

文章编号: 1001-3806(2008)05-0531-03

复介电缺陷层镜像对称 1维光子晶体特性研究

陈海波^{1,2}, 胡素梅¹, 高英俊²

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

摘要: 为了研究关于复介电常量缺陷层镜像对称的 1维光子晶体的带隙结构和光传输特性, 利用传输矩阵法, 讨论了缺陷层的复介电常量的虚部为负值且光学厚度为 $\lambda_0/2$ 的情形对传输特性的影响。结果表明, 当在光子晶体加入复介电常量的缺陷层后, 在靠近光子带隙边缘, 出现了较强的透射峰增益; 随着缺陷层复介电常量的实部和虚部的增加, 透射增益先增加后减少, 中间存在一极值点, 但缺陷膜的位置和高度不受复介电常量的实部和虚部的影响。这一结果为光子晶体同时实现超窄带滤波器和光放大微器件提供了理论基础。

关键词: 物理光学; 透射增益; 传输矩阵法; 复介电常量缺陷层; 缺陷膜

中图分类号: O431 文献标识码: A

Properties of mirror symmetrical 1-D photonic crystals with an imaginary part of dielectric constant defect

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

(1. Department of Physics M aoming College, M aoming 525000, China 2. College of Physical Science and Engineering, Guangxi University Nanning 530004, China)

Abstract By means of optical transfer matrix, the band function and the optical transmission properties of mirror symmetrical photonic crystals with an imaginary part of dielectric constant defect were studied especially in the case of negative imaginary part and the $\lambda_0/2$ optical thickness of the defect. The investigation results show that a large transmittance gain appears at the photonic band edges if an imaginary part of dielectric constant defect is added in the photonic crystal. With the increasing of the imaginary and the real part of defect's dielectric constant, the transmittance gain is increasing firstly then decreasing and in the middle the transmittance gain apex appears. However, the place and altitude of the defect film are invariable. The conclusion is useful for narrow band filter and optical amplification device synchronously.

Key words physical optics; transmittance gain; transfer matrix method; an imaginary part of dielectric constant defect; defect film

引言

从 YABLONOVICH 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。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^[3-4]、发光二极管^[5-6]、滤波器^[7-8]等。如光子晶体关于缺陷层镜像对称, 可实现缺陷膜的完全透射^[9]。对称的光子晶体中加入实介电常量的缺陷层已有广泛的研究, 但在镜像对称的光子晶体中加入复介电常量的缺陷层还未有文献报道。笔者采用传输矩阵法数值模拟了具有复介电常量缺陷层的镜

像对称结构光子晶体的光传输特性, 进而提出了一种可以同时实现超窄带滤波和光放大器件的特殊结构。

1 模型建立及特征矩阵、反射率和透射率

研究的 1 维关于缺陷层镜像对称的光子晶体结构如图 1 所示。考虑由介质 A 和介质 B 生成的多层系

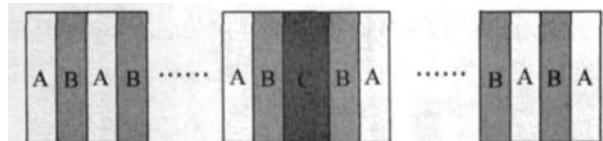


Fig 1 Structure of an 1-D photonic crystal $(AB)^N C (BA)^N$ 系统 E_N , 实际厚度分别为 a 和 b , 光学厚度均为 $\lambda_0/4$ (λ_0 为中央波长)。取 E_N 的镜像对称结构为 G_N 。在 E_N 和 G_N 的系统之间插入另一种介质 C, 构成含缺陷层的镜像对称结构模型。系统 E_N 和 G_N 的传输矩阵分别为 M_1 和 M_2 , 缺陷层的传输矩阵为 M_C 。根据薄膜光学理论^[10], 第 j 层介质的传输矩阵为:

作者简介: 陈海波 (1977-), 男, 硕士, 实验师, 主要从事光子晶体与负折射率材料的研究。

E-mail chbnihao0923@163.com

收稿日期: 2007-07-17; 收到修改稿日期: 2007-09-19

$$\mathbf{M}_j = \begin{bmatrix} \cos\delta & \eta_j^{-1} \sin\delta \\ \eta_j \sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \cos\theta_j$, λ 是某一参考波长, $n_j d_j$ 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, $\eta_j = \sqrt{\frac{\epsilon_j}{\mu_j}} \times \frac{1}{\cos\theta_j}$, 对于 TE 波, $\eta_j = \sqrt{\frac{\epsilon_j}{\mu_j}} \cos\theta_j$ 。式中, ϵ 表介电常数, μ 为磁导率。当膜层包含 n 层时, 整个膜系的特征矩阵可以由 \mathbf{M}_j 的连乘得出: $\mathbf{M}_1 = \prod_{j=1}^n \mathbf{M}_j \mathbf{M}_2 = \prod_{j=n+2}^{2n+1} \mathbf{M}_j$ 。

