

色散缺陷对 Sinc 函数型光子晶体带隙的影响

王 筠

湖北第二师范学院物理与机电工程学院, 湖北 武汉 430205

摘要 利用传输矩阵法及对色散缺陷层采用洛伦兹振子模型, 研究了一维含色散缺陷的 Sinc 函数型光子晶体的光子禁带和色散缺陷模, 计算了该周期结构的复有效折射率。结果表明, 加入缺陷层后可获得宽阔的光子禁带; 缺陷层引入色散后在中心圆频率附近色散缺陷模出现; 随着振子强度的增大, 增益性缺陷模圆频率发生阶跃式移动, 其透射率显著增大, 而吸收性缺陷模的透射率显著减小, 此时缺陷模处的色散曲线有一个近乎垂直的斜率, 此处的群速度将大大降低; 增益性缺陷层基底折射率对缺陷模频率影响显著; 缺陷层位于周期结构中心层时缺陷模频率最低、透射率最大。增大入射角使得缺陷模红移, 增益性缺陷模在特殊入射角处透射率会出现千倍增益。

关键词 材料; 函数光子晶体; 传输矩阵法; 色散缺陷; 光子带隙

中图分类号 O734 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0406001

Effect of Dispersive Defect on Bandgap of One-Dimensional Sinc Function Photonic Crystals

Wang Yun

*School of Physics and Electrical and Mechanical Engineering, Hubei University of Education,
Wuhan, Hubei 430205, China*

Abstract By means of transfer matrix method, the photonic band-gap and the center tunneling mode of one-dimensional Sinc function photonic crystal with dispersive defect are discussed. The dispersive defects are described by a Lorentz oscillator model. The complex effective index of the structure is calculated. It is found that an extremely wide photonic band gap is obtained after adding defect layer. After the introduction of the dispersion of the defect layer, the dispersive defect modes are appeared near the center angular frequency. With the increase of the oscillator strength, the angular frequency of the gain defect mode is stepped, the transmittance of them is significantly increased, but the transmittance of the absorptive defect mode is reduced, and the slope of a nearly vertical of dispersion curves is obtained at the angular frequency of the dispersive defect mode, group velocity here is greatly reduced. The angular frequency of the defect mode is significantly affected by the refractive index of the substrate of the gain defect layer. The angular frequency of the defect mode is the lowest and transmittance of them is the maximum when the defect layer is located in the center of the periodic structure. The angular frequency of the defect mode is made redshift with the increasing of the angle of incidence, and the transmittance of the gain defect mode is obtained thousands times in a special angle of incidence.

Key words materials; function photonic crystal; transfer-matrix method; a dispersive defect ;photonic band-gap

OCIS codes 160.5298; 050.5298; 120.7000

1 引 言

光子晶体是一种由介电材料的周期性排列构成的人工晶体^[1], 光子晶体最重要的特征是光子带隙, 频率

收稿日期: 2014-11-25; 收到修改稿日期: 2014-12-07

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, 现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

落在光子带隙中的电磁波是禁止传播的。最简单的光子晶体是一维光子晶体。对于一维无限光子晶体的色散关系可以由布洛赫定理推导得到,对一维有限光子晶体的色散特性则可以通过引入有效折射率来描述,由于在禁带中有效折射率是奇异的,会导致禁带中的电磁波超光速传输,这种光脉冲的超光速传输已经得到实验证明^[2-4]。在光子晶体的研究中,人们通常希望获得更宽的光子带隙,为了增大带隙通常采用折射率差别较大的两种材料制备光子晶体,有文献[5-8]采用一定的渐变结构也可以有效拓展光子带隙。文献[9]首次提出了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。已有文献[9-12]研究了一维折线型、阶梯型和正弦函数型光子晶体的光学传输特性,为了获得更宽带隙的这类光子晶体可以通过加入适当缺陷层来实现^[13-14],缺陷的色散对这类光子晶体光子带隙的影响也是值得深入研究的。

应用传输矩阵法分析了色散缺陷对 Sinc 函数型光子晶体带隙的影响,其中缺陷层采用洛伦兹振子模型。研究表明,缺陷层的加入会获得极宽的光子带隙,并导致整个周期结构在隧穿模频率处色散特性的突变,即由正常色散突变为反常色散,通过调节色散缺陷的振子强度和基底折射率以及光波入射角可以控制缺陷模红移或蓝移。

