角的增大,该结构光子晶体的光子禁带宽度增大,隧穿模随着光子禁带一起红移。这种光子禁带结构与文献[18]的阶梯函数型光子晶体不一样,后者的光子禁带宽度随入射角的增大而变窄。

图 9 绘出了该结构光子晶体不同半周期厚度时的透射谱,其中图 9(a)~(c)的半周期厚度依次是 $d_B = 75.9135$ nm、 $d_A = 165.692$ nm; $d_B = 151.827$ nm、 $d_A = 331.384$ nm 和 $d_B = 227.7405$ nm、 $d_A = 497.076$ nm,计算中缺陷层厚度 $d_c = 120$ nm,入射角 $\theta^i = \pi/4$ 。由图 9 可知,随着半周期厚度的增大,光子禁带发生红移同时收缩变窄,缺陷模透射率减小,阶梯函数型光子晶体^[18]的光子禁带宽度在半周

期厚度增大时一样变狭窄。

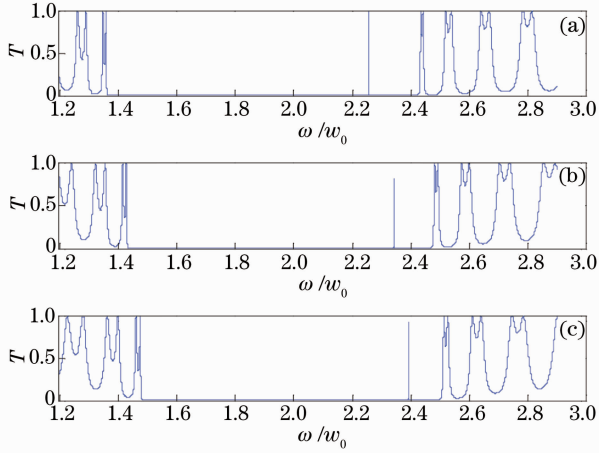


图 8 不同入射角时透射谱。(a) $\theta_i = \pi/4$;
(b) $\theta_i = \pi/6$; (c) $\theta_i = \pi/12$

Fig. 8 Transmission spectra with different angles of incidence. (a) $\theta_i = \pi/4$; (b) $\theta_i = \pi/6$; (c) $\theta_i = \pi/12$

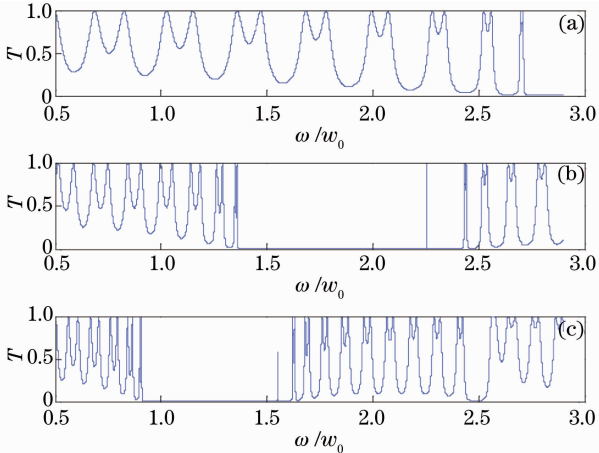


图 9 不同半周期厚度的透射谱。(a) $d_B = 75.9135$ nm, $d_A = 165.692$ nm; (b) $d_B = 151.827$ nm, $d_A = 331.384$ nm; (c) $d_B = 227.7405$ nm, $d_A = 497.076$ nm

Fig. 9 Transmission spectra with different half period thicknesses. (a) $d_B = 75.9135$ nm, $d_A = 165.692$ nm; (b) $d_B = 151.827$ nm, $d_A = 331.384$ nm; (c) $d_B = 227.7405$ nm, $d_A = 497.076$ nm

为了弄清缺陷层厚度对该结构光子晶体的透射率的影响,在图 10 中绘出缺陷层分别取三个不同值时的透射谱,计算时取入射角 $\theta_i^0 = \pi/4$,图 10(a)~(c)的缺陷层厚度依次取 80、100、120 nm。由图 10 可知,缺陷层厚度的改变,对该结构光子禁带宽度和位置均不产生影响,但其中缺陷模的透射率随着缺陷层厚度的增大而变大,并向禁带中心移动。这与含常规介质缺陷层的一维正弦函数型光子晶体禁带宽度对缺陷层厚度的敏感^[16]不一样。

