

双周期厚度调制的一维光子晶体的电磁模^{*}

周金苟^{1)B)} 杜桂强^{2)B)} 张亚文²⁾ 刘念华^{3)†}

¹⁾ 井冈山学院物理系, 吉安 343009)

²⁾ 哈尔滨工业大学威海校区应用物理系, 威海 264209)

³⁾ 南昌大学物理系, 南昌 330047)

(2004 年 7 月 15 日收到, 2005 年 1 月 24 日收到修改稿)

计算了厚度调制的双周期一维光子晶体的能带. 当一维光子晶体的厚度被周期性地调制时, 原来的能带分裂为许多子能带, 其中一些很窄的子能带进入了原来的单周期光子晶体的带隙内. 这些窄带内的电磁模的场强具有双周期性分布的特点, 并有较强的局域性. 在较宽的子能带中的电磁模是扩展的.

关键词: 光子晶体, 双周期, 电磁模

PACC: 4270Q, 4220, 4110H

1. 引言

介电常数周期分布的光子晶体由于具有与半导体中的电子态类似的带隙结构^[1]而成为近年来理论研究与应用研究的热点, 特别是一维光子晶体由于其结构简单且易于制备而备受关注. 在一维光子晶体中, 人们通过改变光子晶体的结构(如介电常数、厚度等)以及在光子晶体中引入缺陷、非线性、色散物质等方法^[2-7], 可以对光的传播进行调控. 近来, 人们对双周期光子晶体进行了研究, 发现了不同于一般光子晶体的一些特性^[8-10]. 文献[11]研究了双周期介电函数调制的一维光子晶体, 发现其中含有很窄的子能带, 与之对应的电场强度有强局域化的特点.

我们注意到一维光子晶体的能带与跨越原胞的相移周期性有关, 在每一个周期中相移的大小同时与介电函数和厚度有关. 在实际的一维光子晶体的制备中, 调制各层的厚度比调制各层的介电函数更容易实现. 因此我们对构成一维光子晶体的两介质层之一进行周期性厚度调制, 发现在光子能带中同样存在光强的强局域特性, 并存在许多子能带, 其频率位置可随厚度调制的强弱变化. 在很窄的子能带中的光强呈现局域化分布, 并具有双周期性的特点. 而较宽的子能带中电磁模对应的场强是扩展的. 这

种复杂的双周期厚度调制的一维光子晶体更容易制作. 通过选择合适的结构和材料, 可以制作具有与双周期介电函数调制的一维光子晶体类似性质的器件.

2. 双周期厚度调制光子晶体的理论模型

考虑两种介质层 A 和 B 沿 z 轴方向交替排列构成的一维光子晶体, 两种介质的折射率分别为 n_A 和 n_B , 厚度分别为 d_A 和 d_B , 其空间周期为 $d_1 = d_A + d_B$. 若介质层 A 的厚度被另一个空间周期为 d_2 的周期函数所调制, 并有 $md_1 = d_2$ (这里 m 为整数, $d_1 < d_2$) 则我们可得到一个双周期光子晶体, 如图 1 所示.

在这样的调制下, 介质层 A 的厚度可表示为

$$d_A(m, i) = d_A(1 + \alpha \cos 2\pi i/m), \quad (1)$$

式中 $i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 是介质层 A 的顺序编号, 第 0 号的 A 层左端可取为坐标 z 的原点, m 是一个调制参量, α 描述调制的强弱.

考虑光波沿 z 轴方向传播, 引入两分量的波函数描述电磁场

$$\chi = \begin{pmatrix} E \\ icB \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中 E 和 B 分别表示光子晶体任一点的电场强

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60268001)和江西省自然科学基金(批准号: 0312004)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: nhliu@ncu.edu.cn



