

文章编号: 1001-3806(2007)03-0277-04

光子晶体缺陷模的偏振特性研究

金 钰¹, 黄正逸¹, 陈宪锋¹, 唐 丽¹, 是度芳^{1,2}

(1. 江苏工业学院 信息科学系, 常州 213016 2 华中科技大学 物理系, 武汉 430074)

摘要: 为了解光波在一维光子晶体的传输特性, 利用传输矩阵方法进行了数值模拟, 并研究了缺陷层厚度对缺陷模偏振特性的影响。结果表明, 入射角的变化对光子晶体的禁带及缺陷模影响较大, 它们都随入射角的增大向高频(短波)方向移动, s 偏振的禁带宽度逐渐增宽而 p 偏振的禁带宽度变化不明显, p 偏振的缺陷模频移较 s 偏振的稍大。随着入射角的增大, s 偏振的缺陷模越来越细, 品质因子逐渐增大, 而 p 偏振的缺陷模变化趋势则刚好相反。

关键词: 物理光学; 光子晶体; 传输矩阵; 缺陷模; 偏振态

中图分类号: O734 文献标识码: A

Study on polarization properties of the photonic crystal defect mode

JIN Yi¹, HUANG Zheng-yi¹, CHEN Xian-feng¹, TANG Li¹, SHI Du-fang^{1,2}

(1. Department of Information Science, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213016, China 2. Department of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract The transfer matrix method was used to simulate the transmission characteristics of 1-D photonic crystal. Furthermore, it was also studied how the defect layer thickness affects the defect mode polarization properties. The results show that the variance of incident angle had significant influence on the forbidden band and defect mode of 1-D photonic crystal, both of which shifted in the direction of high frequency (low wavelength) with the incident angle increasing. The forbidden band width of s polarization increased gradually but that of p polarization changed little. The defect mode frequency of p polarization shifted a little more than that of s polarization. When the incident angle increased, the defect mode of s polarization became narrower and more and its quality factor increases gradually, nevertheless, the defect mode of p polarization changes the other way round.

Key words physical optics; photonic crystal; transfer matrix; defect mode; polarization state

引 言

光子晶体是由介电常数(或折射率)周期性变化排布的材料, 其最根本的特征是具有光子带隙, 落在带隙中的电磁波被禁止传播。光子晶体的这一特性使得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、全向反射镜、光子晶体滤波器、光子晶体偏振器等^[1-5]。在光子晶体中引入缺陷, 可使光子局域化。利用掺杂光子晶体来抑制或增强自发辐射, 可以制造高效率 and 零阈值的激光器、高品质的激光谐振腔、以及高效发光二极管等^[6-8]。特别是缺陷层为非线性介质时, 还可以使系统产生非线性响应, 如出现双稳态、多稳态及光学限制等特性^[9, 10]。因此, 有必要了解缺陷层对光子晶体能带结构的影响, 了解缺陷模的有关特性, 这对光子晶体的制作和应用很有帮助。

有缺陷层一维光子晶体的缺陷模特性, 目前已有的一些相关的报道^[11-15], 但大都集中于光波垂直入射的情形。在此, 作者利用传输矩阵^[16]方法, 来研究光波斜入射情况下不同偏振态的缺陷模特性的变化规律。

1 模型与计算方法

带缺陷的一维光子晶体是由两种折射率分别为 n_1 和 n_2 的不同材料 A, B 交替排列构成, 把中间的 A 层设计为缺陷层 D。缺陷层 D 的折射率为 n , 厚度为 d , 其两侧的周期单元 (AB 或 BA) 数为 N , 每个周期单元中各介质层均为 $\lambda_0/4$ 片, 即 $n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda_0/4$, λ_0 为中心波长。该一维光子晶体的结构简写为 $(AB)^N D (BA)^N$ 。

当光波入射到光子晶体时, 可以利用传输矩阵来进行 s 偏振光及 p 偏振光的透射研究。每一个介质层的特征矩阵为^[16]:

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos\delta & (-i\eta_j) \sin\delta \\ -i\eta_j \sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, 相位厚度 $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \cos\theta_j$, 有效光学导纳 $\eta_j =$

作者简介: 金 钰 (1965-), 男, 讲师, 主要从事物理教学和光学材料方面的研究。

E-mail: jiny@163.com

收稿日期: 2006-04-05; 收到修改稿日期: 2006-05-29

$\sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot n_j \cos\theta_j$ (s 偏振光时) 或 $\eta_j = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot \frac{n_j}{\cos\theta_j}$ (p 偏振光时), 而 θ_j 为介质 j 中光线的折射角。

整个一维光子晶体的总传输矩阵为:

$$M = (M_A M_B)^N M_D (M_B M_A)^N = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \quad (2)$$

光子晶体的透射率为:

$$T = \frac{4\eta_0\eta_g}{|\eta_0 a + \eta_0\eta_g b + c + \eta_g d|^2} \quad (3)$$

式中, η_0, η_g 为光子晶体两外侧介质的有效光学导纳。

2 计算与分析

利用上述方法研究了一维光子晶体 $(AB)^N D (BA)^N$ 的透射特性。计算中的有关参数设计为: $n_1 = 2.40, n_2 = 1.38, n = 2.40, d_1 = 0.156 \mu\text{m}, d_2 = 0.272 \mu\text{m}, d = 0.313 \mu\text{m}, \lambda_0 = 1.50 \mu\text{m}$, 晶体外侧为空气 $n_0 = 1$, 此时缺陷层的光学厚度为 $\lambda_0/2$ 。

研究发现, 当光波正入射到光子晶体上时 s 偏振光与 p 偏振光的传播特性是一致的。但随着入射角 θ_0 的改变, s 偏振与 p 偏振的传播特性出现了差异。

2.1 禁带结构与缺陷模

图 1 中绘出了不同入射角时光子晶体透射谱的三维图。其中图 1a 是 s 偏振的透射谱, 而图 1b 则对应

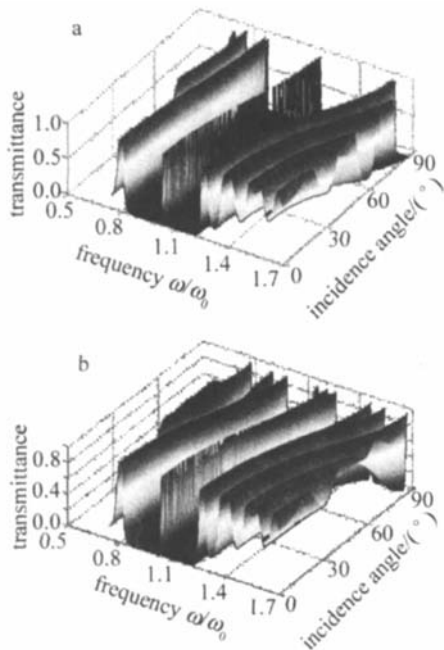
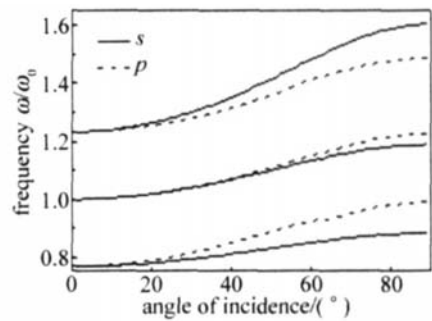


Fig 1 Transmission spectra of 1-D photonic crystal
a— s polarization b— p polarization

于 p 偏振光。从图中可以看出, 随着入射角的增大, 禁带中心位置均向高频 (短波) 方向移动, 且 s 偏振的禁带逐渐增宽而 p 偏振的禁带变化不明显。位于禁带中的缺陷模, 其频率在光垂直入射时正好等于中心频率

