

文章编号: 0258-7025(2009)06-1535-04

含复介电常数一维光子晶体的滤波特性

苏安^{1,2} 高英俊¹

(¹ 广西大学物理科学与工程技术学院, 广西 南宁 530004; ² 河池学院物理与电子工程系, 广西 宜州 546300)

摘要 利用传输矩阵法计算模拟了一维光子晶体(ABCBA)_m 的透射谱, 当介电常数为实数时, 光子晶体透射谱出现有规律性的共振透射峰, 具有多通道光滤波的特性; 当 C 层介质中掺入增益特性的杂质时, 透射峰出现多条合一现象, 且当周期数 m 为奇数时, 出现透射率恒为 $0.05\omega/\omega_0$ 的透射衰减现象, 当周期数 m 为偶数时出现高达 10^4 数量级的透射增益现象, 增益的强度与重复周期数 m 和 C 层折射率的虚部大小密切相关。这些现象为光子晶体实现单通道光滤波器、多通道光滤波器和光放大器提供理论指导。

关键词 光子晶体; 复介电常量; 透射增益

中图分类号 O734 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093606.1535

Filter Characteristics of One-Dimensional Photonic Crystal with Complex Dielectric Constant

Su An^{1,2} Gao Yingjun¹

(¹ Department of Physical Science and Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)
(² Department of Physics and Electronic Engineering, Hechi University, Yizhou, Guangxi 546300, China)

Abstract The transmission spectra of one-dimensional photonic crystal (ABCBA)_m are calculated by means of the transfer matrix method. As the dielectric constant is a real number, the transmission resonance spectrum in photonic crystals is of multi-channel optical filtering properties. When the C medium is added with active matter, there is only one resonance peak. If the number of m is an odd, the rate of transmission is 0.05 at ω/ω_0 . If the number of m is even, then the rate is up to 10^4 . The strength of the gain is closely related to the number of m and the value of the imaginary part. It provides theoretical guidance for designing new photonic instrument with properties of single-channel optical filter, multi-channel optical amplifiers and filters.

Key words photonic crystal; complex dielectric constant; transmission gain

1 引言

自 20 世纪 80 年代末提出光子晶体概念以来^[1,2], 人们对光子晶体进行了大量的研究。光子晶体最根本的特征是具有类似于电子半导体能带结构的禁带——光子禁带, 频率落在禁带中的光被禁止传播^[3,4]。光子禁带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, 增加相应频率光子的态密度, 对应频率处的受激辐射将得到增强^[5~8]。因此, 利用光子禁带对自发辐射的抑制

作用, 可设计出滤波器^[9,10]、激光二极管^[11~13]和激光器^[14,15]等。本文针对(ABCBA)_m 模型光子晶体, 利用传输矩阵法^[3,5,7,8,16]通过 Matlab 软件编程, 分别对其在实介电常数和复介电常数的情况下的透射谱进行数值计算模拟, 结果呈现出一些新异而有实际意义的物理现象, 表明在光子晶体中掺入激活杂质, 对光子晶体实现高效光放大、光子晶体激光器和高效光滤波等方面具有广泛的应用前景。

收稿日期: 2008-12-29; 收到修改稿日期: 2009-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(50661001, 50061001)和广西科学基金(0832029, 0991026, 0639004)资助课题。

作者简介: 苏安(1973-), 男, 硕士研究生, 讲师, 主要从事光子晶体理论和特性方面的研究。

E-mail: suan3283395@163.com

导师简介: 高英俊(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电子材料的结构与物理性能方面的研究。

E-mail: gaoyj@gxu.edu.cn

2 光子晶体模型及传输矩阵

2.1 光子晶体模型

光子晶体模型(ABCBA)_m如图1所示,分别选取A层,B层和C层介质的厚度和介电常数取值如下: $d_A = 740 \text{ nm}$, $d_B = 1329 \text{ nm}$, C的光学厚度等于A的光学厚度, $n_A = 2.6$; $n_B = 1.45$; $n_C = 1.8 + k$; k 为吸收系数, m 可为任意正整数。

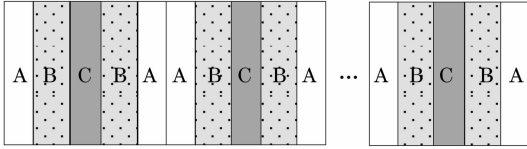


图1 一维光子晶体(ABCBA)_m的结构

Fig. 1 Structure of 1D photonic crystals (ABCBA)_m

2.2 传输矩阵法

根据薄膜光学理论,电磁波在分层介质中的传输特性可用其传输矩阵来研究^[3,5,7,8,16],光通过任一层介质的传播可以用一个传输矩阵来表示,考虑TE波,传输矩阵为

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

式中 $\delta_j = \frac{2\pi n_j d_j \cos \theta_j}{\lambda}$, $\eta_j = \sqrt{\epsilon_0/\mu_0} n_j \cos \theta_j$ 。

对于有吸收的缺陷层结构,(1)式矩阵中折射率用复折射率 $\tilde{n}_j = n_j + ik$ 代入,则光通过一维光子晶体(ABCBA)_m内的传播行为可用总传输矩阵,即每一层传输矩阵相乘积的总矩阵表示为

$$\mathbf{M} = (\mathbf{M}_A \mathbf{M}_B \mathbf{M}_C \mathbf{M}_B \mathbf{M}_A)^m = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

进一步可得整个结构的反射系数和透射系数为

$$r = \frac{m_{11} \eta_0 + m_{12} \eta_0 \eta_l - m_{21} - m_{22} \eta_l}{m_{11} \eta_0 + m_{12} \eta_0 \eta_l + m_{21} + m_{22} \eta_l}, \quad (3)$$