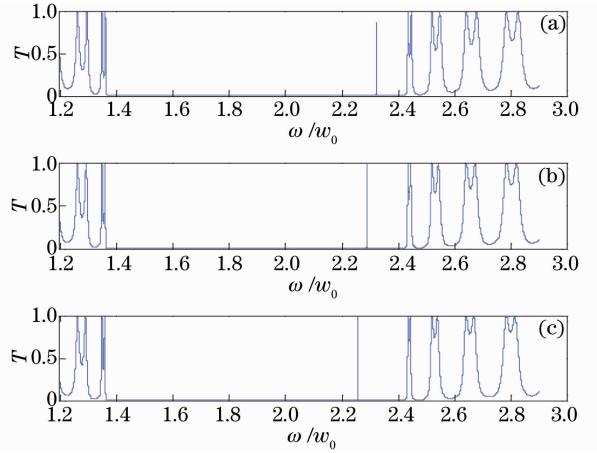


图 10 不同缺陷层厚度的透射谱。(a) $d_c = 80$ nm;
(b) $d_c = 100$ nm; (c) $d_c = 120$ nm

Fig. 10 Transmission spectra with different defect layer thicknesses. (a) $d_c = 80$ nm; (b) $d_c = 100$ nm; (c) $d_c = 120$ nm

为了进一步弄清楚缺陷层的位置对缺陷模的影响,在图 11 中考察了该光子晶体在缺陷层处于不同位置时的透射谱,这里取入射角为 $\theta_i^0 = \pi/4$,缺陷层厚度 $d_c = 120$ nm,计算结果如图 11 所示,其中图 11(a)的周期结构是 $(BA)_{10}C(BA)_{10}$,图 11(b)的周期结构是 $(BA)_8C(BA)_{12}$,图 11(c)是 $(BA)_{20}C$ 。从图 11 中可以发现,随着缺陷层 C 由结构中心位置向一侧移动,光子禁带宽度变窄,禁带边缘形状变化显著,缺陷模消失。

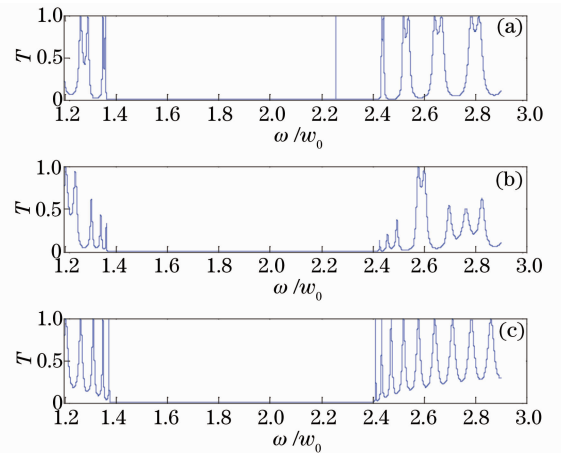


图 11 缺陷层在不同位置时的透射谱。(a) $(BA)_{10}C(BA)_{10}$; (b) $(BA)_8C(BA)_{12}$; (c) $(BA)_{20}C$

Fig. 11 Transmission spectra when the dispersion defect layer is in different positions. (a) $(BA)_{10}C(BA)_{10}$; (b) $(BA)_8C(BA)_{12}$; (c) $(BA)_{20}C$

5 结 论

本文应用传输矩阵法全面细致地计算了含色散

负折射率缺陷的一维 sinc 函数型光子晶体的透射谱, 并对其光学传输特性进行了比较分析, 得到以下结论: 1) 含色散负折射率缺陷的 sinc 函数型光子晶体比含有相同缺陷的余弦函数型光子晶体具有更宽阔的光子禁带。2) 随着介质层折射率 $n_B(0)$ 、 $n_A(0)$ 或者结构半周期厚度的增大, 光子禁带宽度急剧收缩变窄, 缺陷模消失。3) 随着光波入射角的增大, 光子禁带宽度变宽, 且缺陷模随同光子禁带一起红移。4) 光子禁带宽度和缺陷模均对色散负折射率缺陷层的位置变动十分敏感, 随着缺陷层向周期结构一侧移动, 光子禁带宽度变窄, 缺陷模逐渐消失。5) 光子禁带宽度和位置对缺陷层厚度变化不敏感, 但是随着缺陷层厚度的增大缺陷模向着禁带中心移动。这些结论对于基本的光子晶体器件的设计具有重要的意义。