图1 双周期光子晶体中 A 的厚度变化 图中为一个周期 取 $m = 15, \alpha = 0.7$, A 层的厚度由(1)式调制

度和磁感应强度, c 为真空中的光速. 采用传输矩阵方法^[14, 6, 7], 在任一层内沿 z 方向 ($z + \Delta z$) 处和 z 处的场可以通过一个传输矩阵联系起来, 可表示为

$$\chi(z + \Delta z) = M_{\mu}(\Delta z)\chi(z), \quad (3)$$

式中传输矩阵 $M_{\mu}(\Delta z)$ 可表示为

$$M_{\mu}(\Delta z) = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\omega}{c}n_{\mu}\Delta z\right) & -\frac{1}{n_{\mu}}\sin\left(\frac{\omega}{c}n_{\mu}\Delta z\right) \\ n_{\mu}\sin\left(\frac{\omega}{c}n_{\mu}\Delta z\right) & \cos\left(\frac{\omega}{c}n_{\mu}\Delta z\right) \end{pmatrix} \quad (\mu = A, B), \quad (4)$$

式中 ω 为入射光频率. 于是从 $z = 0$ 处的电磁场出发, 应用传输矩阵方法可求出任一位置处的电磁场.

为了计算该双周期光子晶体的色散关系, 我们考虑厚度的周期变化. 介质层 A 和与其相邻的介质层 B 为调制前单周期光子晶体的一个基本单元(简单原胞). 在厚度调制下, 该双周期结构的基本单元是由相邻的 m 个不同的简单原胞构成的一个复式原胞. 此复式原胞就是对应双周期厚度调制的一维光子晶体的最小周期.

设连接一个复式原胞两端波函数的传输矩阵为 $X(\omega)$,

$$X(\omega) = \prod_{i=1}^m M(d_B, \omega)M(d_i, \omega), \quad (5)$$

则该双周期结构的能带, 即频率与布洛赫(Bloch)波数的色散关系为

$$\cos KL = \frac{1}{2} \text{Tr}X(\omega), \quad (6)$$

式中 K 为布洛赫波数, L 为原胞的长度,

$$L = \sum_{i=1}^m (d_i + d_B). \quad (7)$$

由(7)式我们可以确定该双周期结构的能带.

3. 结果和讨论

本文中, 我们取介质层 A 和 B 的介电常数分别

为 $\epsilon_A = 8.0$ 和 $\epsilon_B = 1.0$, 其中 $n_{\mu} = \sqrt{\epsilon_{\mu}}$ ($\mu = A, B$). $n_A d_A = n_B d_B = \lambda_0/4$ (λ_0 为 $1/4$ 波堆截止带中心频率对应的波长, 对应的频率 $\omega_0 = 2\pi c/\lambda_0$). 取 $m = 15$, 即每个复式原胞中含有 15 个由相邻的 A 层和 B 层构成的简单原胞.

先考虑参量 α 取不同值时的能带结构, 图 2 给出了对 A 层进行厚度调制的能带随 α 的变化. 当 $\alpha = 0$ 时, 光子晶体的能带与由 AB 作为简单原胞的单周期光子晶体能带相同. 当 $\alpha \neq 0$ 时, 光子晶体变成厚度调制的双周期光子晶体, 原来的能带分裂为许多子能带. 我们看到, 随调制深度 α 的增加, 一些很窄的子能带进入了以 AB 作为原胞的简单光子晶体的带隙内部. 位于这些子能带内的电磁模其光强分布呈现双周期的特征, 如图 3(a) 所示, 图中电磁模式的频率 $\omega/\omega_0 = 0.681634$, 复式原胞取为 321 个.

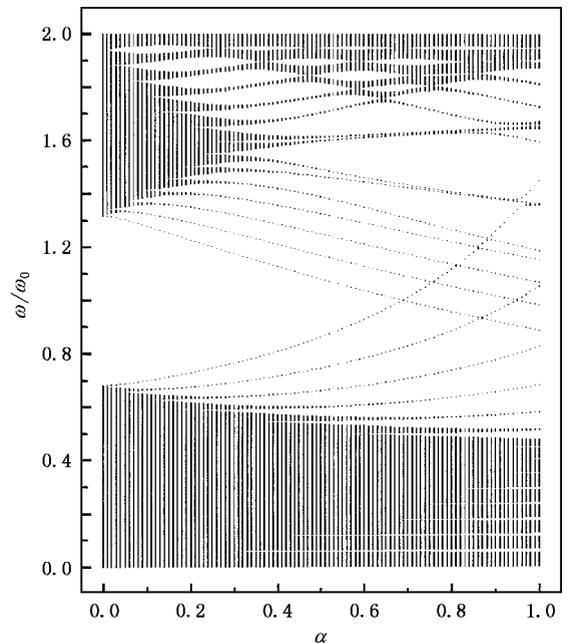


图2 介质 A 的厚度变化为 $d'_A(m, i) = d_A(1 + \alpha \cos 2\pi i/m)$ 的双周期光子晶体的能带随 α 的变化 $m = 15$, 介质 B 的厚度不变

