

文章编号: 1001-3806(2012)03-0368-04

## 缺陷为增益介质的光子晶体光放大特性的研究

何世昆 梁良\* 张玲 曹建建

(西安建筑科技大学 物理系, 西安 710055)

**摘要:** 为了研究含缺陷层为增益介质的三元1维光子晶体的光学特性,采用光学传输矩阵的方法进行了理论分析。结果表明,增益缺陷层厚度及光学常数的变化对于红外区的禁带结构影响不大,增益介质层主要对中心波长为 $1.8\mu\text{m}$ 所处的透射带带边波长的放大效应特别明显。还研究了增益介质缺陷层的厚度、光学常数的变化对于红外区透射带边( $2.1869\mu\text{m}$ )波长的光放大效应;当增益介质厚度为 $0.0101\mu\text{m}$ ,  $n = 5.03 + 0.124i$ 时,可以获得在波长 $2.1869\mu\text{m}$ 处透射系数为428的光放大。在红外区,光放大波长随着中心波长的变化而变化,但该波长都是在中心波长所处透射带的带边处。该结果可为以光子晶体作为激光增益介质的研究提供理论指导。

**关键词:** 物理光学;光子晶体;传输矩阵;增益介质;缺陷

中图分类号: O734

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.03.021

## Study on optical amplification characteristics of photonic crystal with defect as gain medium

HE Shi-kun, LIANG Liang, ZHANG Ling, CAO Jian-jian

(Department of Physics, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In order to study the optical characteristics of ternary layer 1-D photonic crystal with defect as gain medium, they were analyzed based on the optical transfer matrix. The thickness of gain defect layer and the optical constant change have little effect on the prohibited-band structure in the infrared region, and that the gain medium layer mainly affects the band-edge amplification effect of the transmission band at central wavelength of  $1.8\mu\text{m}$ . The effect of the thickness of gain medium layer, optical constant change on the amplification effect at infrared transmission band edge ( $2.1869\mu\text{m}$ ) wavelength was also studied. When the gain medium is  $0.0101\mu\text{m}$  thick,  $n = 5.03 + 0.124i$ , the transmission coefficient at the wavelength  $2.1869\mu\text{m}$  is up to 428 optical amplification. In the infrared band, optical amplification changes with the central wavelength, but the central wavelength is always at the edges of the wavelength band where the central wavelength is located. The results provide theoretical guidance for the photonic crystal as a laser gain medium.

**Key words:** physical optics; photonic crystal; transfer matrix; gain medium; defect

### 引言

光子晶体<sup>[1-4]</sup>是一种高低折射率介质成周期性排列的材料,具有光子禁带的重要特性,频率落在禁带中的光子不能传播<sup>[5-6]</sup>。目前对其研究相当广泛,光子晶体特性<sup>[7-9]</sup>和光子晶体器件<sup>[10-12]</sup>的研究都在不断创新中蓬勃发展。由于自发辐射的几率与光子所在的频率的态密度成正比,故光子的存在可以有效地抑制自发辐射。如果在光子晶体中掺入激活杂质,如具有放大性质的缺陷层,增加了相应频率的光子态密度,对应频率处的受激辐射将得到增强。近来人们发现含有缺

陷的光子晶体具有许多新的物理现象,并且有广泛的应用,如利用含缺陷的光子晶体可用来制作零阈值的激光器、光滤波器、光开关、光子晶体光纤、光倍频器、光存储器等光通讯器件<sup>[13-16]</sup>,目前在光子晶体中掺入激活杂质已有理论和实验报道<sup>[17-20]</sup>。但在光子晶体的缺陷层中掺入激活杂质特别是在1维三元光子晶体中掺入负折射率材料还鲜有报道。目前研究1维光子晶体最常用的是传输矩阵法,作者利用传输矩阵法计算并分析了垂直入射<sup>[21-23]</sup>情况下,含缺陷层为增益介质的三元1维光子晶体的禁带结构以及对红外区透射带边波长的光放大特性。

作者自行设计了一种缺陷层为光放大介质的晶体结构,并用传输矩阵理论进行了研究,发现光垂直入射此晶体结构时会产生光放大效应,且增益缺陷层厚度及光学常数的变化对于红外区透射带带边波长的放大

作者简介:何世昆(1983-),男,硕士研究生,现在主要从事光子晶体材料的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: liangll@pub.xaonline.com

