

文章编号: 1001-3806(2009)04-0403-03

## 缺陷层厚度对1维光子晶体孪生缺陷模的影响

王吉科<sup>1</sup>, 夏海燕<sup>2</sup>, 闫珂柱<sup>1\*</sup>, 姜迎迎<sup>1</sup>

(1. 曲阜师范大学 物理工程学院, 曲阜 273165; 2. 济宁学院 物理系, 曲阜 273155)

**摘要:** 为了研究由1维特定掺杂光子晶体生成的孪生缺陷模与缺陷层厚度的关系, 采用特征矩阵的方法进行了理论分析。结果表明, 当整体改变这种缺陷层厚度时, 孪生缺陷模低频和高频模位置的变化情况各不相同; 当仅改变缺陷层的正折射率材料的厚度时, 随着厚度增加, 孪生缺陷模红移; 当仅改变缺陷层负折射率材料的厚度时, 随着厚度增加, 缺陷模蓝移; 并且孪生缺陷模透射率的变化也很复杂。这一结果为设计有特殊用途的光子晶体器件提供了理论依据。

**关键词:** 物理光学; 光子晶体; 特征矩阵; 孪生缺陷模

**中图分类号:** O436 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.04.020

## Effect of thickness of defect layer on dual defect modes of 1-D photonic crystal

WANG Ji-ke<sup>1</sup>, XIA Hai-yan<sup>2</sup>, YAN Ke-zhu<sup>1</sup>, JIANG Ying-ying<sup>1</sup>

(1. College of Physics and Engineering, Qufu Normal University, Qufu 273165, China; 2. Department of Physics, Jining University, Qufu 273155, China)

**Abstract:** With the eigen matrix method, it analysed the relation between dual defect modes and the thickness of the defect layer in 1-D photonic crystal was analyzed. The results showed that when the thickness of the defect layer was changed totally, the position of dual defect modes at low frequencies was different from that at high frequencies. When the thickness of the material with positive refractive index was solely increased, the position of dual defect layers was red-shifted. On the contrary, the position was blue-shifted when the thickness of the material with positive refractive index was solely increased. The transmissivity of dual defect modes changed intricately. The property can be used to design some specific photonic devices.

**Key words:** physical optics; photonic crystal; eigen matrix; dual defect mode

### 引言

光子晶体<sup>[1-2]</sup>自1987年提出以来, 经历了20年头的蓬勃发展, 目前已经成为光电子学科中一个占有重要地位的研究领域。所谓光子晶体, 就是一种人造的周期性电介质结构, 具有一定光子带隙。目前对其研究相当广泛, 光子晶体特性<sup>[3-5]</sup>和光子晶体器件<sup>[6-8]</sup>的研究都在不断创新中蓬勃发展。

光子晶体按结构分类, 可分为1维、2维和3维光子晶体。由于1维光子晶体结构的简单和制造的可行性, 使得自光子晶体被提出, 对其研究就一直不曾间断过。尤其负折射率材料的提出, 使得1维光子晶体也具有了完全带隙<sup>[9-10]</sup>, 因此, 对其研究再度出现新的高潮。同时, 也出现了一些对光子晶体缺陷层的研究论文, DONG等人<sup>[11]</sup>研究了中间掺杂、两边对称的1维光子晶体结构, 发现当缺陷层为正折射率材料时, 光子

带隙中缺陷态的频移方向随缺陷层厚度的增加而红移; 当缺陷层材料是负折射率材料时, 频移方向刚好相反, 表现为蓝移。SHI等人<sup>[12]</sup>则研究了在正负折射率材料交替组成的1维光子晶体中引入正折射率材料缺陷, 发现随缺陷层的厚度增加, 缺陷模个数增加的现象。XU等人<sup>[8]</sup>则研究了一种新型的双色谱振腔, 发现缺陷层厚度增加, 可使左右缺陷模波长增大。

作者自行设计了一种含特定缺陷的晶体结构, 并用特征矩阵理论进行了研究, 发现光垂直入射至此晶体结构会产生孪生缺陷模, 且随缺陷层厚度变化缺陷模随之发生相应的变化。

### 1 晶体结构和特征矩阵理论<sup>[13]</sup>

作者设计了这样的结构:  $(AB)^N(CD)(AB)^N$ 。其中,  $N$ 为晶体周期数, 材料A和B为正折射率材料, 即所谓的正常折射率材料, 其折射率和厚度分别为 $n_A, d_A$ 和 $n_B, d_B$ 。正折射率材料C和负折射率D组成缺陷层, 折射率和厚度分别为 $n_C, d_C$ 和 $n_D, d_D$ , 那么缺陷层的厚度 $d = d_C + d_D$ 。为了计算和取值的方便, 在本文中, 取 $n_A d_A = n_B d_B = \lambda_0/4$ ,  $\lambda_0$ 是材料第1带隙的中