$\omega_0 = 1.257 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$, 但斜入射时随着入射角的增大亦向高频方向移动。

为了清晰看出 s 偏振与 p 偏振的传播特性差异, 图 2 中给出了缺陷模和带边共振峰频率随入射角 θ_0



的变化。图 2 中实线和虚线分别代表 s 偏振光和 p 偏振光, 中间的曲线代表缺陷模频率, 上下两条曲线则为禁带的两带边共振峰频率, 它们之间的间隔即为光子晶体的禁带区域。从图 2 可以看出, 垂直入射时, 禁带宽度为 $0.464\omega_0$; 当入射角接近 90° (掠入射) 时, s 偏振光的禁带宽度为 $0.721\omega_0$, 而 p 偏振光的禁带宽度为 $0.496\omega_0$ 。可见入射角对 s 偏振光禁带结构的调制更加明显。

在图 2 中入射角对缺陷模的调制, 当入射角 $\theta_0 < 50^\circ$ 时, s 偏振与 p 偏振的缺陷模频率的差异较小, 但超过 50° 后, p 偏振的缺陷模频率移动较大, 不同性质的偏振光将逐渐分开。利用这一特性可制成选偏器。例如对于频率为 $\omega = 1.17\omega_0$ 的入射光, 可以旋转光子晶体以改变入射角, 当 $\theta_0 = 65^\circ$ 时, 透出光为 p 偏振光, 而当 $\theta_0 = 75^\circ$ 时, 透出光则为 s 偏振光。

2.2 缺陷模的线宽与品质因子

从图 1 发现, 入射角对 s 偏振或 p 偏振的缺陷模调制的作用不同, 除了频移速率不同外, 缺陷模线宽的变化亦不同。随着入射角的增大, s 偏振的缺陷模越来越细, 而 p 偏振的缺陷模则逐渐变宽。图 1a 中 s 偏振缺陷模的变化规律看起来不太光滑, 出现一些毛刺, 这是由于谱线较细, 作图时选取点的间隔不够小的缘故。

图 3 中给出了缺陷模的半峰全宽 (full width half

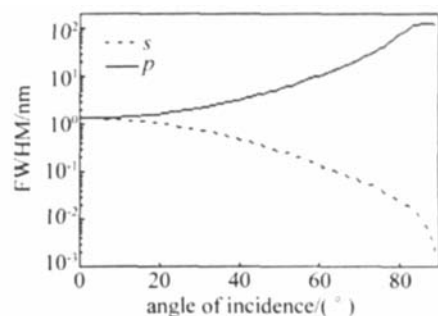


Fig 3 Effects of the incident angle on the defect mode width

maximum, FWHM) 随入射角的变化关系。顺便提一下, 图 1b 中当入射角 $\theta_0 > 85^\circ$ 时, p 偏振展宽的缺陷模开始出现分岔, 劈裂为 3 个纹波小峰, 图 2 中缺陷模的频率为中间小峰的频率, 而图 3 中的谱线宽度则为整个展宽带的线宽。从图 3 可以发现, 入射角对缺陷模线宽的调制非常明显。如果入射角超过 60° , s 偏振的缺陷模线宽可以降低一个数量级, 而 p 偏振的缺陷模线宽将提高一个数量级。

定义缺陷模的品质因子 $Q = \lambda_c / \Delta\lambda$ 其中 λ_c 为缺陷模的波长, $\Delta\lambda$ 为该缺陷模的线宽 FWHM。入射角对缺陷模品质因子的影响见图 4。随着入射角的增

