

文章编号: 1001-3806(2009)03-0266-03

## 杂质吸收对1维光子晶体孪生缺陷模的影响

王吉科, 闫珂柱\*, 姜迎迎

(曲阜师范大学 物理工程学院, 曲阜 273165)

**摘要:** 为了研究在1维光子晶体中掺杂具有吸收的零平均折射率材料而产生的孪生缺陷模特性, 采用特征矩阵的方法进行了理论分析。结果表明, 随着消光系数的变大, 会使孪生缺陷模透射率先变大后变小, 当其取某一特定值时, 高低频缺陷模会出现最大值, 但不能同时出现; 具有吸收特性的介质在缺陷层中的位置不同, 会改变孪生缺陷模透射率的响应曲线。这一结果对开发光子晶体新的应用有重要意义。

**关键词:** 物理光学; 光子晶体; 特征矩阵; 孪生缺陷模; 消光系数; 增益

**中图分类号:** O436 **文献标识码:** A

## Effect of impurity absorption on 1-D photonic crystal dual defect modes

WANG Ji-ke, YAN Ke-zhu, JIANG Ying-ying

(College of Physics and Engineering, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

**Abstract:** The property of dual defect modes, induced by one-dimension photonic crystals containing absorbing defect layer with zero average refractivity, was studied based on the eigen matrix. The results show the transmissivity of dual defect modes varied with the extinction coefficient, and the transmissivity at high or low frequency defect mode became maximum as the extinction coefficient reached a certain value. However, the transmissivity at high or low defect frequency mode could not reached maximum value at the same time. In addition, the position of absorbing material might affect the response curve of dual defect modes. The conclusion will play an important impact on the application of photonic crystals.

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

### 引言

所谓光子晶体<sup>[1-2]</sup>, 就是折射率周期性变化的人造晶体。由于它具有全新的控制光子传播的机理, 一经提出就引起了广泛的关注。研究发现它具有和电子在半导体中传播的相似性质, 因此挪用了有关半导体的一些概念和理论。现在对光子晶体的研究相当广泛, 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。从光子晶体的构造分类, 可以分为1维, 2维和3维光子晶体。由于1维光子晶体结构上的简单和制造上的可行性, 对其的研究较之2维和3维光子晶体而言都要深入和广泛。

现在由于负折射率材料的发现, 使1维光子晶体的研究再度出现火热的局面。LI和JIANG等人<sup>[9-10]</sup>研究了由正负折射率材料组合在一起而形成的一种新

型光子晶体, 称之为零平均折射率光子晶体, 其带隙不受周期尺寸与无序的影响, 也几乎不随入射角的变化而变化, 即能实现全角带隙。所谓零平均折射率, 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 $n_+d_+ + n_-d_- = 0$  ( $n$ 为折射率,  $d$ 为厚度)。作者在前面的工作中曾把满足零平均折射率的这样一个复合材料看作一个整体, 称之为零平均折射率材料, 把它作为缺陷层引入1维光子晶体中, 产生了孪生缺陷模, 但是其透射率有一定的损耗。

SHI等人<sup>[11]</sup>研究了由正折射率材料和负折射率材料交替组成的1维光子晶体中引入有吸收的缺陷层时的光学传输特性, 发现随插层厚度的增大和吸收特性的增强, 缺陷模式并没有出现, 而是表现为对透射峰的明显增益; LIU<sup>[12-13]</sup>研究了吸收对光子晶体能带结构的影响以及对由正常折射率材料组成的1维掺杂光子晶体缺陷模的影响。

作者以前面工作中所设计的晶体结构为蓝本, 把缺陷层变为有吸收的介质, 考察了随着有吸收的介质在缺陷层中的位置和消光系数大小的变化孪生缺陷模所表现出来的特殊性质。

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: yankezu@126.com

收稿日期: 2008-03-16; 收到修改稿日期: 2008-04-30

### 1 晶体结构和特征矩阵理论<sup>[14]</sup>

设计了这样的晶体结构： $(AB)^N(CD)(AB)^N$ 。其中，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 $n_B, d_B$ 。材料C和D组成缺陷层，即零平均折射率材料，折射率和厚度分别为 $n_C, d_C$ 和 $n_D, d_D$ 。为了计算和取值的方便，文中取 $n_A d_A = n_B d_B = \lambda_0/4, n_C d_C = -n_D d_D = \lambda_0/4$ ，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； $\omega$ 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 $\eta_j = n_j, j$ 代表所取介质。

对于缺陷层有类似的结构：

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

式中，当材料C为吸收介质，那么 $\delta_C = \frac{\pi}{2} \cdot g(1 + ik)$ ， $\eta_C = n_C(1 + ik)$ ；当材料D为吸收介质时，由于其为负折射率材料，那么 $\delta_D = -\frac{\pi}{2} \cdot g(1 - ik)$ ， $\eta_D = n_D(1 - ik)$ 。其中， $k$ 为消光系数。