作者简介: 王吉科(1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事1维光子晶体理论方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: yankezhu@126.com

收稿日期: 2008-05-05; 收到修改稿日期: 2008-07-04

心波长。并把此晶体放置在空气中,只考虑光垂直入射的情况。

对于由 A 和 B 两层介质组成的一个基本周期单元来说,其特征矩阵为:

$$M = \begin{bmatrix} \cos\delta_A & i\eta_A^{-1}\sin\delta_A \\ i\eta_A\sin\delta_A & \cos\delta_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\delta_B & i\eta_B^{-1}\sin\delta_B \\ i\eta_B\sin\delta_B & \cos\delta_B \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,相位厚度  $\delta_j = \frac{\pi}{2} \cdot g, g = \frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{\omega}{\omega_0}$  ( $\lambda$  和  $\lambda_0$  是入射光波长和材料第 1 带隙中心波长,表示孪生缺陷模的位置; $\omega$  和  $\omega_0$  是入射光波频率和材料第 1 带隙中心频率),有效导纳  $\eta_j = n_j, j$  为 A, B, C, D, 代表所取介质。

对于缺陷层有类似的结构:

$$Q = \begin{bmatrix} \cos\delta_C & i\eta_C^{-1}\sin\delta_C \\ i\eta_C\sin\delta_C & \cos\delta_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\delta_D & -i\eta_D^{-1}\sin\delta_D \\ -i\eta_D\sin\delta_D & \cos\delta_D \end{bmatrix} \quad (2)$$

这里,特征矩阵方法对负折射率材料 D 仍然适用,只须取其折射率为负值即可。

那么对于整个光子晶体,其特征矩阵为:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = M^N Q M^N \quad (3)$$

$$t = \frac{2}{a_{11} + a_{12} + a_{21} + a_{22}} \quad (4)$$

$$T = t \cdot t^* \quad (5)$$

式中,  $a_{pq}$  为矩阵元,  $t$  为透射系数,  $t^*$  为透射系数  $t$  的复共轭函数。

## 2 数值模拟

在本文中,选择材料 A 和 B 分别为氟化镁和硫化镁,其折射率分别为  $n_A = 1.38$  和  $n_B = 2.38$ ,晶体周期数  $N = 5$ 。缺陷层材料 C 和 D 的折射率为  $n_C = 4$  和  $n_D = -1$ 。对于缺陷层厚度,取  $n_C d_C = -n_D d_D = \frac{\lambda_0}{4} x$ 。  $x$  为缺陷层厚度系数,当  $x$  增加时,由于折射率不变,缺陷层的厚度亦会随之增加。

### 2.1 缺陷层整体变化时的孪生缺陷模响应

首先,把缺陷层材料 C 和 D 看作一个整体,即零平均折射率材料(就是在由正负折射率材料组成的 1 维光子晶体的一个周期中,满足  $n_+ d_+ + n_- d_- = 0$ )。同时改变材料 C 和 D 的厚度,而保持  $n_C d_C + n_D d_D = 0$ ,取下列一组不同的值分别计算: $x = 0.5; x = 1.0; x = 1.5; x = 2.0$ 。计算结果如图 1 所示。