2 理论模型

考虑一个由两种一维 Sinc 函数折射率介质层 A、B 交替组成的有限光子晶体, A、B 介质层折射率随空间位置变化,它们的折射率关系式是

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

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

此时,介质层 B 和 A 的厚度分别为 $d_A = (a - b)/2$, $d_B = (a + b)/2$ 。(1)、(2)式分别满足: $n_A(0) = n_A\left(\frac{a - b}{2}\right)$, $n_B\left(\frac{a - b}{2}\right) = n_B(a)$ 。

缺陷层 D 采用掺杂二能级原子模型,其线性极化率可用洛伦兹振子表示为^[3]

$$\chi(\omega) = \pm \frac{\Gamma}{\omega - \omega_A + i\gamma}, \quad (3)$$

式中 ω 是电磁波圆频率, ω_A 为振子共振圆频率, γ 为振子的半峰全宽, Γ 为振子强度,它依赖于跃迁矩阵元及振子密度。当 $\chi(\omega)$ 取“+”号时表示增益二能级原子,当 $\chi(\omega)$ 取“-”号时表示吸收二能级原子。设其是弱磁性介质,即 $\mu_D = 1$,其介电函数为

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_D + \chi(\omega), \quad (4)$$

上式第一项是非共振的基底介电常数 $\varepsilon_D = n_D^2$,第二项是振子共振的贡献。

3 计算方法

设一平面横电波(TE波)由空气以入射角 θ_i^0 斜入射到由 A、B 两种函数介质层交替生成的一维函数型光子晶体 $(BAB)_m D(BAB)_m$ 结构上 ($z > 0$),其电场 E 沿 y 轴负方向, m 是介质层周期数。由于光在函数光子晶体中沿曲线传播,由费马原理出发,利用电场和磁场边界条件可以推得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^[9-12]:

$$M_j(\Delta z, \omega) = \begin{pmatrix} \cos \delta_j & -\frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ -i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中 $j = A, B, D$ 分别代表各介质层。对介质层 A、B:

$$\delta_{A,B} = \frac{\omega}{c} n_{A,B}(0) \left\{ \cos \theta_i^{A,B} \cdot d_{A,B} + \sin \theta_i^{A,B} \int_0^{d_{A,B}} \frac{dz}{\sqrt{(1+k_{A,B}^2)[n_{A,B}(z)/n_{A,B}(0)]^2 - 1}} \right\}, \quad (6)$$

$$\eta_{A,B} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_{A,B}(0) \cos \theta_i^{A,B}, \quad (7)$$

式中 $k_{A,B} = \cot \theta_i^{A,B}$, $\cos \theta_i^{A,B} = \sqrt{1 - \frac{n_0^2}{n_{A,B}^2} \sin^2 \theta_i^0}$ 。

对缺陷层 D :

$$\delta_D = \frac{\omega}{c} n_D d_D \cos \theta_i^D, \quad (8)$$

$$\eta_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_D \cos \theta_i^D, \quad (9)$$

式中 $\cos \theta_i^D = \sqrt{1 - \frac{n_0^2}{n_D^2} \sin^2 \theta_i^0}$ 。

N 个周期光子晶体的特征方程为

$$M = M_1 M_2 \cdots M_N = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}, \quad (10)$$

该周期结构的透射系数 ($\theta_i^0 = 0$) 为^[9-12]

$$t = \frac{2\eta_0}{A\eta_0 + B\eta_0\eta_{N+1} + C + D\eta_{N+1}}, \quad (11)$$

透射率为

$$T = tt^*, \quad (12)$$

反射系数为

$$r = \frac{A\eta_0 + B\eta_0\eta_{N+1} - C - D\eta_{N+1}}{A\eta_0 + B\eta_0\eta_{N+1} + C + D\eta_{N+1}}, \quad (13)$$

反射率为

$$R = rr^*. \quad (14)$$

由于光子带隙的存在,对有限一维光子晶体可以引入复有效折射率^[3]

$$n_{\text{eff}}(\omega) = n(\omega) + i\kappa(\omega), \quad (15)$$

式中 $\text{Re}(n_{\text{eff}}) = n(\omega)$ 是描述介质的等效色散性质, $\text{Im}(n_{\text{eff}}) = \kappa(\omega)$ 表示介质的吸收,它们可由透射系数 $t(\omega) = \sqrt{T} \exp[i(\omega)\phi]$ 计算得到^[3]:

$$n(\omega) = \frac{c\phi(\omega)}{L\omega}, \quad (16)$$

和

$$\kappa(\omega) = -\frac{c}{2L\omega} \ln T(\omega), \quad (17)$$

式中 L 是该周期结构的总长度, c 是真空中光速, ω 是电磁波圆频率。

根据群速度的定义 $v_g = \frac{d\omega}{d\{ \omega[n(\omega)/c] \}}$, 可得透射波的群速度为

$$v_g = \frac{c}{n(\omega) + \omega \frac{dn(\omega)}{d\omega}}, \quad (18)$$

当 $dn(\omega)/d\omega > 0$ 时,说明该周期结构是正常色散,群速度小于相速度;当 $dn(\omega)/d\omega < 0$ 时,是反常色散,群速度可大于光速,在极端情形下甚至为负。

4 数值计算与分析

本节主要研究的是含缺陷层 D 的两个半有限一维 Sinc 函数型光子晶体组成的超晶格周期结构 $(BAB)_{10}D(BAB)_{10}$ 。在下面的计算中 A 介质层折射率为 $n_A(0) = 3.37$, B 介质层折射率为 $n_B(0) = 1.544$, (1)式和(2)式中其他参量取值分别为 $D_1 = 0.1, D_2 = 0.2, a = 48.3211 \text{ nm}, b = 17.9557 \text{ nm}$, 其中 A 介质层厚度是 $d_A = 15.1827 \text{ nm}$, B 介质层厚度是 $d_B = 33.1384 \text{ nm}$, 取归一化圆频率为 $\omega_s = 4.6026935 \times 10^{15} \text{ rad/s}$, 并令色散缺陷振子共振圆频率 $\omega_A = \omega_s$, 振子强度 $\Gamma = \gamma$, 缺陷层基底折射率 n_d 满足 $n_d d_D = \frac{\lambda_0}{2} = \frac{c\pi}{\omega_s}$ 。根据(3)式可以作出缺陷层线性极化率随圆频率的变化曲线, 如图 1 所示, 其中蓝色实线是其实部随归一化圆频率的变化曲线, 红色虚线是其虚部的变化曲线。由图(1)可知, 归一化圆频率 ω/ω_s 取值在 $0.95 \sim 1.05$ 范围内, 线性极化率虚部才不为零, 其色散特性存在; 其次, 在 $\omega = \omega_s$ 及其附近, 线性极化率实部和虚部均发生突变, 表明缺陷层 D 的色散特性在 $0.95\omega_s \sim 1.05\omega_s$ 狭窄频率范围内存在, 且在 $\omega = \omega_s$ 处其色散性有突变, 那么这个突变一定会对其周围的周期结构产生影响。为了考察缺陷层的色散对一维 Sinc 函数型光子晶体带隙的影响, 将含色散缺陷的与含无色散缺陷的及不含缺陷的 Sinc 函数型光子晶体的正入射透射谱进行比较, 如图 2 所示。图 2 中缺陷层的振子强度 $\Gamma = \gamma = 0.01\omega_0$, 图 2(a)中线性极化率 $\chi > 0$, 图 2(b)中线性极化率 $\chi = 0$, 这里的谐振频率为 $\omega_0 = \omega_s$, 基底折射率为 $n_d = 4$ 。从图 2 可知, 加入缺陷层 D 后可以获得非常宽的光子禁带, 当缺陷无色散时, 在谐振频率处及其附近出现了两个完全隧穿模; 当缺陷层引入色散后导致缺陷模偏离中心频率, 这主要是由于色散的引入导致缺陷的光学厚度是频率的函数, 缺陷模的谐振频率既依赖于缺陷的宽度, 又与色散特性有关^[8]。

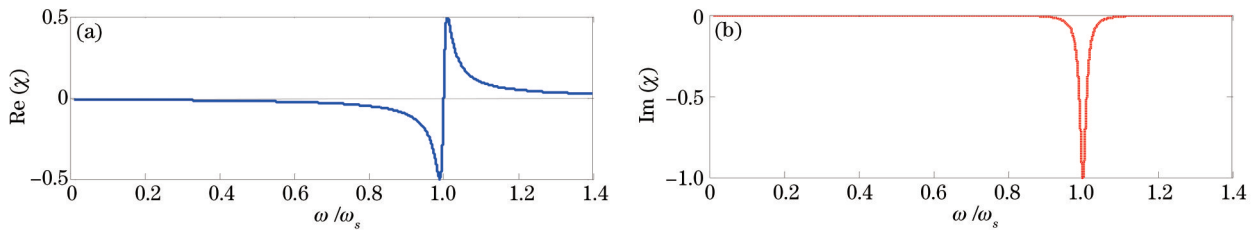


图 1 缺陷层的线性极化率随归一化圆频率变化曲线

Fig.1 Curves of the linear electric susceptibility of the defect layer with the normalized angular frequency