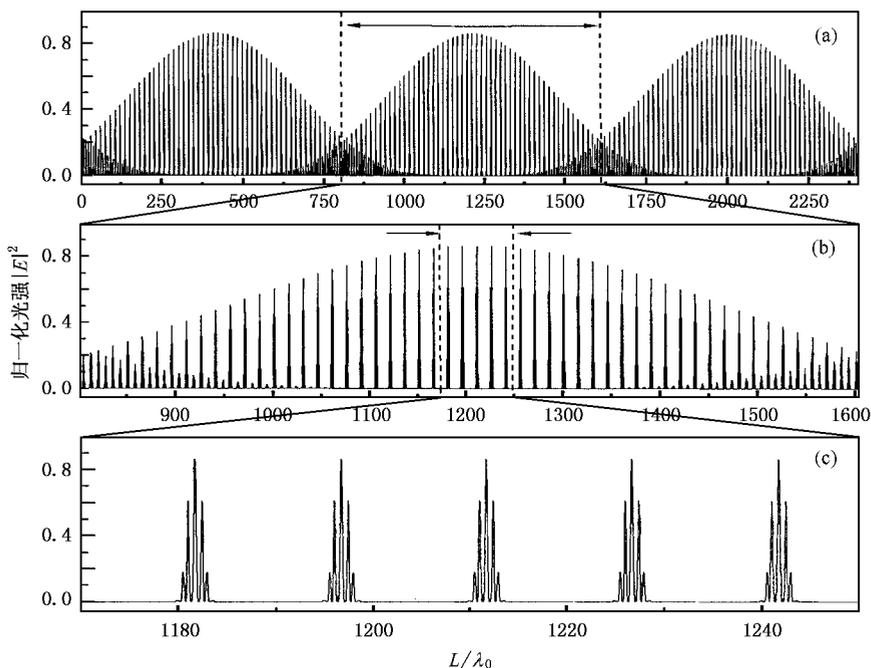


图3 $\omega/\omega_0 = 0.681634$ 时对应的光强 $|E|^2$ 沿 z 方向的分布 L/λ_0 代表多层膜体系的光学厚度, $\alpha = 1$.
(b) 图是 (a) 图选定区域的放大图 (c) 图是 (b) 图选定区域的放大图

宏观上, 这种类型的波函数是扩展的. 微观上, 将图的位置标度放大以后, 我们发现其光强分布是局域化的, 如图 3(b)(c) 所示, 其中光强已经归一化. 我们看到随 α 的增加, 子能带下降或者上升. 当 α 比较大时得到的子能带是振荡变化的, 并且在某些 α 值处相邻的子能带出现简并的特点.

在较宽的子能带内部, 光强分布是扩展的, 我们选择 $\omega/\omega_0 = 0.27$ 的模式计算了光强分布, 如图 4 所

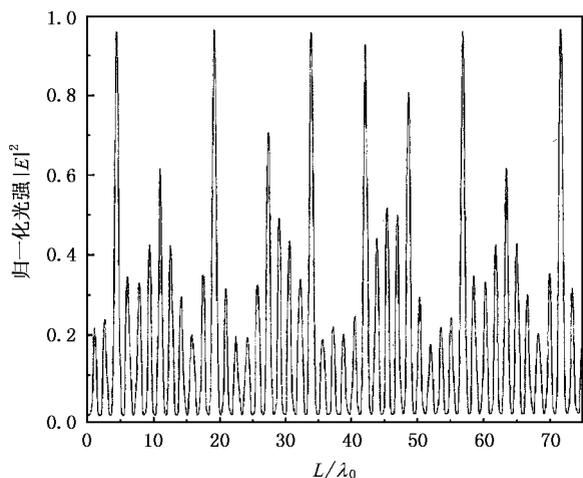


图4 $\omega/\omega_0 = 0.27$ 时对应光强 $|E|^2$ 沿 z 方向的分布 L/λ_0 代表多层膜体系的光学厚度, $\alpha = 1$

示, 其中复式原胞取为 10 个, 并且光强已经归一化.