收稿日期:2011-09-29;收到修改稿日期:2011-10-18

效应特别明显。

### 1 理论模型

1 维三元光子晶体由 A B C 3 种材料交替排列而成,其结构如图 1 所示,D 为缺陷层,根据光在介质薄膜中传播的传输矩阵方法,光在每种介质层中的传输矩阵为:

$$M = \begin{bmatrix} \cos\delta_j & i\sin\delta_j \\ i\eta\sin\delta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中  $\delta_j = 2\pi n_j d_j \cos\theta_j / \lambda$ ,  $n_j$ ,  $d_j$ ,  $\theta_j$  分别对应第  $j$  ( $j = A, B, C, D$ ) 层介质的折射率、介质层厚度、入射角,对于 TE 波:  $\eta_j = n_j \cos\theta_j$ ,  $\lambda$  为真空中的波长。图 1 中光子晶体总传输矩阵为:

$$M = (M_A M_B M_C)^N M_D (M_C M_B M_A)^N = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中  $N$  为缺陷两边对称的三元介质层的周期数,这样根据传递矩阵理论,光在光子晶体传播时的透射率为:

$$T = \frac{4\eta_g}{[(M_{11} + M_{12}\eta_f)\eta_g + (M_{21} + M_{22}\eta_f)]^2} \quad (3)$$

式中  $\eta_g$ ,  $\eta_f$  为光子晶体外侧折射率(下标  $g$  和  $f$  分别代表不同的介质),在本文中取光子晶体的基底及入射侧的折射率  $\eta_g$  和  $\eta_f$  均为 1.0,取  $\theta_j = 0$  即垂直入射。

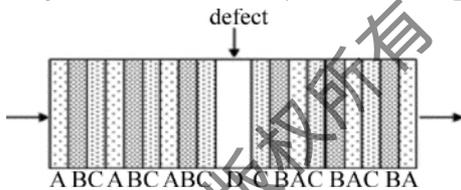


Fig. 1 Schematic diagram of 1-D defect photonic crystal

### 2 数值模拟和计算结果分析

在三元光子晶体中,取 A 层为  $MgF_2$ , 折射率为 1.36; B 层为 Si, 折射率为 4.11; C 层为 ZnS, 折射率为 2.35, 计算中对于这 3 层的折射率未考虑色散。各层介质的光学厚度满足  $n_j d_j = \lambda_0 / 4$ ,  $\lambda_0$  为中心波长。缺陷层 D 为增益介质,为了找出复折射率  $n = n' + ik$  中的  $n'$  和  $k$  ( $n'$  为折射率的实部,  $k$  为介质的增益系数),对应光放大最显著位置处的值。下面当三元结构各层的光学厚度仍然取  $n_j d_j = \lambda_0 / 4$  时,假设  $n' = 1$ ,改变  $k$  的值,确定光放大最明显区域所对应的  $k$  值的范围;当  $k = 0.124$ ,改变  $n'$  的值,来确定影响光放大最显著位置处所对应的值。并对  $(M_A M_B M_C)^{10} M_D (M_C M_B M_A)^{10}$  的光子晶体结构

进行了数值计算。

#### 2.1 $k$ 值的改变对禁带的影响

集中研究了波长在红外区的光学特性,中心波长取为  $1.8\mu m$ ,取  $n' = 1$ ,  $k$  依次取 0.1, 0.2 和 0.5,增益缺陷层厚度  $d = 0.01\mu m$ ,计算结构为  $(M_A M_B M_C)^{10} M_D \times (M_C M_B M_A)^{10}$  的透射谱见图 2a。从图 2a 中可以看出:对于该结构的光子晶体,波长在  $[1.19\mu m, 1.52\mu m]$  和  $[2.19\mu m, 3.78\mu m]$  区间出现较宽的禁带。 $k$  值的改变对于禁带宽度没有影响,只是在波长位于  $1.52\mu m$  和  $2.19\mu m$  处即两个带边处的透射率大于 1.2,其它波长处的透射率都在 1 附近。在波长大于  $3.78\mu m$  的区域出现许多透射峰,但这些透射峰随着  $k$  值的增大变化很小。图 2b 为波长在  $2.1869\mu m$  (带边波长) 时透射率随着增益系数的变化规律,从图中可以看出,在  $k = 0.124$  处透射率达到最大,但随着  $k$  的增大,透射率  $T$  反而减小,因此,本文中选取  $k = 0.124$ 。