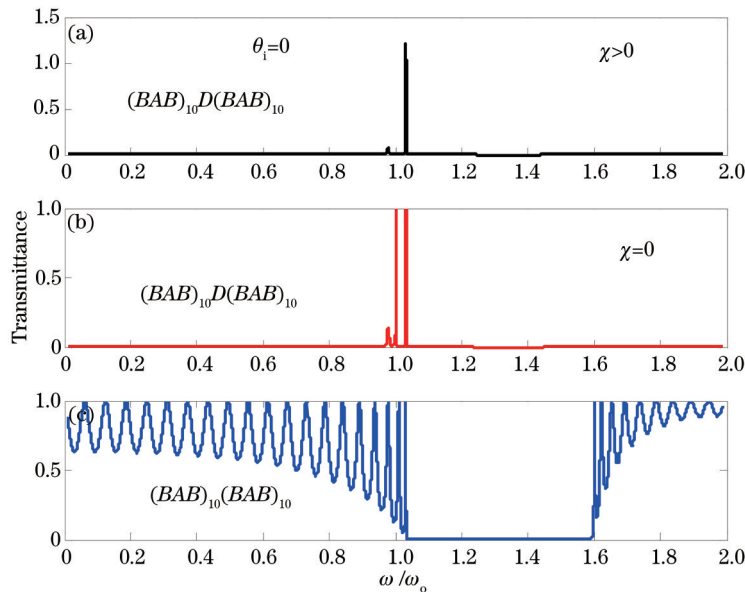


图 2 三种 Sinc 函数型光子晶体透射谱的比较。(a) 含色散缺陷的; (b) 含无色散缺陷的; (c) 无缺陷层的

Fig.2 Comparison of three transmission spectra of one-dimensional Sinc function photonic crystals. (a) With dispersive defect; (b) without dispersive defect; (c) without defect

为进一步考察缺陷层色散对该周期结构光子带隙的影响,主要分析中心频率 $\omega_0(=\omega_s)$ 附近 ($0.95\omega_s\sim 1.05\omega_s$) 缺陷模的变化。根据(3)式和(4)式可知,缺陷层对光子带隙的影响取决于振子强度 Γ 、基底折射率 n_D 、缺陷层位置以及光波入射角等,下面分别从这几个方面展开分析讨论。

4.1 振子强度 Γ 的影响

为了考察振子强度 Γ 对中心频率 $\omega_0(=\omega_s)$ 附近 ($0.95\omega_s\sim 1.05\omega_s$) 缺陷模的影响,计算得到了归一化缺陷模圆频率随归一化振子强度 Γ 变化的图形,如图3所示,图3中 ω_D 是缺陷模圆频率,除振子强度外其他参量同图2。从图3(a)和(b)中看到对于增益性缺陷层 ($\chi > 0$),随着振子强度 Γ 的增大,缺陷模频率在 $\Gamma \leq 0.01\omega_0$ 时蓝移,在 $\Gamma = 0.01\omega_0$ 时缺陷模圆频率取最大值,在 $\Gamma > 0.01\omega_0$ 发生红移,且缺陷模圆频率呈现跳跃性阶梯状,这些缺陷模透射率 $T > 1$ 且随振子强度 Γ 的增大而显著增大,由于缺陷层 D 的光学厚度是频率的函数,缺陷模的谐振频率既依赖于缺陷的宽度,又与色散特性有关, Γ 的增大既改变了缺陷层折射率,同时又使得缺陷模的频率发生阶跃式变化;其透射率大于1是因为缺陷层是色散增益性的,随着振子强度的增大,振子密度增大,电磁波通过时可以从抽运源吸收更多的能量而得到放大、增益;此时该周期结构的有效折射率虚部 $\text{Im}(n_{\text{eff}}) < 0$ [如图4(c)所示],介质吸收为负,所以缺陷和色散介质表现为增益。图3(c)和(d)计算了缺陷层是