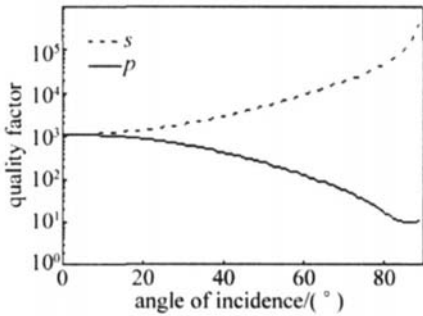


Fig 4 Effects of the incident angle on the quality factor of the defect mode

大, s 偏振的缺陷模品质因子越来越大, 而 p 偏振的缺陷模品质因子则逐渐变小。

利用文献 [14] 中的理论, 图 3 中两曲线的交汇点, 即光波垂直入射时的 FWHM 为:

$$\Delta\lambda = \frac{4\lambda_0}{\pi} \frac{1}{\frac{n}{n_0} \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^{2N} + \frac{n_1 + n_2}{n_0} \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^N} \quad (4)$$

式中, $U_N(x)$ 为第二类切比雪夫 (Chebyshev) 多项式, 宗量 $x = \frac{1}{2} \left(\frac{n_1}{n_2} + \frac{n_2}{n_1} \right)$ 。代入数据可得 $\Delta\lambda = 1.34\text{nm}$, 相应的品质因子 (图 4 中曲线的交汇点) 为 $Q = 1120$ 。如果考虑到介质对光波的吸收和散射, 则图 4 中 s 偏振的缺陷模品质因子随入射角的变化没有这么高。

2.3 缺陷层厚度的影响

缺陷层性质的不同, 诸如折射率、层厚等的变化, 将导致缺陷模的性质发生变化。通过研究发现, 这两个因素的变化, 实际上主要改变了缺陷层的光学厚度, 它们对缺陷模的影响相类似。为了说明缺陷层性质不同对缺陷模特性的影响, 仅以层厚变化来阐述。

图 5 中给出了入射光以 $\theta_0 = 30^\circ$ 入射, 缺陷层的厚度 d 发生变化时缺陷模位置的变化规律。图 5 中, 当厚度 $d = \frac{\lambda_0}{4n} \times 1$ 时光子晶体实际上是一个不带缺陷的完美晶体, 禁带中不会出现缺陷模。但随着层厚 d 的增大, 缺陷模逐渐从高频端出现, 并向低频端移动; 当

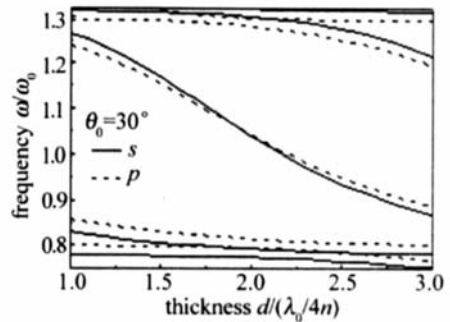


Fig 5 Effects of defect layer thickness on the defect mode

某一级的缺陷模在低频端消失时, 高一级的缺陷模又从高频端出现, 并按相同的规律变化。这一规律类似于正入射的情况 [11, 14, 15], 所不同的是, 斜入射时 s 偏振与 p 偏振的缺陷模移动速率有所差异, 这一差异随着入射角的增大而增大。在图 5 中很明显看出了这一趋势, s 偏振缺陷模的移动速率大于 p 偏振的。

层厚变化除了对缺陷模的位置产生影响外, 对缺陷模的线宽和品质因子也将产生影响。图 6 中给出了

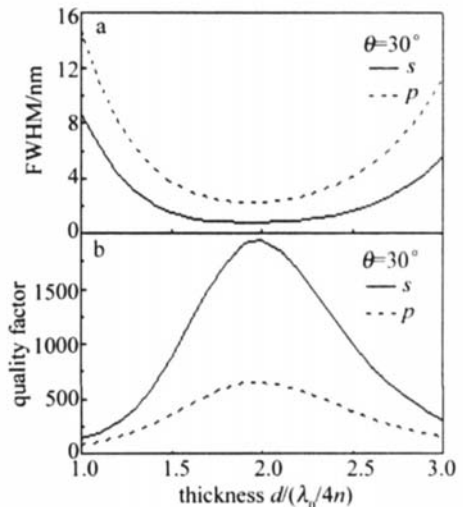


Fig 6 Effects of defect layer thickness on the defect mode
a—linewidth b—quality factor