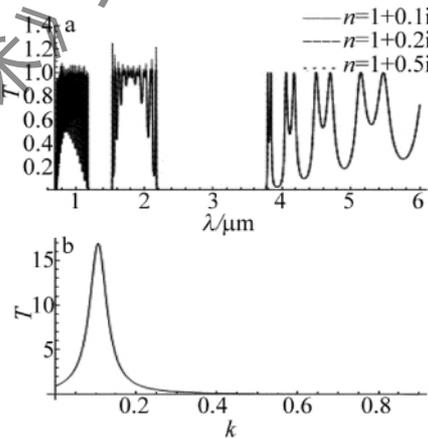


Fig. 2 a— $T$  variation of the photonic crystal with different value of  $k$  b— at  $\lambda = 2.1869\mu m$ ,  $T$  variation of the photonic crystal with different value of  $k$  in the  $n = 5 + ki$

#### 2.2 $n'$ 值的改变对禁带及透射带边波长的影响

在上述的光子晶体结构中,为了在带边波长处获得最大增益对应的增益介质的参量,取放大介质的增益系数  $k = 0.124$ ,改变折射率的实数部分,  $n'$  依次取 1, 3 和 5,缺陷厚度  $d = 0.01\mu m$ ,中心波长为  $1.8\mu m$ ,其透射谱如图 3 所示,与图 2a 相比,两个禁带的宽度区间  $[1.19\mu m, 1.52\mu m]$  和  $[2.19\mu m, 3.78\mu m]$  几乎未变,即  $n'$  值的改变对于禁带宽度没有影响,而且  $n'$  值的增大使光子晶体的在其它波长处的透射率有较小的

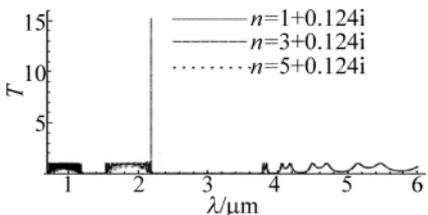


Fig. 3  $T$  variation of the photonic crystal with different value of  $n$

增大,但是在波长  $2.1869\mu\text{m}$  处即第2个禁带的带边出现一个透射率为15.3的透射峰,该透射峰所对应的折射率实部为  $n' = 5$ ,可见,在这种结构  $n'$ 对光子晶体透射率  $T$ 的影响更为明显,只要选择  $n'$ 合适,就可以在此波长处获得更高的光放大效应。图4为透射率在波长为  $2.1869\mu\text{m}$  时随  $n'$ 的变化,从中可以看出,透射率最大时对应的  $n' = 5.03$ ,其透射率超过了300。这种结构可以实现单通道放大器。在激光器中可以将激光介质当作缺陷放入对称的光子晶体中,实现选模的功能。由于增益系数的存在,介质对光信号具有放大作用,但增益介质处在光子晶体中时,对光信号的放大又要受到散射和谐振的影响,所以,不同波长处的光放大与增益系数的关系并不相同,但是除了透射带边外,其它透射峰的透射率都在1附近。通过精确计算,当  $n' = 5.03$  时,在波长  $2.1869\mu\text{m}$  处达到峰值,其透射率为312,且  $n'$ 对于透射峰的位置没有影响。

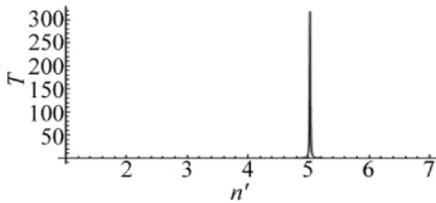


Fig. 4 At  $\lambda = 2.1869\mu\text{m}$ ,  $T$  variation of the photonic crystal with different value of  $n'$  in the  $n = n' + 0.1i$