那么对于整个光子晶体，特征矩阵为：

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

透射系数为：
$$t = \frac{2}{x_{11} + x_{12} + x_{21} + x_{22}} \quad (4)$$

透射率为：
$$T = t \cdot t^* \quad (5)$$

式中， $x$ 为矩阵元， $*$ 表示复共轭函数。

### 2 数值模拟

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 $n_D = -1$ 。但是现在要把缺陷层材料C和D变为有吸收特性的介质。所谓有吸收特性的介质就是指折射率带有一个虚部，虚部的值(即 $k$ )表征了电磁波在此种材料中传播时的衰减。

#### 2.1 材料C为吸收材料时的孪生缺陷模响应

取 $\eta_C = 4(1 + ik)$ ，其中消光系数 $k$ 的取值分别为

0.008, 0.018, 0.028, 0.04。计算结果如图1所示。由图

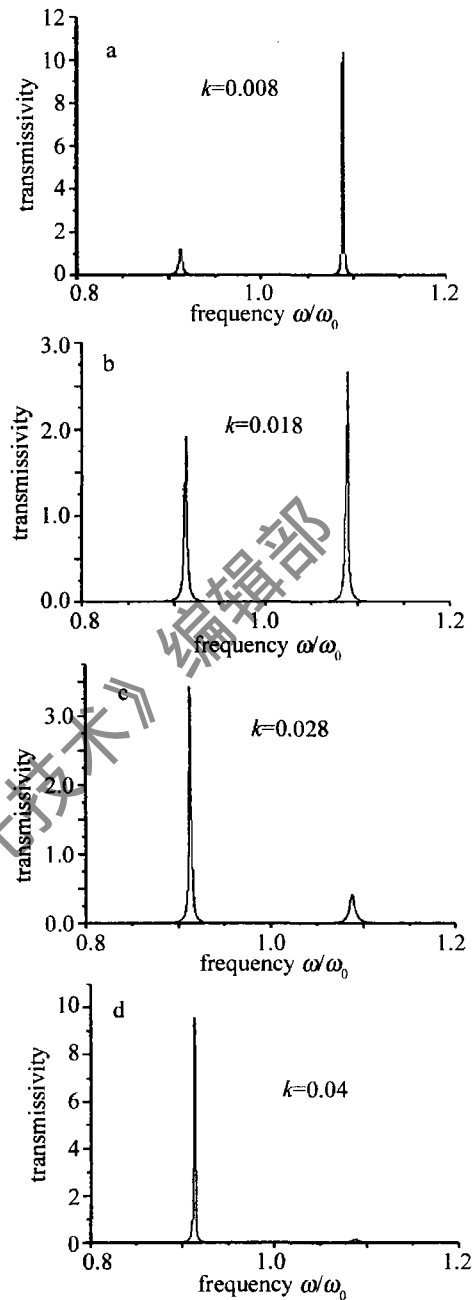


Fig. 1 The transmission with the extinction coefficient of the material C

1可知，由于虚部的引入，此光子晶体中出现的孪生缺陷模的透射率发生了明显的变化，而且高频缺陷模和低频缺陷模的透射率的变化各有其规律。此外，可以清楚地发现，虚部的引入并没有改变缺陷模的位置，低频缺陷模一直在 $g = 0.9125$ 处，而高频缺陷模总在 $g = 1.0875$ 处。

为了清晰地看到消光系数 $k$ 对缺陷模透射率的影响，下面具体模拟孪生缺陷模的透射率随消光系数 $k$ 的变化情况，如图2所示。

由图2可知，随着消光系数 $k$ 的增加，高低频处的缺陷模的透射率都是先增加达到最大值后再减小。但两者出现最大值的位置和大小不同，当 $k = 0.0577$ 时，