层厚不同时缺陷模的谱线宽度和品质因子的变化规律, 光波的入射角为 30° 。从图中清晰显示当 $d = \lambda_0 / 4n \times 2$ 即缺陷层的光学厚度为 $\lambda_0 / 2$ 时, 缺陷模的谱线最细, 相应的品质因子最高, 这一规律同样类似于正入射的情形 [11, 15]。众所周知, 缺陷模的品质因子 Q 与缺陷模在缺陷层中的最大局域电场成正比 [15]。品质因子 Q 越高, 缺陷层中的贮能就越大, 如果缺陷层为非线性介质, 将有较强的非线性效应出现。

3 结 论

研究了一维光子晶体的缺陷模特性, 发现当缺陷层的光学厚度为 $1/2$ 波长时, 缺陷模的谱线最细, 品质因子最高。随着缺陷层厚度的增加, 禁带中的缺陷模逐渐向低频 (长波) 方向移动, s 偏振的缺陷模比 p 偏振的移

动速率大,这一现象随着入射角的增大越趋明显。

同时研究了不同入射角对光子晶体传输特性的影响。随着入射角的增大,禁带区域及禁带中的缺陷模均向高频(短波)方向移动, s 偏振的禁带逐渐增宽而 p 偏振的禁带变化不明显;禁带中 p 偏振的缺陷模频率较 s 偏振的移动大。此外随着入射角的增大, s 偏振的缺陷模越来越细,而 p 偏振的缺陷模则逐渐变宽;相应的 s 偏振的缺陷模品质因子越来越大,而 p 偏振的缺陷模品质因子则逐渐变小。

参 考 文 献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys Rev Lett* 1987, 58(20): 2059~2062
- [2] PAN Y, ZHANG J, HU G. Photonic crystal fiber and laser [J]. *Laser Technology* 2004, 28(1): 48~51 (in Chinese).
- [3] FINK Y, WANN JN, FAN S *et al*. A dielectric omnidirectional reflector [J]. *Science* 1998, 282(5394): 1679~1682
- [4] GUPTA S, TUTTLE G. Infrared filters using metallic photonic band gap structures on flexible substrate [J]. *Appl Phys Lett* 1997, 71(17): 2412~2414
- [5] DENG K, SHI D, JIANG M *et al*. Progress in the study of photonic crystal [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* 2004, 21(5): 555~564 (in Chinese).
- [6] YAKOYAMA H, NISHIKI K, ANAN T *et al*. Controlling spontaneous emission and thresholdless laser oscillation with optical microcavities [J]. *Opt & Quant Electron*, 1992, 24(2): 245~275.

- [7] VILLENUEVE P R, FAN S, JOANNOPOULOS J D. Microcavities in photonic crystals: mode symmetry, tunability, and coupling efficiency [J]. *Phys Rev* 1996, B54(11): 7837~7842
- [8] FAN S, VILLENUEVE P R, JOANNOPOULOS J D *et al*. High extraction efficiency of spontaneous emission from slabs of photonic crystals [J]. *Phys Rev Lett* 1997, 78(17): 3294~3297
- [9] LIDORILIS E, BUSCH K, LIQ M *et al*. Optical nonlinear response of a single nonlinear dielectric layer sandwiched between two linear dielectric structure [J]. *Phys Rev* 1997, B56(23): 15090~15099
- [10] JOHN S, AKOZBEK N. Nonlinear optical solitary waves in a photonic band gap [J]. *Phys Rev Lett* 1993, 71(8): 1168~1171
- [11] STANLEY R P, HOUDRE R, OESTERLE U *et al*. Impurity modes in one-dimensional periodic systems: the transition from photonic band gaps to microcavities [J]. *Phys Rev* 1993, A48(3): 2246~2250.
- [12] TSAI Y C, SHUNG K W K, GOU S C. Impurity modes in one-dimensional photonic crystals: analytic approach [J]. *Journal of Modern Optics* 1998, 45(10): 2147~2157.
- [13] XU G, OUYANG Z, AN H *et al*. Investigation on the bandwidth and quality factor of the defect mode in a photonic crystal with a defect [J]. *Acta Photonica Sinica* 2003, 32(9): 1079~1082 (in Chinese).
- [14] CHEN X, SHEN X, JIANG M *et al*. Studies on the defect mode properties of 1-D photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica* 2005, 34(12): 1876~1880 (in Chinese).
- [15] SHEN X, CHEN X, JIANG M *et al*. Effects of quasiperiodicity on photonic crystal defect modes [J]. *Optoelectronics Letters* 2006, 2(4): 292~294
- [16] JIANG M, JIANG X, SHEN X *et al*. Study on the polarization property of 1-D photonic crystals [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* 2005, 22(4): 612~616 (in Chinese).