由图 1 可知,随着缺陷层厚度的增加,孪生缺陷模

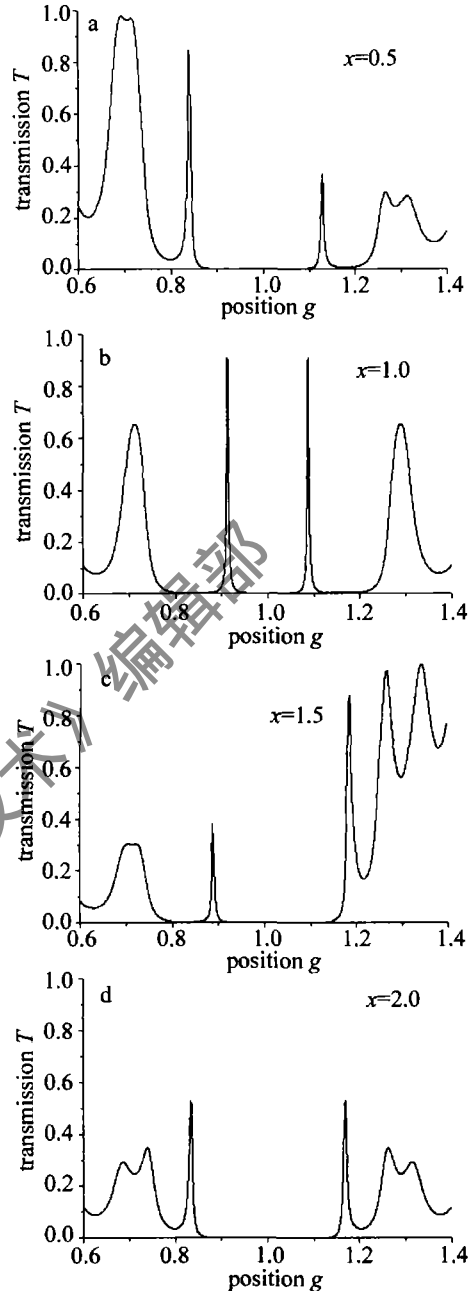


Fig. 1 Denoting the transmission spectrum when defect layer's thickness  $x$  is 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 respectively

的透射率也随之发生了变化,图 1a ~ 图 1d 4 幅图中分别给出了 4 种情况:低频缺陷模全透而高频半透;低频和高频缺陷模都全透;低频缺陷模半透而高频全透;低频和高频缺陷模都半透;孪生缺陷模的位置也发生了移动,其大体的变化趋势先是向中心靠拢,随后又远离中心位置。但是,由于所选缺陷层厚度间隔较大,孪生缺陷模位置和透射率的具体变化规律从上面 4 图中并不容易归纳得出。

为了能够清晰地观察到孪生缺陷模随缺陷层厚度增加所发生的变化,分别就缺陷层厚度变化对孪生缺陷模的位置和透射率的影响做具体分析,见图 2。

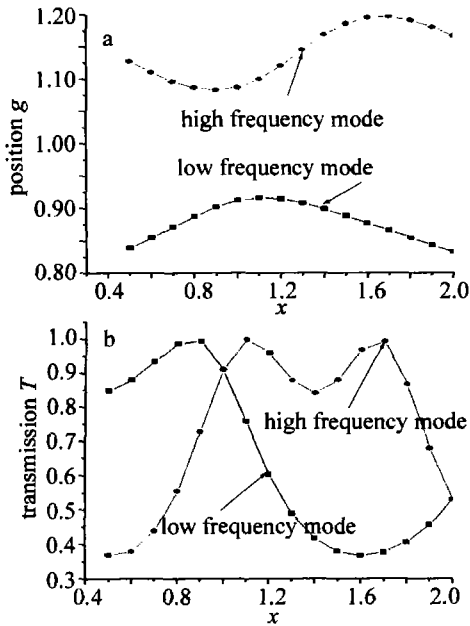


Fig. 2 Influence of the thickness of defect layer on the position and the transmission of dual defect modes

### 2.2 缺陷层单材料变化时的孪生缺陷模响应

现在不再把缺陷层看成一个整体,即不再把缺陷层看成零平均折射率材料,而是把缺陷层看成由两种介质(正折射率材料 C 和负折射率材料 D)共同构成。逐一改变材料 C 和 D 的厚度,发现基频带隙处的孪生缺陷模仍然存在,而且其对缺陷层厚度的响应曲线有新的变化。绘出了孪生缺陷模随材料 C 和 D 厚度变化的响应曲线,如图 3 和图 4 所示。

由图 3 可知,当仅改变缺陷层中材料 C 的厚度时,可以发现随着材料 C 的厚度增加,孪生缺陷模发生红移,而其透射率的响应曲线虽然比较复杂,但是变化范围并不大。

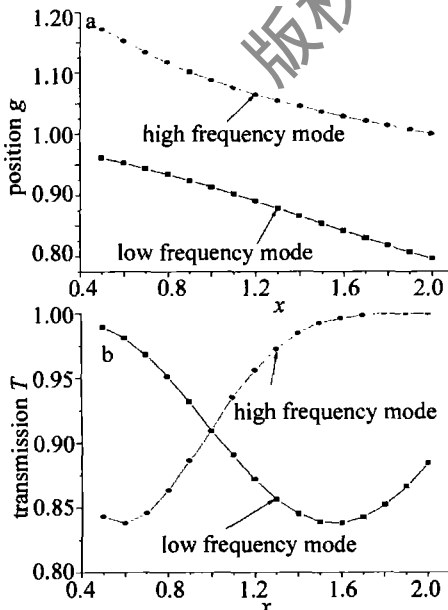


Fig. 3 Response curve of the dual defect modes versus the thickness of the material C