按照群速度定义 $v_g = \frac{d\omega}{dk}$ 可知, 它由色散关系曲线的斜率确定. 在很窄的子能带中, 色散曲线的斜率非常小, 所以 v_g 非常小. 因此, 频率(或能量)落在子能带范围内的光在通过双周期光子晶体传播时群速度很小. 能量在该范围内的光子因而具有很强的局域性.

4. 结 论

本文研究了厚度调制的双周期一维光子晶体的能带结构. 这种复杂的光子晶体的能带由许多子能带构成, 它们是由单周期的一维光子晶体的能带分裂形成的. 子能带的数目与光子晶体的最小周期中含有的 AB 基本单元数相同. 随调制深度 α 的增加, 一些很窄的子能带向单一周期的光子晶体的带隙内部延伸. 落在窄带内的电磁模具有较强的局域性, 且具有双周期性. 较宽的子能带内对应频率的光强是扩展的. 这种复杂的一维光子晶体比介电函数周期性改变的光子晶体更容易制作, 通过选择合适的结构和材料, 可以实现调控光的传播.

- [1] Wang H , Li Y P 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2172 (in Chinese) 王 辉、李永平 2001 物理学报 **50** 2172]
- [2] Liu N H , Fu J W 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1418 (in Chinese) 刘 念华、傅继武 2003 物理学报 **52** 1418]
- [3] Yu T B , Liu N H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3049 (in Chinese) 于 天宝、刘念华 2004 物理学报 **53** 3049]
- [4] Liu N H 1997 *Phys. Rev. B* **55** 4097
- [5] Liu N H , Zhu S Y , Chen H 2001 *Phys. Rev. B* **64** 165105
- [6] Liu N H , Zhu S Y , Chen H *et al* 2002 *Phys. Rev. E* **65** 046607
- [7] Du G Q , Liu N H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1095 (in Chinese) 杜 桂强、刘念华 2004 物理学报 **53** 1095]
- [8] Konotop V V , Kuzniak V 2002 *Phys. Rev. B* **66** 235208
- [9] Bristow A D , Whittaker D M , Astratov V N *et al* 2003 *Phys. Rev. B* **68** 033303
- [10] Qin Q , Lu H , Zhu S N *et al* 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 4654
- [11] Shimada R , Koda T , Ueta T *et al* 2001 *J. Appl. Phys.* **90** 39054

Electromagnetic modes of thickness-modulated dual-periodic one-dimensional photonic crystals *

Zhou Jin-Gou^{1, B)} Du Gui-Qiang^{2, B)} Zhang Ya-Wen²⁾ Liu Nian-Hua^{3, †}

¹⁾ *Department of Physics , Juggangshan University , Ji'an 343009 , China)*

²⁾ *Department of Applied Physics , Harbin Institute of Technology at Weihai , Weihai 264209 , China)*

³⁾ *Department of Physics , Nanchang University , Nanchang 330047 , China)*

(Received 15 July 2004 ; revised manuscript received 24 January 2005)

Abstract

We have studied the photonic band of dual-periodic one-dimensional (1D) photonic crystals. The band splits into many sub-bands when we modulate periodically the thickness of the unit of the 1D photonic crystal. Some narrow bands appear in the gap of the simple photonic crystal with single-period. The field of the electromagnetic modes in the split bands exhibits dual-periodicity. The modes in the narrow bands are localized , but those in the wider bands are extended.

Keywords : photonic crystal , dual-period , electromagnetic mode

PACC : 4270Q , 4220 , 4110H

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60268001) and the Natural Science Foundation of Jiangxi Province , China (Grant No. 0312004).

† Corresponding author. E-mail : nhliu@ncu.edu.cn