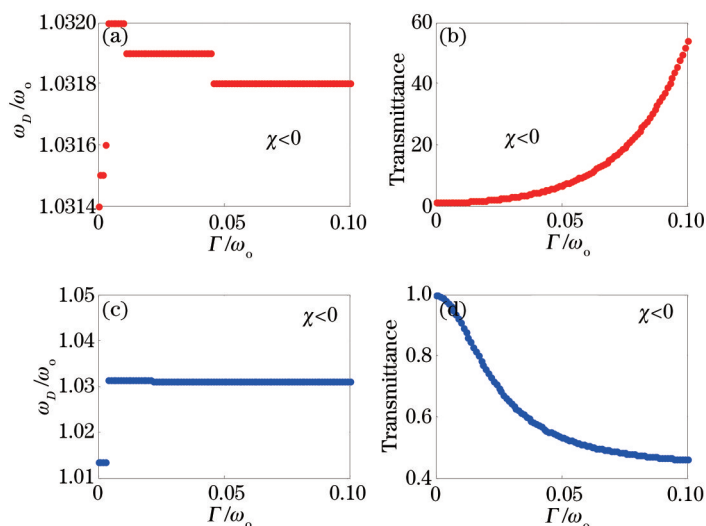


图3 含色散缺陷Sinc函数型光子晶体中振子强度对缺陷模圆频率及透射率调制趋势图

Fig.3 Trend graph of the normalized angular frequency and transmittance of the defect mode with the oscillator strength in one-dimensional Sinc function photonic crystals with dispersive defect

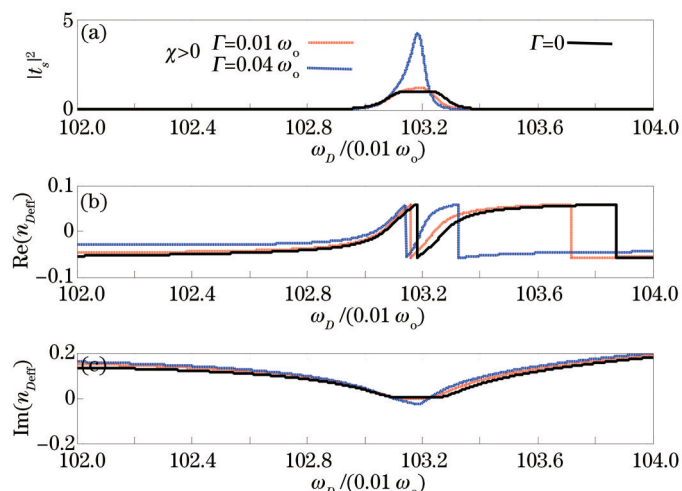


图4 含增益性色散缺陷Sinc函数型光子晶体随振子强度变化。(a)透射谱;(b)有效折射率实部;(c)有效折射率虚部

Fig.4 One-dimensional Sinc function photonic crystals with the gain dispersive defect with the oscillator strength.

(a) Transmission spectra; (b) real part of the effective refractive index; (c) imaginary part of the effective refractive index

吸收性色散介质 ($\chi < 0$) 时缺陷模圆频率和透射率随振子强度变化的趋势图,从图中可知,缺陷模频率随振子强度的增大同样发生位移,其透射率小于1且随之显著地减小。因为随着振子强度的增大,振子密度增大,当光波通过时被吸收的能量显著增多,光波衰减越厉害。从图 5(c)可知该周期结构有效折射率虚部 $\text{Im}(n_{\text{eff}}) > 0$ [如图 4(c)所示],介质吸收为正,所以缺陷和色散介质表现为吸收性。比较图 4(b)和图 5(b)可知,无论缺陷层是增益性还是吸收性介质,在缺陷模频率附近极窄范围内该周期结构的有效折射率实部随归一化圆频率变化曲线均有一个近乎垂直的斜率,根据(18)式可知,群速度 v_g 随着 $dn_{\text{eff}}/d\omega$ 的增大而减小,即在缺陷模频率附近群速度大大降低[如图 4(b)所示],光波被高度局域,此处的态密度将很大,所以群速度会很低。