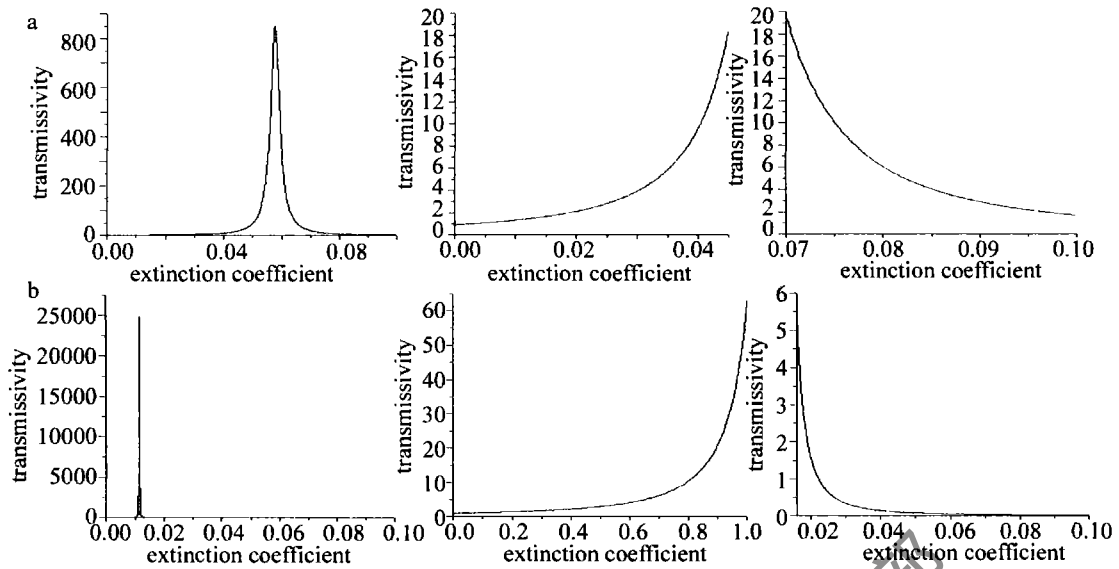


Fig. 2 Influence of the extinction coefficient on the transmission of dual defect modes

a—response curve of the transmissivity of low frequency defect mode versus the extinction coefficient b—response curve of the transmissivity of high frequency defect mode versus the extinction coefficient

低频缺陷模的透射率达到最大,为 848.156;当  $k = 0.0114$  时,高频缺陷模的透射率达到最大值,为 24794.75。

### 2.2 材料 D 为有吸收材料时孪生缺陷模的响应

取  $\eta_D = -1 + ik$ , 出现缺陷模的位置不变,孪生缺陷模的透射率也在随消光系数  $k$  发生变化,但是变化曲线有所不同,如图 3 所示。

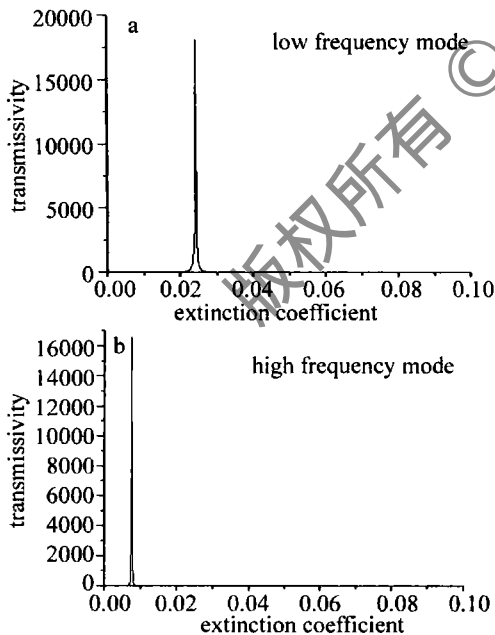


Fig. 3 Influence of the extinction coefficient on the transmission of dual defect modes

由图 3 可知,随着消光系数  $k$  的增加,高低频处的缺陷模透射率仍然产生了先大后小的变化,而且透射峰均相当尖锐。对于低频缺陷模,当  $k = 0.239$  时,其透射率达到最大值,为 18140.32,而当消光系数增大到 0.056 时,透射率已减低至 0.5;对于高频缺陷模,

当  $k = 0.0075$  时,其透射率达到最大值,为 16579.11,而当消光系数达到 0.0176 时,透射率减至 0.5。

### 2.3 材料 C 和 D 同为有吸收材料时孪生缺陷模的响应

把整个缺陷层都换成有吸收的介质,计算分析了孪生缺陷模的透射率随消光系数  $k$  的变化,如图 4 所示。

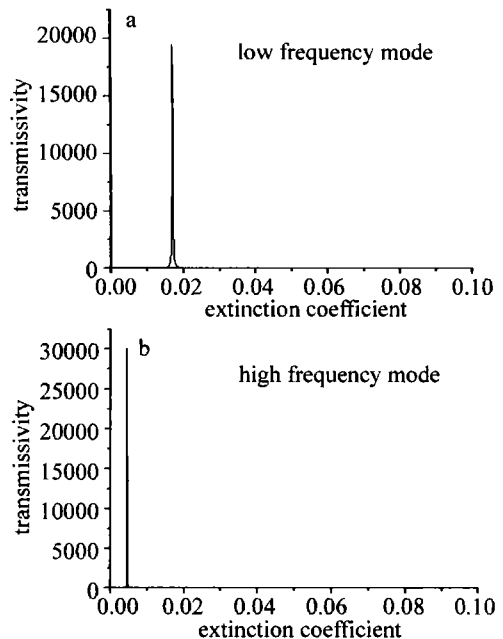


Fig. 4 Influence of the extinction coefficient on the transmission of dual defect modes

