

具有复介电缺陷一维三元光子晶体禁带特性的研究

陈海波^{1,2}, 高英俊², 胡素梅¹

(1. 茂名学院物理系, 广东 茂名 525000; 2. 广西大学物理科学与工程技术学院, 广西 南宁 530004)

摘要:运用光学传输矩阵理论,研究了具有复介电常量缺陷层一维三元光子晶体的禁带特性。数值模拟结果得出:含有单缺陷的一维三元光子晶体的禁带中出现透射峰A和透射峰B,缺陷层复介电常量的虚部对透射峰B的影响很大。虚部为正时,表现为对透射峰B的吸收,随着虚部的增加,透射峰B逐渐降低;虚部为负时,表现为对透射峰B先增益然后吸收,随着虚部的增加,透射峰B先增加后减少。但缺陷层复介电常量虚部的变化对透射峰A基本不影响。本研究为光子晶体同时实现双通道滤波器和放大器提供理论参考。

关键词:一维三元光子晶体;复介电缺陷层;透射增益;透射吸收

中图分类号:O431

文献标识码:A

Properties of 1D Three Element Photonic Crystals with an Imaginary Part of Dielectric Constant Defect

CHEN Hai-bo^{1,2}, GAO Ying-jun², HU Su-mei¹

(1. Dept of Physics, Maoming college, Maoming 525000;

2. College of Physical Science and Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: By using the method of optical transfer matrix, the band function and the optical transmission properties of 1D three element photonic crystals with an imaginary part of dielectric constant defect are studied. The investigation results show that transmittance peak A and transmittance peak B appear in the photonic band if an real dielectric constant defect is added in the 1D three element photonic crystals. The transmittance peak B is largely affected by the imaginary part of dielectric constant defect. The transmittance peak B is absorbed if the imaginary part of dielectric constant defect is positive. With the increasing of the imaginary, the transmittance gain B is reducing. The transmittance peak B firstly increased then reduced if the imaginary part of dielectric constant defect is negative. However, the transmittance peak A is invariable when the imaginary part of dielectric constant defect is changed. The conclusion is might be used to double channel narrow band filter and optical amplification device synchronously.

Key words: 1D three element photonic crystal; an imaginary part of dielectric constant defect; transmittance gain; transmittance absorbed

1 引言

从 Yablonovitch 和 John 分别在 1987 年提出光子晶体概念以来^[1-2],人们对光子晶体进行了深入的研究。它是具有光子频率禁带的特殊材料,频率落在禁带中的光子不能传播^[3-4]。由于自发辐射的

几率与光子所在频率的态密度成正比,故光子禁带

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 50661001);茂名学院自然科学基金项目(No. 203265)资助。

作者简介:陈海波(1977-),男,硕士研究生,实验师,主要从事光子晶体与光电子材料的研究。E-mail: chbnihao0923@163.com

收稿日期:2007-11-16; **修订日期:**2008-01-08

的存在可以有效地抑制自发辐射。但如果在光子晶体中掺入激活杂质,增加了相应频率光子态密度,对应频率处的受激辐射得到增强。目前在光子晶体中掺入激活杂质已有理论和实验报道^[5-8]。但在光子晶体的缺陷层中掺入激活杂质特别是在一维三元光子晶体中掺入复介电缺陷层还未有文献报道。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。含缺陷的光子晶体可用来制作激光器^[9-10]、发光二极管^[11-12]、滤波器^[13]等。

目前研究一维光子晶体的方法最常用的是传输矩阵法,研究大都集中于一维二元光子晶体且介质的介电常数为实数^[14-15]。笔者把传统处理一维二元光子晶体的传输矩阵作进一步扩展,用于含有复介电缺陷层的一维三元光子晶体设计的研究。得出了一些有意义的结果,为光子晶体同时实现双通道滤波功能和放大功能提供了理论依据。

2 有缺陷层的一维三元光子晶体的模型及特征矩阵、反射率和透射率

研究的一维三元光子晶体结构如图1所示,考虑由介质A,B和C生成的多层系统 E_N 和 G_M ,周期数分别为 N 和 M ,在 E_N 和 G_M 的系统之间插入另一种介质D,构成含缺陷层的三元光子晶体结构模型。系统 E_N 和 G_M 的传输矩阵分别为 M_1 和 M_2 ,缺陷层的传输矩阵为 M_D 。