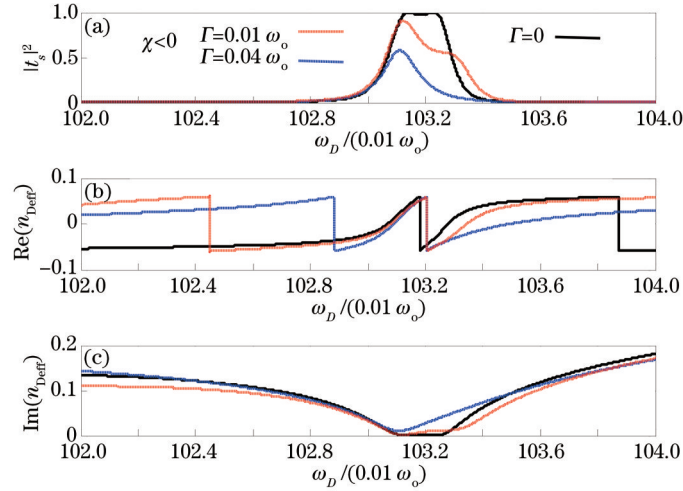


图 5 含吸收性色散缺陷 Sinc 函数型光子晶体随振子强度变化。(a) 透射谱; (b) 有效折射率实部; (c) 有效折射率虚部

Fig.5 One-dimensional Sinc function photonic crystals with the absorptive dispersive defect with the oscillator strength.

(a) Transmission spectra; (b) real part of the effective refractive index; (c) imaginary part of the effective refractive index

4.2 缺陷层基底折射率 n_D 的影响

缺陷层基底折射率 n_D 对缺陷模具有一定调制作用,下面的计算中使缺陷层基底折射率始终满足 $n_D d_D = \frac{\lambda_0}{4} = \frac{\pi c}{2\omega_0}$, 当缺陷层基底折射率改变时,其厚度也相应改变,以 $n_d = 4$ 为缺陷层折射率的归一化因子,即令 $n_D = \eta * n_d$, η 为倍率,其他参量同图 2,以 η 为横坐标、缺陷模归一化圆频率和透射率分别为纵坐标可以绘出二者间关系图形,如图 6 所示。从图 6(a)和(b)可知,对于含增益性色散缺陷层的周期结构,基底折射率

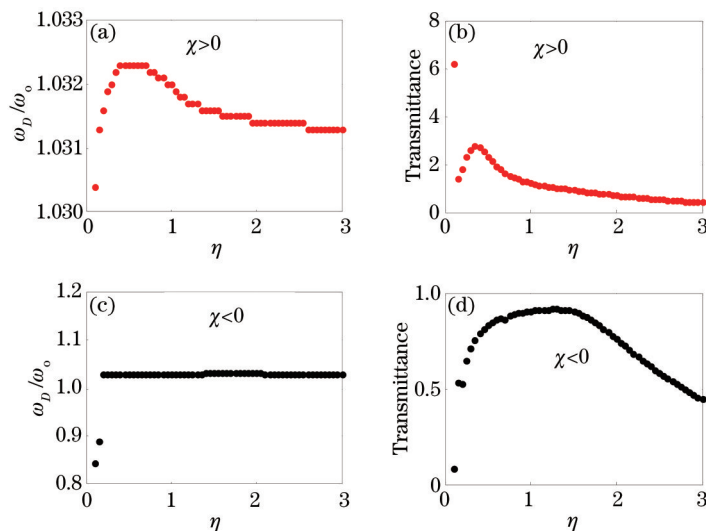


图 6 含色散缺陷 Sinc 函数型光子晶体中基底折射率对缺陷模调制趋势图

Fig.6 Trend graph of the normalized angular frequency of the defect mode with the substrate refractive index of one-dimensional Sinc function photonic crystals with dispersive defect

的增大,开始时使得缺陷模频率和透射率显著增大,随后不断减小。由于色散缺陷层的厚度不仅与基底折射率有关,而且还是频率的函数,在基底折射率始终满足 $n_b d_b = \frac{\lambda_0}{4} = \frac{\pi c}{2\omega_0}$ 的前提下,开始时缺陷层折射率较小对应厚度较大,此时缺陷模圆频率距离中心圆频率 ω_0 相对远一点,在基底折射率取值在 $0.4n_d \sim 0.7n_d$ 之间时,缺陷模圆频率取最大值 $\omega_b = 1.0323 \omega_0$,此后缺陷模发生红移,到 $n_b = 4$ 时,缺陷模频率红移到 $\omega_b = 1.032 \omega_0$,此后随着基底折射率的增大,缺陷层厚度相应减小使得缺陷模频率不断减小;缺陷模透射率随基底折射率增大而减小,可能是由于基底折射率的增大导致缺陷层光学厚度随之增大,破坏了共振透射的条件,使得透射率越来越小。将图 6(c)与(d)进行比较可知,吸收性色散缺陷模圆频率对基底折射率的变化不是特别敏感,但是其透射率的变化与增益性缺陷模类似。进一步计算还表明基底折射率对这两类缺陷模的色散特性的影响与前面振子强度的作用类似。