由图 4 可知,对于低频缺陷模,随着消光系数的变大,其透射率先是增加,在  $k$  达到 0.0169 时,透射率达到最大,为 19496.65,然后减小,当消光系数达到 0.04 时,透射率已经减小至 0.5 以下;而高频缺陷模,随着消光系数的增加,其透射率也先增加,在  $k$  达到 0.0045

(下转第 286 页)

烧蚀率提高的原因在于:(1)第1子脉冲预加热材料至高温相变状态,提高材料对第2子脉冲能量的吸收率;(2)第2子脉冲能加速由第1子脉冲产生的材料熔液飞溅出孔外;(3)第1子脉冲使激光作用区上方产生瞬时真空环境,使得第2子脉冲能量能更好地被材料吸收,同时使得被烧蚀材料更易于向孔外扩散。

使用本文中介绍的双脉冲方法替代普通单脉冲进行金属打孔,可以在较低能量密度、较低脉冲重复频率的情况下得到高的烧蚀效率,这对降低加工成本有着重要意义。

### 参 考 文 献

- [1] BREITLING D, RUF A, DAUSINGER F. Photon processing in microelectronics and photonics III [J]. Proc SPIE, 2004, 5339: 49-63.
- [2] JACKSON M J, NEILL W O. Laser micro-drilling of tool steel using Nd: YAG lasers [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 142(2): 517-525.
- [3] BREITLING D, SCHITTENHELM H, BERGER P, *et al.* Shadowgraphic and interferometric investigations on Nd: YAG laser-induced vapor/plasma plumes for different processing wavelengths [J]. Appl Phys, 1999, A69(s1): 505-508.
- [4] KLIMENTOV S M, KONONENKO T V, PIVOVAROV P A, *et al.* Role

- of gas environment in the process of deep-hole drilling by ultrashort laser pulses [J]. Proc SPIE, 2003, 4830: 515-520.
- [5] FIERET J, TERRY M J, WARD B A. Aerodynamic interactions during laser cutting [J]. Proc SPIE, 1986, 668: 53-62.
  - [6] ST-ONGE L, DETALLE V, SABSABI M. Enhanced laser-induced breakdown spectroscopy using the combination of fourth-harmonic and fundamental Nd: YAG laser pulses [J]. Spectrochimica Acta, 2002, B57(1): 121-135.
  - [7] SCAFFIDI J M, ANGEL S, CREMERS D A. Emission enhancement mechanisms in dual-pulse LIBS [J]. Analytical Chemistry, 2006, 78(1): 24-32.
  - [8] STRATIS D N, ELAND K L, ANGEL S M. Effect of pulse delay time on a pre-ablation dual-pulse LIBS plasma [J]. Applied Spectroscopy, 2001, 55(10): 1297-1303.
  - [9] SATTMANN R, STURM V, NOLL R. Laser-induced breakdown spectroscopy of steel samples using multiple Q-switch Nd: YAG laser pulses [J]. J Phys, 1995, D28(10): 2181-2187.
  - [10] LEHANE C, KWOK H S. Enhanced drilling using a dual-pulse Nd: YAG laser [J]. Appl Phys, 2001, A73(1): 45-48.
  - [11] WANG J J. Laser processing technique [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1992: 114-115 (in Chinese).
  - [12] PETTER L, NOLL R. Material ablation and plasma state for single and collinear double pulses interacting with iron samples at ambient gas pressures below 1 bar [J]. Appl Phys, 2007, B86(1): 159-167.

(上接第268页)

时,透射率达到最大,为30084.75,然后减小,当消光系数达到0.01稍强时,其透射率低于0.5。

### 3 结 论

通过对具有吸收的零平均折射率材料作为缺陷层的1维光子晶体的数值计算和理论分析,发现随着消光系数的增加,孪生缺陷模的位置并没有发生变化,但是其透射率会先变大再减小,使高低频处的缺陷模在消光系数的某一特定值处出现一最大值。而且引入消光系数的位置不同,则孪生缺陷模的透射率的响应曲线也会随之不同,即出现最大值的位置和最大值的大小不同。

### 参 考 文 献

- [1] YABLONVICH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059-2061.
- [2] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [3] 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).
- [4] 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).

- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] XU G W, OUYANG Zh B. A new double-wavelength photonic crystal resonator [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(3): 429-433 (in Chinese).
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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).
- [12] LIU Q N. Absorb influence to the photonic bandgap of photonic crystal [J]. Laser & Infrared, 2007, 37(6): 543-545 (in Chinese).
- [13] LIU Q N. Effect of impurity absorption on one-dimensional photonic crystal defect mode [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(6): 777-780 (in Chinese).
- [14] 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).