### 2.3 缺陷层厚度的变化对禁带及透射带边波长的影响

在结构为  $(M_A M_B M_C)^{10} M_D (M_C M_B M_A)^{10}$  的光子晶体中,取其复折射率  $n = 5.03 + 0.124i$ ,中心波长为  $1.8\mu\text{m}$ ,改变缺陷层厚度  $d$  分别取  $0.005\mu\text{m}$ ,  $0.01\mu\text{m}$  和  $0.030\mu\text{m}$ ,其透射谱图如图5所示。从图中可以看出,对于该结构的光子晶体,在  $[1.19\mu\text{m}, 1.52\mu\text{m}]$  和  $[2.19\mu\text{m}, 3.78\mu\text{m}]$  这两个波长区间存在较宽的禁带。缺陷层厚度不同对禁带的宽度影响不大;随着缺陷层厚度的增加,  $[1.52\mu\text{m}, 2.19\mu\text{m}]$  这个区域的透射率减小,并且最终近似消失,但在  $\lambda = 2.1869\mu\text{m}$  附近的透射峰会随着缺陷层厚度的增加出现先升高再降低的规律。从图6中可以看出,在  $\lambda = 2.1869\mu\text{m}$  处,缺陷层厚度  $d = 0.0101\mu\text{m}$  时出现一个峰值约为428的透射峰,之后随着增益层厚度的增加透射率急剧下降;此时在  $\lambda = 3.78\mu\text{m}$  位置出现了一个很窄的透射峰,且随着缺陷层厚度的增加出现了微小的红移。图7是在  $\lambda = 2.1869\mu\text{m}$ 、缺陷层厚度  $d = 0.0101\mu\text{m}$  时,透射峰出现规律的3-D图像,从图7中可以看出,光放大最大处所对应的复折射率  $n = 5.03 + 0.124i$ ,随着  $n'$ 和  $k$ 值的增大或减小,光放大倍数都会下降。

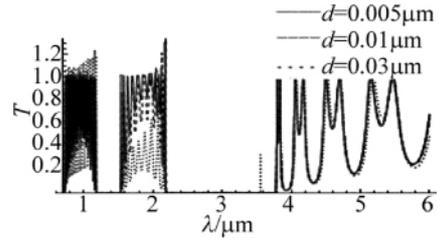


Fig. 5 At  $n = 5.03 + 0.124i$ ,  $T$  variation of the photonic crystal with in-eauable defect thickness

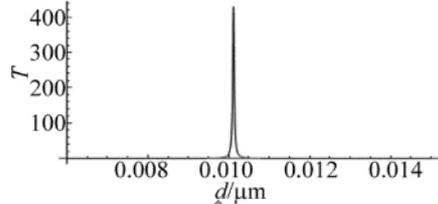


Fig. 6 At  $\lambda = 2.1869\mu\text{m}$ ,  $T$  variation of the photonic cryasal with ineauable defect thickness

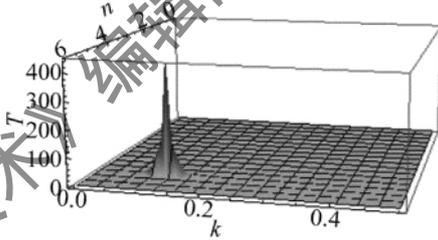


Fig. 7 Center wavelength  $\lambda = 2.1869\mu\text{m}$ , thickness  $d = 0.0101\mu\text{m}$ , the variation of photonic crystal  $T$  3-D images

### 3 改变中心波长对光放大的影响

在结构为  $(M_A M_B M_C)^{10} M_D (M_C M_B M_A)^{10}$  的光子晶体中,取复折射率  $n = 5.03 + 0.124i$ ,缺陷厚度  $d = 0.0101\mu\text{m}$ ,改变中心波长,分别取  $\lambda_0$  为  $1.5\mu\text{m}$  和  $2.0\mu\text{m}$ ,其透射谱图分别为图8、图9。从图中可以明显看出,禁带随着中心波长的红移(蓝移)而红移(蓝移),光放大波长随着中心波长的变化而变化,但该波长都是在中心波长所在透射带的带边处。本文中只给出变化的趋势,而且随着中心波长的改变,透射带波长具有最大放大倍数时对应的增益介质的参量如厚度、光学常数也随之变化。

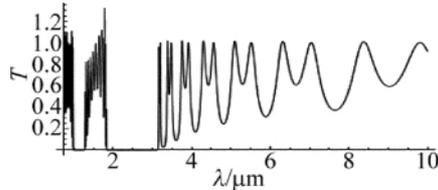


Fig. 8 Center wavelength  $\lambda = 1.5\mu\text{m}$ , the photonic crystal variation of  $T$

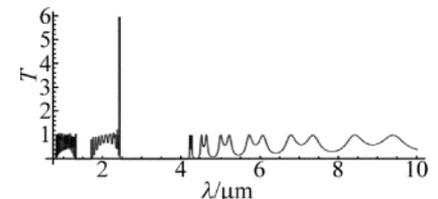


Fig. 9 Center wavelength  $\lambda = 2\mu\text{m}$ , the photonic crystal variation of  $T$