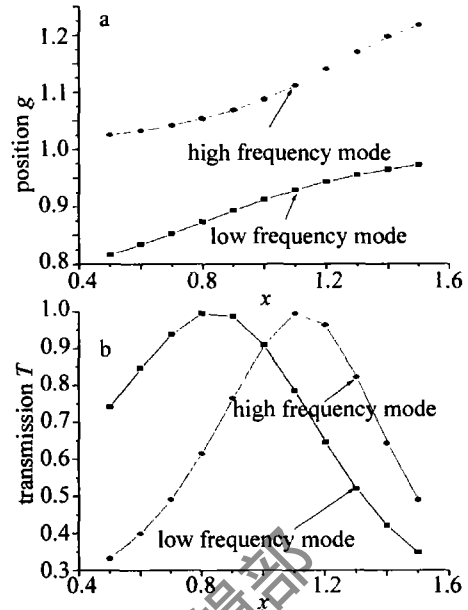


Fig. 4 Response curve of the dual defect modes versus the thickness of the material D

由图 4 可知,当仅改变缺陷层中材料 D 的厚度时,可以发现随着材料 D 厚度的增加,孪生缺陷模发生蓝移,而其透射率的响应曲线不仅复杂,变化范围也相当大,在  $x$  值从 0.5 到 1.5 的变化范围内,透射率却在 0.3 到 1 之间振荡。

### 3 结论

当把缺陷层作为一个整体考虑,即零平均折射率材料时,发现随着缺陷层厚度的增加,缺陷模位置不再是简单的红移或者蓝移,而是变得复杂:低频位置的缺陷模随着缺陷层厚度的增加其位置先向中心靠拢后又远离,图像类似于山丘状;而高频位置的缺陷模随着缺陷层厚度的增加其位置变化更加复杂,变化图像类似于负的正弦函数图像。孪生缺陷模的透射率也发生了变化,低频处的缺陷模的透射率变化曲线类似一正弦函数,而高频处的缺陷模透射率变化曲线则似一马鞍状。而当不再把缺陷层看成一个整体,即不再把缺陷层看成零平均折射率材料,而是把缺陷层看成由两种介质(正折射率材料 C 和负折射率材料 D)共同构成,仅改变正折射率材料 C 的厚度时,随着厚度增加,孪生缺陷模红移;仅改变负折射率材料 D 的厚度时,随着厚度增加,缺陷模蓝移。并且这两种情况下,缺陷模透射率的变化也很复杂。利用这一特性,再参照缺陷层的折射率对孪生缺陷模的影响,可以设计峰值和位置都不同的双色谐振腔,作为某些特殊应用。

当然,这种缺陷模随缺陷层厚度变化关系的理论阐释在本文中并没有给出,还需进一步的研究。

4d可以看出,利用提出的方法可以有效地消除数字全息再现光场中的0级衍射和共轭像,提高再现像的信噪比。由于计算时选取的全息图是任意的,即使不对压电陶瓷进行标定,也可通过计算相移量,然后再现达到去除干扰的目的,与传统的4步相移算法相比,省略了标定相移器这一复杂过程,使该算法能更好的应用于实际,扩展了相移技术的应用范围。

## 5 结论

在理论分析的基础上,推导了基于任意相移量的4步相移数字全息图的光场表达式,提出了一种利用相位相减计算任意相移量的新方法。实验结果表明,采用本文中提出的办法,即使在不标定相移器的情况下,通过相位相减法计算任意相移量,再现后也能有效地消除数字全息再现光场中的0级衍射和共轭像,提高再现像的信噪比,与传统的4步相移算法相比,应用范围更广泛,同时测量系统也更简单。