对于由 E_n, C, G_n 组成的系统来说, 其特征矩阵为:

$$\mathbf{M}_0 = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_C \mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

整个结构的透射系数为:

$$t = \frac{2\eta_0}{m_{11}\eta_0 + m_{12}\eta_0\eta_l + m_{21} + m_{22}\eta_l} \quad (3)$$

式中, η_0 和 η_l 分别为入射介质和出射介质的导纳。

$$\text{透射率为: } T = |t|^2 \quad (4)$$

2 数值结果模拟与分析

2.1 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 1 维镜像对称的光子晶体的透射谱进行了数值计算。在计算中分别选择折射率相差较大的材料 S 和 MgF₂ 作为 A 层和 B 层, 折射率分别为 $n_1 = 4.11$ 和 $n_2 = 1.39$ 。中心波长 $\lambda_0 = 600\text{nm}$, 缺陷层 C 为 GaAs, 折射率 $n_3 = 3.8$ 。假设入射波为 TE 波且垂直入射。A, B 介质的光学厚度取为 $\lambda_0/4$ 。光子晶体结构为 (AB)⁵C(BA)⁵, 缺陷层的光学厚度 Δ 分别取 300 nm, 200 nm 和 450 nm, 考察了缺陷层的光学厚度 Δ 对透射谱的影响, 如图 2 所示。由

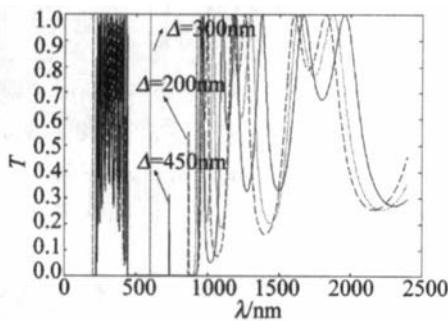


Fig. 2 The influence of defect layer optical thickness Δ on transmission spectrum

图 2 可知, 缺陷层的光学厚度对透射谱影响比较大, 当缺陷层的光学厚度改变时, 缺陷膜的位置和高度都发生改变。同时由图 2 也可以看出, 当在镜像对称结构的光子晶体中加入实介电常量的缺陷层且缺陷层的厚度为 $\lambda_0/2$ 时, 在光子晶体禁带的中心波长 (600 nm) 处出现了一完全透射的缺陷膜。

2.2 复介电常量缺陷层的镜像对称光子晶体的传输特性

当在缺陷层 GaAs 介质中掺入激活杂质时, 如掺入 Er, 此时缺陷层的介电常量的虚部不再为 0 而是有一个负值。同样用传输矩阵法分析这种具有复介电常量缺陷层的 1 维镜像对称光子晶体的光传输特性。假设掺杂的激活杂质均匀分布在缺陷层中, 缺陷层的介电常量为 $\epsilon_{tc} = 3.24 - 0.25i$; 光学厚度为 $\lambda_0/2$, 其余的参量与图 2 的一致, 计算得到的透射谱如图 3 所示。

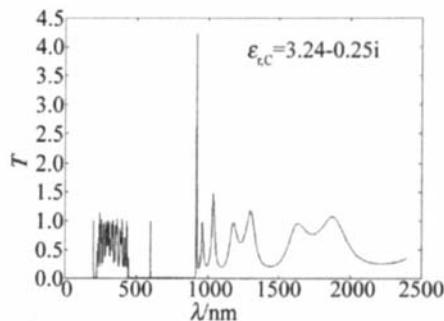


Fig. 3 The transmittance spectrum of minor symmetrical photonic crystals with an imaginary part of dielectric constant defect layer

比较图 3 与图 2 可以看出, 当缺陷层的光学厚度为 $\lambda_0/2$ 时, 缺陷层掺杂激活杂质后, 中心波长处的缺陷膜的位置和透射率都没有发生改变。但在光子带隙的边缘, 即 $\lambda_0 = 922\text{nm}$ 处, 透射率峰值数值大于 1, 即出现增益现象。

2.2.1 缺陷层的复介电常量虚部大小 I 对透射峰增益的影响 图 4 为光子晶体透射率与缺陷层的复介电常量虚部 I 大小的变化关系。图 4 表明, 当缺陷层的

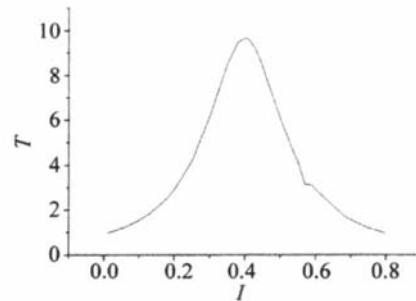


Fig. 4 The relation between defect layer imaginary part of dielectric constant and transmittance gain