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 Liu Nianhua, Zhu Shiyao, Chen Hong, *et al.*. Superluminal pulse propagation through one-dimensional photonic crystals with a dispersive defect[J]. Phys Rev E, 2002, 65(4): 046607.
- 4 A Alu, N Engheta. Pairing an epsilon-negative slab with a mu-negative slab: resonance, tunneling and transparency[J]. IEEE Antennas and Propagation, 2003, 51(10): 2558-2571.
- 5 Wang Ligang, Chen Hong, Zhu Shiyao. Omnidirectional gap and defect mode of one-dimensional photonic crystals with single-negative materials[J]. Phys Rev B, 2004, 70(24): 245102.
- 6 Jiang Haitao, Chen Hong, Li Hongqiang, *et al.*. Properties of one-dimensional photonic crystals containing single-negative materials[J]. Phys Rev E, 2004, 69(6): 066607.
- 7 Fang Yuntuan, Shen Tinggen, Tan Xilin. Study on one-dimensional photonic crystal with impurity defects[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.
- 8 Deng Xinhua, Liu Nianhua, Liu Genquan. Frequency response of photonic heterostructures consisting of single-negative materials[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(12): 7280-7285.
邓新华, 刘念华, 刘根泉. 单负材料光子晶体异质结构的频率响应[J]. 物理学报, 2007, 56(12): 7280-7285.
- 9 Zhang Yanan, Deng Lingling, Xu Fei. Study on defect modes in one-dimensional photonic crystals with periodic double defect layers of single-negative materials[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(s1): 148-152.

- 张雅男, 邓玲玲, 徐 飞. 具有周期性双单负材料缺陷的一维光子晶体缺陷模的研究[J]. 光学学报, 2009, 29(s1): 148-152.
- 10 Zhang Juan, Yu Shuai, Guo Sen, *et al.*. Design of flat-top polarization filters based on one-dimensional photonic crystal theory[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(1): 0105005.
张 娟, 于 帅, 郭 森, 等. 基于一维光子晶体理论的平顶偏振滤波器设计[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0105005.
- 11 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.
- 12 Chen Zefeng, Han Peng, Chen Yihang. Photonic band gap splitting based on optical tamm states of photonic crystal[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0516002.
陈泽锋, 韩 鹏, 陈溢杭. 基于光子晶体塔姆态的带隙分裂[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0516002.
- 13 Wang Yun, Xiao Ming, Jin Haiqin, *et al.*. Frequency characteristics of symmetrical structured one-dimensional photonic crystal consisting of the cycle unit of three single-negative materials[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(6): 062602.
王 筠, 肖 明, 靳海芹, 等. 三层单负材料为周期单元对称型一维光子晶体的频率特性[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(6): 062602.
- 14 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.
- 15 Xiangyao Wu, Baijun Zhang, Jinghai Yang, *et al.*. Function photonic crystals[J]. Physica E, 2011, 43(9): 1694-1700.
- 16 Ba Nuo, Wu Xiangyao, Wang Jing, *et al.*. Light transmission properties of one-dimensional function photonic crystals[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0606001.
巴 诺, 吴向尧, 王 婧, 等. 一维函数型光子晶体的光学传输特性[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0606001.
- 17 Wang Guanghuai, Wang Qingcai, Wu Xiangyao, *et al.*. Research on one-dimensional function photonic crystals[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(13): 134208.
王光怀, 王清才, 吴向尧, 等. 一维函数光子晶体的研究[J]. 物理学报, 2012, 61(13): 134208.
- 18 Xiangyao Wu, Bojun Zhang, Jinghai Yang, *et al.*. The characteristic of light transmission of function photonic crystals[J]. Physica E, 2012, 44(1-8): 1223-1229.
- 19 Yuan Yuan Chen, Ying Fang, Shan Hong Huang, *et al.*. Surface tamm states in one-dimensional photonic crystals containing anisotropic indefinite metamaterials[J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(6): 061602.
- 20 Liu Qineng. Field distribution of polarized light of defect mode in one-dimensional doping photonic crystal[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1116001.
刘启能. 一维掺杂光子晶体中偏振光缺陷模的光场分布[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1116001.

栏目编辑: 王晓瑛