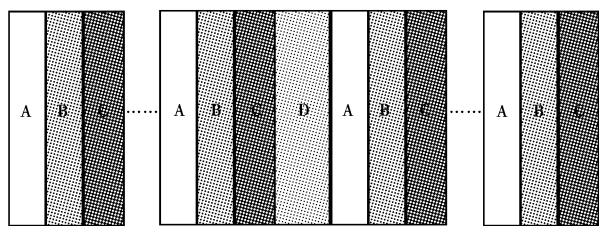


图1 一维单缺陷三元光子晶体模型

Fig. 1 the model of 1D three-element photonic crystal with a defect

根据薄膜光学理论^[9],电磁波在每层介质中的传输特性可以用一个 2×2 的特征矩阵表示对于第 j 层介质,其特征矩阵为:

$$\begin{pmatrix} \cos\delta_j & i\eta_j^{-1}\sin\delta_j \\ i\eta_j\sin\delta_j & \cos\delta_j \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中, $\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda}n_jd_j\cos\theta_j$; λ 是某一参考波长; n_jd_j 是 j 层介质的光学厚度; θ_j 是电磁波的传播方向与界面之间的夹角; η_j 是介质的有效导纳,对于TM波,

$\eta_j = \sqrt{\frac{\epsilon_j}{\mu_j}} \frac{1}{\cos\theta_j}$,对于TE波, $\eta_j = \sqrt{\frac{\epsilon_j}{\mu_j}} \cos\theta_j$ 。对于由A,B,C三层介质组成的一个基本周期单元来说,其特征矩阵为:

$$M_0 = \begin{pmatrix} \cos\delta_1 & i\eta_1^{-1}\sin\delta_1 \\ i\eta_1\sin\delta_1 & \cos\delta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\delta_2 & i\eta_2^{-1}\sin\delta_2 \\ i\eta_2\sin\delta_2 & \cos\delta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\delta_3 & i\eta_3^{-1}\sin\delta_3 \\ i\eta_3\sin\delta_3 & \cos\delta_3 \end{pmatrix} \quad (2)$$

若一维光子晶体分别为由 N 和 M 个这样的基本周期组成,则晶体总的特征矩阵为 N 和 M 个 M_0 的乘积,即:

$$M_1 = M_0^N \quad M_2 = M_0^M$$

对于由系统 E_N ,D, G_M 组成的系统来说,其特征矩阵为:

$$M = M_1 M_D M_2 = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix}$$

进一步可写出整个结构的反射系数为:

$$r = \frac{m_{11}\eta_0 + m_{12}\eta_0\eta_l - m_{21} - m_{22}\eta_l}{m_{11}\eta_0 + m_{12}\eta_0\eta_l + m_{21} + m_{22}\eta_l} \quad (4)$$

其中, η_0 和 η_l 分别为入射介质和出射介质的导纳。

$$\text{透射率为: } R = |r|^2 \quad (5)$$

$$\text{反射率为: } T = 1 - R \quad (6)$$

3 数值模拟结果及分析

计算中取材料A为折射率 $n_a = 4.11$ 的Si,材料B为折射率 $n_b = 2.96$ 的TiO₂,材料C折射率为 $n_c = 1.30$ 的氟化钠,A,B和C的光学厚度都为200nm。缺陷层D为GaAs,折射率为 $n_3 = 1.8$,光学厚度为600nm。整个光子晶体的结构处在空气环境中($\eta_l =$

$\eta_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}}$),入射波为TE平面波,且垂直于介质表面入射($\theta = 0$),忽略介质的色散和吸收并且认为是非磁性的,周期数 N 和 M 都为5。光子晶体结构为 $(ABC)^5D(ABC)^5$,复介电缺陷层D的折射率和介电常数用复数代入。用传输矩阵方法,MATLAB编程软件将上面的参数带入公式进行模拟计算,考察复介电缺陷层三元光子晶体的光传输特性。

3.1 实介电常量缺陷层的镜像对称光子晶体传输特性

首先对缺陷层的介电常数为实数的一维三元光子晶体的透射谱进行了数值计算如图2所示。由图

2 可知,在三元光子晶体中间加入实介电缺陷层后,在光子晶体禁带中出现了两个透射峰,透射峰的位置分别在 1000nm 和 1504nm 处,分别称为透射峰 A 和透射峰 B,此结构可用于双通道滤波器的设计。

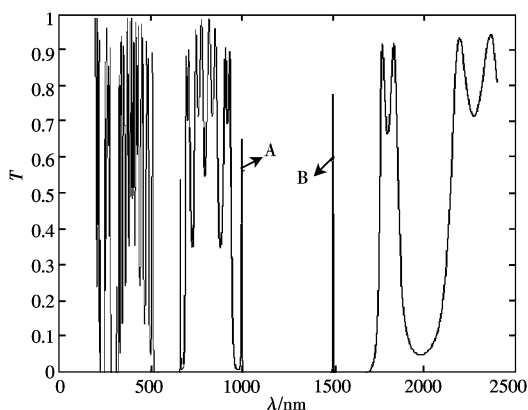


图2 实介电常量缺陷层一维三元光子晶体的透射谱

Fig.2 the transmission spectrum of 1D three element photonic crystals with a real dielectric constant defect