复介电常量虚部较小时, 随着缺陷层的复介电常量虚部的增加, 透射峰逐渐增强; 当其虚部数值增加到 0.4

时,透射率达到最强为 9.686。此后虚部数值再增加,透射峰又开始减弱,这表明随着虚部数值的增加,透射峰增益并不是单调递增,而是存在一极值点,当超过极值点后,虚部数值再增加,透射峰增益又开始减弱。同时也发现当缺陷层的光学厚度为 $\lambda_0/2$ 时,缺陷层的复介电常量虚部无论怎么变化,中心波长处缺陷膜的位置和透射率都没有发生改变。

2.2.2 缺陷层的复介电常量实部大小 R 对透射峰增益的影响 图 5 为光子晶体透射率与缺陷层的复介电常量实部 R 大小的变化关系,其中缺陷层复介电常量

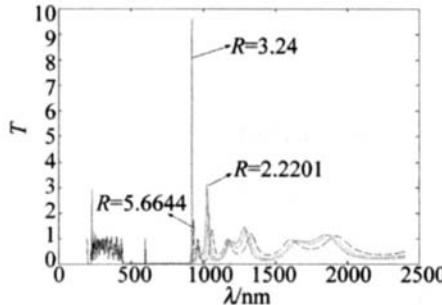


Fig. 5 The transmittance spectrum of different defect layer real part of dielectric constant

的虚部固定为 0.4,图中 R 取 2.2201, 3.24 和 5.6644, 分别对应的缺陷层材料为 KCl, GaAs 和 ZnS。图 5 表明,当缺陷层的复介电常量实部数值比较小时,如图中的 $R = 2.2201$ 所对应的透射谱,出现了两个透射峰增益,分别在 $\lambda = 230\text{nm}$ 和 $\lambda = 1026\text{nm}$ 处,对应的透射率分别为 2.8394 和 3.0374。而当 R 增大到 3.24 时,第 1 个透射峰消失,第 2 个透射峰移到 $\lambda = 922\text{nm}$ 处,透射率增大为 9.686。此后当 R 增大到 5.6644 时,透射峰仍然在 $\lambda = 922\text{nm}$ 处,但透射率减小为 1.713。同时也发现当缺陷层的光学厚度为 $\lambda_0/2$ 时,缺陷层的复介电常量实部无论怎么变化,中心波长处的缺陷膜的位置和透射率都没有发生改变。结合图 2 可以说明中心波长处的缺陷膜的位置和透射率主要由缺陷层的光学厚度决定。

3 小结

利用传输矩阵方法,研究了复介电常量缺陷层镜像对称 1 维光子晶体的带隙结构和光传输特性。研究结果表明:实介电常数缺陷层镜像对称 1 维光子晶体的缺陷层光学厚度对缺陷膜的位置和高度影响较大。

但当缺陷层的光学厚度为 $\lambda_0/2$ 时,在镜像对称 1 维光子晶体的缺陷层中掺入激活杂质后,并没有改变光子晶体的能带结构。但在光子带隙的边缘,出现透射增益现象。同时也发现,缺陷层复介电常量实部和虚部的大小都不影响透射膜的位置和高度,只影响透射峰的增益。这也为光子晶体器件同时实现超窄带滤波和光放大功能提供了理论依据。

参 考 文 献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Phys Rev Lett 1987, 5(20): 2059-2061.
- [2] JOHN S. Strong beatings of photons in certain disordered dielectric super lattices [J]. Phys Rev Lett 1987, 58(23): 2486-2489.
- [3] PANTER O, LEER K, SCHERER A, et al. Two-dimensional photonic band-gap defect mode laser [J]. Science 1999, 284(5421): 1819-1821.
- [4] BEN STY H, WEISBUCH C, OLIVIER S, et al. Low-loss photonic crystal and monolithic InP integration bands bend lasers filters [J]. SPIE, 2004, 5360: 119-128.
- [5] 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.
- [6] YAN KM, FAN S. All-optical transistor action with bistable switching in a photonic crystal cross-waveguide geometry [J]. Opt Lett 2003, 28(24): 2506-2508.
- [7] PAN Y ZH, ZHANG J, HU G J, et al. Photonic crystal fiber and laser [J]. Laser Technology 2004, 28(1): 48-51 (in Chinese).
- [8] XIE Y M, LIU ZH D, WANG H Q. Local defect modes in photonic crystals with negative refractive index structural defects [J]. Laser Technolgy 2006, 30(2): 195-197 (in Chinese).
- [9] DU G Q, LIU N H. Optical transmission spectra of one-dimensional photonic crystals with mirror symmetry [J]. Acta Physica Sinica 2004, 53(4): 1095-1098 (in Chinese).
- [10] TANG J F, GU P F. Optics and technology of thin films [M]. Beijing: China Machine Press, 1987: 31-41 (in Chinese).

• 简讯 •

请向邮局订阅 2009 年度《激光技术》

国内统一刊号: CN51-1125/TN 邮发代号: 62-74