### 参考文献

- [1] GOODMAN J W, LAWRENCE R W. Digital image formulation from electronically detected hologram [J]. A P L, 1967, 11(3): 77-79.
- [2] WANG H Y, WANG D Y, XIE J J, *et al.* Study of the reconstructing methods of the digital off-axis lens-less Fourier transform hologram [J]. Laser Technology, 2007, 31(3): 288-290 (in Chinese).
- [3] DEMOLI N, DEMOLI I. Measuring surface vibrations of musical instruments using an inexpensive digital holography device [J]. Opt Engng, 2005, 44(9): 090502/1-090502/3.
- [4] LAI S C, NEIFELD M A. Digital wavefront reconstruction and its application to image encryption [J]. Opt Commun, 2000, 178(6): 283-289.
- [5] KREIS T, ADAMS M, JUPTNER W. Digital in-line holography in particle measurement [J]. SPIE, 1999, 3744: 54-64.
- [6] KIM D, JAVIDI B. 3-D object recognition using single exposure on-line digital holography [J]. SPIE, 2006, 6027: 1-7.
- [7] YAMAGUCHI I, KATO J I, OHTA S, *et al.* Image formation in phase-shifting digital holography [J]. Proc SPIE, 2000, 4101: 330-338.
- [8] YANY F J, HE X Y. Two-step phase-shifting fringe projection profilometry: intensity derivative approach [J]. Appl Opt, 2007, 46(29): 7172-7178.
- [9] HUANG P S, ZHANG S. Fast three-step phase-shifting algorithm [J]. Appl Opt, 2006, 45(21): 5086-5091.
- [10] WANG H J, WANG Zh, ZHAO H, *et al.* Research on effects of phase error in phase-shifting interferometer [J]. SPIE, 2007, 6723: 1-6.
- [11] QIAN K, WU X P. Theoretical analysis of stoilov algorithm in phase shifting interferometry [J]. Optical Technique, 2001, 27(1): 13-16 (in Chinese).
- [12] LÜ X X, ZHANG Y M, ZHONG L Y, *et al.* Analysis and experiment of phase-shifting coaxial lensless Fourier digital holography [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(11): 1511-1515 (in Chinese).
- [13] LUO Y L, LÜ X X, ZHU X, *et al.* Real-time high accuracy phase-shifting calibrating method based on one-dimensional spatial digital correlation [J]. Journal of Chinese Lasers, 2005, 32(8): 1117-1122 (in Chinese).
- [14] ZHONG L Y, ZHANG Y M, LÜ X X, *et al.* Some quantitative analysis about digital holographic reconstructed image [J]. Journal of Chinese Lasers, 2004, 31(5): 570-574 (in Chinese).
- [15] YUAN C J, ZHONG L Y, WANG Y P, *et al.* The analysis of off-axis digital holographic recording conditions [J]. Laser Technology, 2004, 28(5): 482-484 (in Chinese).
- [16] YU M W. Optical holography and its application [M]. Beijing: Beijing University of Science and Technology Press, 1996: 74-84 (in Chinese).
- [17] KREIS T. Digital holographic interference-phase measurement using the Fourier-transform method [J]. J O S A, 1986, A3(6): 847-855.
- [18] LI J S, ZHOU L, CHAN C T, *et al.* Photonic band gap from a stack of positive and negative index materials [J]. Phys Rev Lett, 2003, 90(8): 083901-083904.
- [19] JIANG H T, CHEN H, LI H Q, *et al.* Omnidirectional gap and defect mode of one-dimensional photonic crystals containing negative-index materials [J]. A P L, 2003, 83(26): 5386-5388.
- [20] DONG J W, CHEN Y H, WANG H Zh. Dispersion and localization of defect state in one-dimensional photonic crystal consisting of metamaterials [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(1): 268-273 (in Chinese).
- [21] SHI Zh H, GENG J G, YAN K Zh. Defect mode of one-dimensional photonic crystals containing negative refraction materials [J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2007, 13(2): 129-133 (in Chinese).
- [22] WANG H, LI Y P. An eigen matrix method for obtaining the band structure of photonic crystals [J]. Acta Physica Sinica, 2001, 50(11): 2172-2178 (in Chinese).
- [23] XU G W, OUYANG Zh B. A new double-wavelength photonic crystal resonator [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(3): 429-433 (in Chinese).
- [24] YABLONVICHE E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059-2061.
- [25] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [26] QI J X, WEN Sh Ch. Research of optical properties of one-dimension photonic crystals constructed by positive-negative refractive materials [J]. Laser Technology, 2006, 30(5): 504-506 (in Chinese).
- [27] JIN Y, HUANG Zh Y, CHEN X F, *et al.* Study on polarization properties of the photonic crystal defect mode [J]. Laser Technology, 2007, 31(3): 277-280 (in Chinese).
- [28] TANG B Sh, SHEN T G. Study on transmission property of two-dimension doped photonic crystals with triangular lattices [J]. Laser Technology, 2006, 30(5): 526-528 (in Chinese).
- [29] YUAN Z H, LU X D, HUANG J. Theoretical study of reflective phase compensator made of photonic crystal [J]. Laser Technology, 2006, 30(5): 476-478 (in Chinese).
- [30] WANG Y H, TANG L, NI Zh W, *et al.* The defect mode and bistability in the nonlinear Bragg microcavity composed of one-dimension photonic crystal [J]. Laser Technology, 2006, 30(5): 462-464 (in Chinese).

(上接第405页)

### 参考文献