3.2 复介电常量缺陷层一维三元光子晶体的传输特性

首先考察缺陷层的复介电常量的虚部为负值的情形。同样用传输矩阵法分析这种具有复介电常量缺陷层的一维三元光子晶体的光传输特性。假设缺陷层的介电常量为 $\epsilon_{rc} = 3.24 - 0.08i$, 光学厚度仍然为 600nm, 其余的参数与图 2 的一致, 计算得到的透射谱如图 3 所示。比较图 3 与图 2 可以看出, 缺陷层的介电常量具有一个负虚部以后, 透射峰 A 的透射率基本没有改变。但透射峰 B 出现透射率数值大于 1, 即出现增益现象。这种结构可以同时实现

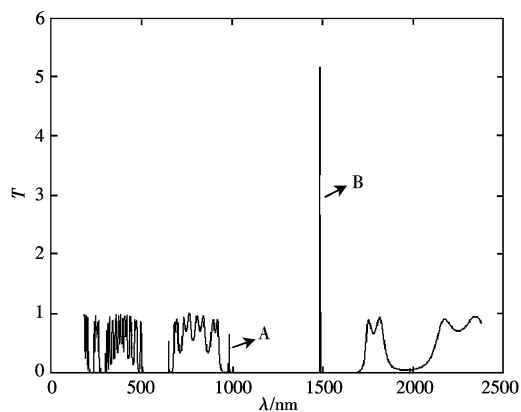


图3 复介电常量负虚部缺陷层一维三元光子晶体的透射谱

Fig.3 the transmittance spectrum of 1D threeelement photonic crystals with a negative imaginary part of dielectric constant defect layer

双通道滤波器以及单通道放大器。图 4 进一步考察了缺陷层介电常量负虚部的绝对值对透射峰 B 增益的影响, 由图 4 可知, 随着缺陷层介电常量负虚部绝对值的增加, 透射峰 B 先增加后减少。当缺陷层介电常量虚部的绝对值为 0.08 时, 透射峰 B 达到最大值, 为 5.1734。随后当缺陷层介电常量虚部的绝对值进一步增加, 透射峰 B 开始降低, 当其绝对值达到 0.5 时, 透射峰已小于 0.01, 可以认为透射峰 B 对应的缺陷膜已经消失。

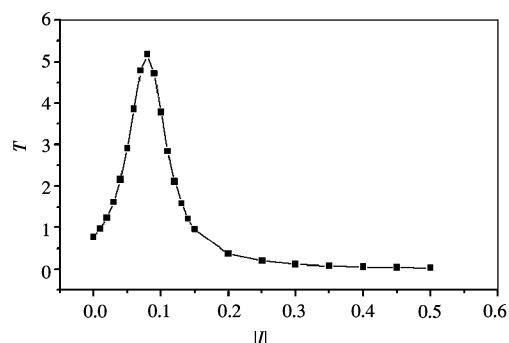


图4 缺陷层复介电常量负虚部绝对值与透射峰 B 的透射率之间的关系

Fig.4 the relation between the absolute of defect layer's negative imaginary part of dielectric constant and transmittance B

其次考察缺陷层的复介电常量的虚部为正值的情形。假设缺陷层的介电常量为 $\epsilon_{rc} = 3.24 + 0.08i$, 光学厚度仍然为 600nm, 其余的参数与图 2 的一致, 计算得到的透射谱如图 5 所示。比较图 5 与图 2 可以看出, 缺陷层的介电常量具有一个正虚部以后, 透射峰 A 的透射率基本没有改变。但透射峰 B 的透

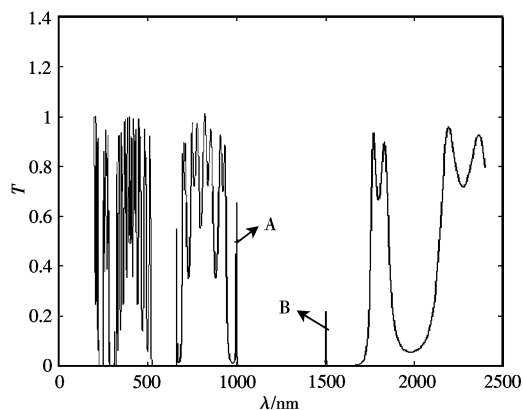


图5 复介电常量正虚部缺陷层一维三元光子晶体的透射谱

Fig.5 the transmittance spectrum of 1D threeelement photonic crystals with a positive imaginary part of dielectric constant defect layer