(上接第 267 页)

其衍射结构的周期为 $2\mu\text{m}$ 。将理论计算结果与实验测量结果进行比较,两者吻合较好,这说明了改进后的模型用于分析肌肉组织光透射特性的正确性和有效性。

3 结 论

作者在实验上测量了远场条件下鸡肌肉组织的光透射特性,并拍摄到了 0 级~2 级清晰的衍射条纹。在理论上,以折射率分布为基础考虑约化入射强度的衍射效应,对辐射传输理论进行了修正。修正后的辐射传输理论不但能直观地给出肌肉组织切片衍射和散射的成因——组织内折射率分布的空间周期性和亚微米尺度上的不均匀性,而且在实验条件下的计算结果与实验的一致性较好。本文中的研究工作对于认识光在生物组织内的传输规律,以及建立统一的组织光传输理论具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] TUCHN V V. Reviews of topic problems——light scattering study tissues [J]. *Physics* 1997, 40(5): 495~515
- [2] CHARLES L M, NATALIE C, LENOREM *et al*. Three-dimensional tumor location in thick tissue with the use of diffuse photon-density waves [J]. *Appl Opt* 1998, 36(1): 214~220
- [3] BACKMAN V, WALLACE M B, PERELMAN L T *et al*. Detection of

preinvasive cancer cells——early warning changes in precancerous epithelial cells can now be spotted in situ [J]. *Nature* 2000, 406(6791): 35~36

- [4] SHIMARU A. Wave propagation and scattering in random media [M]. New York: Academic, 1978. 1~320
- [5] WANG L H. Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues [D]. Houston: University of Texas, 1992. 1~113.
- [6] LI Zh H, LAI J Ch, WANG Zh D *et al*. The application of impulse response function in Monte Carlo simulation of light distribution in biological tissues [J]. *Laser Technology* 2001, 25(4): 263~268 (in Chinese).
- [7] LAI J Ch, LI Zh H, HEA Zh An improved computing method for analyzing the spatial resolved reflectance from biological tissues [J]. *Chinese Physics Letters* 2003, 20(12): 2158~2160 (in Chinese).
- [8] DURIAN D J, RUDNICK J. Photon migration at short times and distances and in cases of strong absorption [J]. *JOSA* 1997, A14(1): 235~245.
- [9] LI Zh H, MA Ch G, LAI J Ch *et al*. Theoretical and experimental research on light transmitting property of biological tissues [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology* 2001, 25(3): 273~278 (in Chinese).
- [10] KIENLE A, LILGE L, PATTERSON M S *et al*. Spatially resolved absolute diffuse reflectance measurements for noninvasive determination of the optical scattering and absorption coefficients of biological tissue [J]. *Appl Opt* 1996, 35(13): 2304~2314.
- [11] XU X, ZHANG Zh X, ZANG H. The mechanism and detection of laser muscle diffraction [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser* 1989, 8(4): 208~210 (in Chinese).