## 4 结 论

利用光学传输矩阵理论,研究了含缺陷层为增益介质的三元1维光子晶体的透射谱特性。在中心波长为 $1.8\mu\text{m}$ 时,光子晶体透射谱受到缺陷层折射率和厚度的影响。对于增益介质缺陷层,层的厚度及放大介质复折射率 $n = n' + ik$ 的变化,几乎不影响禁带结构。在整个红外区,只有在透射带边 $2.1869\mu\text{m}$ 波长处,当增益介质厚度 $d = 0.0101\mu\text{m}$ ,复折射率 $n = 5.03 + 0.124i$ 时,可得到最大光放大,其透射率可达到400以上。改变中心波长时,光放大波长随着中心波长的变化而变化,但该波长都是在中心波长所在透射带的带边处。本文中的结果可为以光子晶体作为激光增益介质的研究提供理论指导。

### 参 考 文 献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission solid-state physics and electronics [J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [2] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices [J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [3] VOS W L, SPROK R. Strong effects of photonic band structures on the diffraction of colloidal crystals [J]. *Physical Review*, 1996, B53(24): 16231-16235.
- [4] CHIGRIN D N, LAVRINENKO A V, YAROTSKY D A, *et al.* Observation of total omnidirectional reflection from a one dimensional dielectric lattice [J]. *Applied Physics*, 1999, A68(1): 25-28.
- [5] WU B J, ZHENG H, FANG M Y, *et al.* Study of two dimensional photonic triangle heterostructure band gap [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(10): 974-976 (in Chinese).
- [6] MA H M, XU Zh Y, ZHANG R J. Band structure analysis of one-dimensional photonic crystals with continuous index of refraction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(6): 914-917 (in Chinese).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] WANG Y H, TANG L, NI Zh W, *et al.* The defect mode and bistability in the nonlinear Bragg micrecavity composed of one-dimension photonic crystal [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(5): 462-464 (in Chinese).
- [12] XU G W, OUYANG Zh B. A new double-wavelength photonic crystal resonator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(3): 429-433 (in Chinese).
- [13] LABILLOY D, BENISTY H, WEISBUCH C, *et al.* Demonstration of cavity mode between two-dimensional photonic-crystal mirrors [J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(23): 1978-1980.
- [14] FAN S, VILLENEUVE P R, JOANNOPOULOS J D. High extraction efficiency of spontaneous emission from slabs of photonic crystals [J]. *Physical Review Letters*, 1997, 78(17): 3294-3297.
- [15] TRULL J, MARTORELL J, VILASECA R. Angular dependence of phase-matched second-harmonic generation in a photonic crystal [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1998, B15(10): 2581-2585.
- [16] YAMADA S, KOYAMA T, KATAYAMA Y, *et al.* Observation of light propagation in two dimensional photonic crystal based bend optical waveguides [J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 89(2): 855-858.
- [17] WANG H, OUYANG Zh B, HAN Y L. Amplification of one-dimensional photonic crystals defect-mode laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(11): 1691-1697 (in Chinese).
- [18] IMADA M, NODA S, CHUTINAN A, *et al.* Coherent two-dimensional lasing action insurface-emitting laser with triangular-lattice photonic crystal structure [J]. *Applied Physics Letters*, 1999, 75(3): 316-318.
- [19] MEIER M, MEKIS A, DODABALAPUR A, *et al.* Laser action from two-dimensional distributed feedback in photonic crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 1999, 74(1): 7-9.
- [20] NOTOMI M, SUZUKI H, TAMAMURA T. Directional lasing oscillation of two-dimensional organic photonic crystal laser at several photonic bandgap [J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 78(10): 1325-1327.
- [21] WANG H, LI Y O. An eigen matrix method for obtaining the band structure of photonic crystals [J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, 50(11): 2172-2178 (in Chinese).
- [22] LI J J, LI Zh Y, ZHANG D Zh. Second harmonic generation in one-dimensional nonlinear photonic crystals solved by the transfer matrix method [J]. *Physical Review*, 2007, E75(5): 056606.
- [23] ARRIAGA J, SALDANA X I. Band structure and reflectivity of omnidirectional Si based mirrors with a Gaussian profile refractive index [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100(4): 044911.