射率降低,即当缺陷层的介电常量的虚部为正时,表现为对透射峰 B 的吸收。图 6 进一步考察了缺陷层介电常量的正虚部对透射峰 B 的影响,由图 6 可知,随着缺陷层介电常量正虚部的增加,透射峰 B 的透射率逐渐降低,当缺陷层的介电常量的虚部为 0.5 时,透射峰 B 的透射率已小于 0.01,可以认为透射峰 B 对应的缺陷膜已经消失。由图 3 和图 5 可知,要使透射峰出现增益,缺陷层介电常量的虚部必须为负,这给光子晶体实现放大功能提供了理论指导。

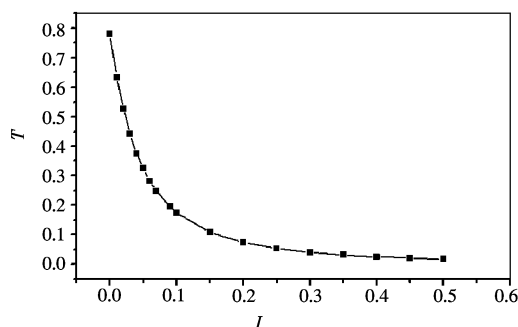


图 6 缺陷层复介电常量正虚部与透射峰 B 的透射率之间的关系

Fig. 6 the relation between the defect layer's positive imaginary part of dielectric constant and transmittance B

4 总 结

利用传输矩阵方法,研究了具有复介电常量缺陷层一维三元光子晶体的带隙结构和光传输特性。研究表明:当一维三元光子晶体的缺陷层的介电常数为实数时,在光子晶体禁带中出现了透射峰 A 和透射峰 B。

当缺陷层的介电常数具有一个负虚部时,透射峰 A 的透射率基本不变,而透射峰 B 的透射率大于 1,出现增益现象,且随着负虚部绝对值的增加,透射峰 B 的透射率先增加后减少,当其绝对值增加到 0.5 时,透射峰 B 基本消失。这为光子晶体同时实现双通道滤波器和单通道放大器提供了理论依据。

而当缺陷层的介电常数具有一个正虚部时,透射峰 A 的透射率也基本不变,而透射峰 B 的透射率降低,随着缺陷层介电常数正虚部的增加,透射峰 B 的透射率逐渐降低,当其虚部达到 0.5 时,透射峰 B 基本消失。故要使光子晶体实现放大功能,缺陷层的介电常量必须为负。

参考文献:

- [1] Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Phys. Rev. Lett., 1987, 5(20):2059-2061.
- [2] Johns. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices [J]. Phys. Rev. Lett., 1987, 58(23):2486-2489.
- [3] 吴炳坚,郑浩,方明阳,等. 二维光子晶体三角形结构带隙研究[J]. 激光与红外,2006,36(10):974-976.
- [4] 马荷梅,许震宇,张若京. 折射率连续周期分布一维光子晶体的带隙分析[J]. 光学学报,2006,26(6):914-917.
- [5] 王宏,欧阳征标,韩艳玲. 一维光子晶体缺陷模激光器的放大特性[J]. 光学学报,2006,26(11):1691-1697.
- [6] Imada M, Noda S, Chutinan A, et al. Coherent two-dimensional lasing action in surface-emitting laser with triangular-lattice photonic crystal structure [J]. Appl. Phys. Lett., 1999, 75(2):316-318.
- [7] Meier M, Mekis A, Dodabalapur A, et al. Laser action from two-dimensional distributed feedback in photonic crystals[J]. Appl. Phys. Lett., 1999, 74(1):7-9.
- [8] Notomi M, Suzuki H, Tamamura T. Directional lasing oscillation of two-dimensional organic photonic crystal laser at several photonic bandgap[J]. Appl. Phys. Lett., 2001, 78(10):1325-1327.
- [9] Panter O, Leer K, Scherer A, et al. Two-dimensional photonic band-gap defect mode laser[J]. Science, 1999, 284(5421):1819-1821.
- [10] Benisty, Weisbuch C, Olivier S, et al. Low-loss photonic-crystal and monolithic InP integration: bands, bend, lasers, filters[J]. SPIE, 2004, 5360:119-128.
- [11] Chow E, Liu S Y, Johnson S G, et al. Three-dimensional control of light in a two-dimensional photonic crystal slab [J]. Nature, 2000, 407(6807):983-986.
- [12] Yanikm F, Fan S. All-optical transistor action with bistable switching in a photonic crystal cross-waveguide geometry[J]. Opt. Lett., 2003, 28(24):2506-2508.
- [13] 刘启能. 可调谐光子晶体偏振通带滤波器的理论研究[J]. 激光与红外, 2007, 37(4):362-365.
- [14] Yablonovitch E. Engineered omnidirectional external reflectivity spectra from one-dimensional layered interference filters[J]. Opt. Lett., 1998, 23:1648-1649.
- [15] Xudong C, Hafner C, Vahldieck R. Design of ultra-compact metallo-dielectric photonic crystal filters[J]. Optics Express, 2005, 13(16):6175-6180.