4.3 缺陷层位置对缺陷模的影响

从左向右数,缺陷层所在位置用其所在层序数表示。若以缺陷层所在层序数 N 为横坐标,分别以缺陷模的归一化圆频率和透射率为纵坐标,可以绘出缺陷层位置的变动对缺陷模的影响趋势图如图 7 所示,图中所有参量取值同图 2。由图 7 可知,两种类型色散缺陷层位置变动对缺陷模的圆频率和透射率的影响变化规律类似:当色散缺陷层位于周期结构中心层 ($N = 11$) 时,缺陷模频率最低,透射率最大,距离中心层越远缺陷模频率逐渐变大,而其透射率逐步减小。因此,可以通过调节缺陷层所在位置来获得所希望的缺陷模频率和透射率。

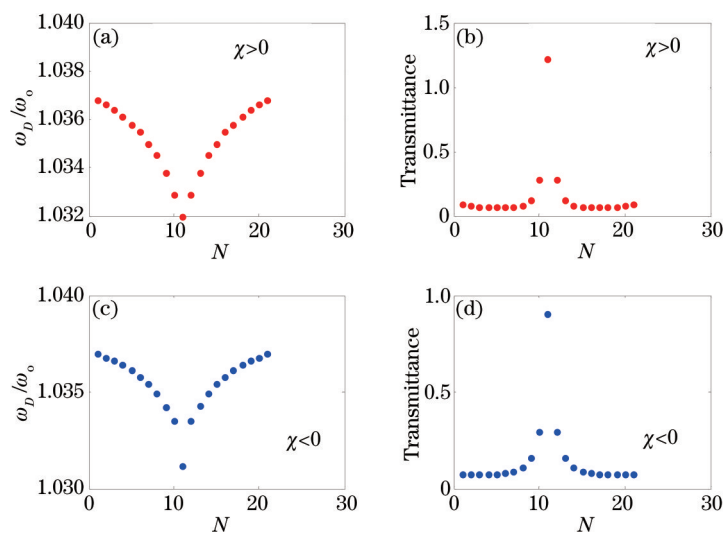


图 7 缺陷层位置变动对缺陷模影响趋势图

Fig.7 Trend graph of the normalized angular frequency of the defect mode with the position of the defect layer

4.4 入射角的影响

通常光子晶体的光子带隙对光波入射角十分敏感,这里的周期结构也不例外,如图 8 所示,图中除入射角,其他参量取值同图 2。从图 8(a)和(c)可知,色散缺陷模圆频率均随入射角增大而红移,其透射率变化规律不一样:对增益性缺陷模,其透射率在入射角为 $\pi/10$ ($\omega_b = 1.0156 \omega_0$) 时达到极大值 $T_{\max} = 2674.6$ 。对吸收性缺陷模其透射率在入射角为 $\pi/5$ ($\omega_b = 0.9671 \omega_0$) 时透射率出现第二个极大值,如图 8(d)所示。

由(3)式和(4)式可知,缺陷层色散还与中心圆频率 ω_0 有关,此时色散缺陷模变化规律比较复杂,限于篇幅,将在别处展开研究。

5 结 论

应用传输矩阵法及对色散缺陷层采用洛伦兹振子模型,研究了含色散缺陷 Sinc 函数型光子晶体 $(BAB)_m D(BAB)_m$ 的光子禁带和缺陷模。结果表明,加入缺陷层后可获得宽阔的光子禁带;缺陷层引入色散后在中心圆频率附近出现缺陷模,且缺陷模处出现反常色散;随着振子强度的增大,增益性缺陷模圆频率发生

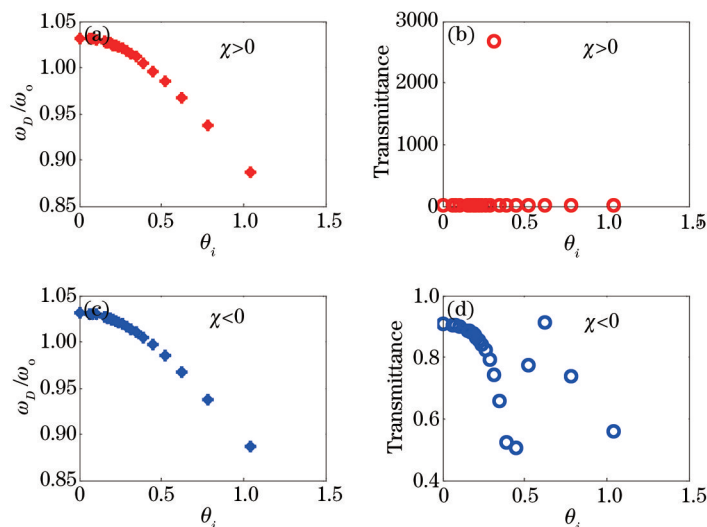


图8 含色散缺陷Sinc函数型光子晶体中入射角对缺陷模调制趋势图

Fig.8 Trend graph of the normalized angular frequency of the defect mode with the angle of incidence on one-dimensional Sinc function photonic crystals with dispersive defect

阶跃式移动,其透射率显著增大,而吸收性缺陷模的透射率显著减小,此时缺陷模处色散曲线有一个近乎垂直的斜率,此处的群速度将大大降低;增益性缺陷层基底折射率对缺陷模频率影响显著;缺陷层位于周期结构中心层时缺陷模频率最低、透射率最大。增大入射角使得缺陷模红移,增益性缺陷模在特殊入射角处透射率会出现千倍增益。

参 考 文 献

- 1 E Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(20): 2059-2062.
- 2 Zhu S Y, Liu N H, Zheng H, *et al.*. Time delay of light propagation through defect modes of one-dimensional photonic band-gap structures[J]. Opt Commun, 2000, 174(1-4): 139-144.
- 3 Hua L N, Yao Z S, Hong C, *et al.*. Superluminal pulse propagation through one-dimensional photonic crystals with a dispersive defect[J]. Phys Rev E, 2002, 65(4): 046607.
- 4 Centini M, Sibilia C, Scalora M, *et al.*. Dispersive properties of finite, one-dimensional photonic band-gap structures: Applications to nonlinear quadratic interactions[J]. Phys Rev E, 1999, 60(4): 4891-4898.
- 5 Fang Yuntuan, Shen Tingeng, 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.
- 6 Jiang Meiping, Wang Xudong, Chao Xiaogang, *et al.*. Band gap structure and filter properties of with quasiperiods one dimensional photonic crystals[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2005, 22(6): 884-888.
蒋美萍, 王旭东, 巢小刚, 等. 准周期结构一维光子晶体的带隙特性与滤波特性[J]. 量子电子学报, 2005, 22(6): 884-888.
- 7 Ouyang Zhengbiao, Zhu Jun, Li Jingzhen. Photonic bandgaps in photonic crystals with tapered periods at both ends[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(5): 612-615.
欧阳征标, 朱 俊, 李景镇. 两端有慢变结构的光子晶体的能带特性研究[J]. 光学学报, 2002, 22(5): 612-615.
- 8 Wang Hong, Ouyang Zhengbiao, Han Yanlin, *et al.*. Optical properties and mode tuning of defect modes in one-dimensional photonic crystal micro-cavity containing dispersive medium[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(5): 940-945.
王 宏, 欧阳征标, 韩艳玲, 等. 含色散介质的一维光子晶体微腔的光学特性和模式调节[J]. 光学学报, 2007, 27(5): 940-945.
- 9 Wu X Y, Zhang B J, Yang J H, *et al.*. Function photonic crystals[J]. Physica E, 2011, 43(9): 1694-1700.
- 10 Ba Nuo. Light transmission properties of one-dimensional function photonic crystals[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0606001.
巴 诺. 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.
- 11 Wang Guanghuai, Wang Qingcai, Wu Xiangyao, *et al.*. Research on one-dimensional function photonic crystals[J]. Acta Phys Sin, 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.
- 12 Wu X Y, Zhang B J, Yang J H, *et al.*. The characteristic of light transmission of function photonic crystals[J]. Physica E, 2012, 44(7): 1223-1229.
- 13 Wang Yun, Liu Dan, Liu Yong, *et al.*. Light transmission properties of one-dimensional Sinc function photonic crystals containing a dispersive defect layer with negative refractive index[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0406001.
- 王 筠,刘 丹,刘 勇,等.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[J].中国激光,2014,41(4):0406001.
- 14 Wang Yun. Tamm states bandgap of one-dimensional Sinc function photonic crystals[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(10): 101603.
- 王 筠.一维 Sinc 函数型光子晶体塔姆态的带隙研究[J].激光与光电子学进展,2014,51(10):101603.

栏目编辑:张浩佳