反射率 $R = |r|^2$

$$t = \frac{2}{m_{11} \eta_0 + m_{12} \eta_0 \eta_l + m_{21} + m_{22} \eta_l}, \quad (4)$$

透射率 $T = |t|^2$ 。式中 η_0 和 η_l 分别为入射介质和出射介质的磁导率。此处认为光子晶体处于空气之中,则 $\eta_0 = \eta_l = \sqrt{\epsilon_0/\mu_0}$ 。

3 计算模拟结果与分析

3.1 含实介电常数光子晶体的透射谱

考虑光垂直于介质表面入射($\theta = 0$),当吸收系数 $k = 0$,即介质C的介电常数为正实数,其他参数不变的情况下, m 从3递增到6时(此处 m 从3取值,是考虑到当光子晶体的重复周期数达到3以上时禁

带形状相对稳定),用传输矩阵方法,通过MATLAB编程软件计算模拟一维光子晶体(ABCBA)_m的光子能带透射谱,结果如图2所示。

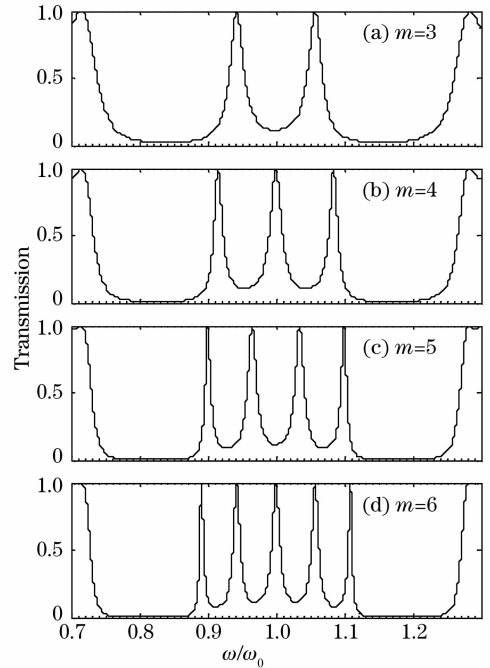


图2 实介电常数光子晶体(ABCBA)_m的透射谱
Fig. 2 Transmission spectrum for photonic crystals (ABCBA)_m with real dielectric constant

从图2可知,当介质的介电常数为实数时,一维光子晶体(ABCBA)_m在一个 $0.74 \sim 1.26 (\omega/\omega_0)$ 的禁带中出现有规律的共振透射峰,且透射峰分布于中心频率 $1.0 (\omega/\omega_0)$ 周围,透射峰的数目随着光子晶体的重复周期数 m 的变化而变化,并等于 $m-1$ 。其成因为,当 $m=3$ 时,光子晶体可表示为 ABCBA \square ABCBA \square ABCBA,即分别在第5层和第6层介质之间、第10层和第11层介质之间形成了两处空位缺陷,此两处缺陷出现相应的缺陷模即透射峰,当以C介质置入此两处计算模拟时,将得到一个很宽没有透射峰的禁带可验证。 $m=4,5,6$ 等形成的透射峰可依次类推。则实介电常数情况下此光子晶体模型为实现可调多通道滤波器提供理论设计依据。

3.2 含复介电常数光子晶体的透射谱

当吸收系数 $k = -2.314$,即介质C的介电常数含复虚部,其他参数不变的情况下, m 从3递增到10时,一维光子晶体(ABCBA)_m的能带透射谱如图3所示。从图3可见,在光子晶体(ABCBA)_m的C层介质中掺入激活杂质后,光子晶体的透射谱出现了一些新异的现象:从实介电常数到复介电常数的透射峰多条合一现象,即由实介电常数情况下的

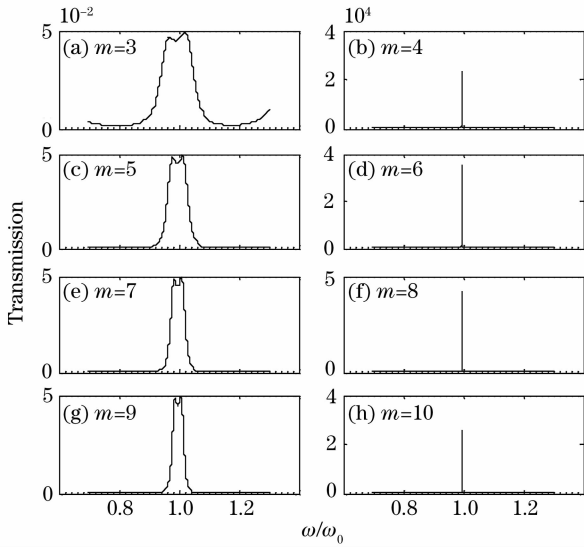


图 3 含复介电负虚部介质光子晶体(ABCBA)_m 的透射谱
 Fig.3 Transmission spectrum for photonic crystals (ABCBA)_m with dielectric constant with negative imaginary part

多条透射峰一律合并为复介电常数情况下的单透射峰,且单透射峰都居于中心频率 1.0(ω/ω₀)附近;当光子晶体重复周期数 *m* 为奇数时,出现透射衰减现象,表现为透射率恒为 0.05(ω/ω₀)的透射带,透射带对称分布于中心频率两侧,且随着 *m* 的奇数递增,透射带的带宽变窄;当光子晶体的重复周期数 *m* 为偶数时,出现透射增益现象,表现为高达 10⁴ 数量级的倍增强度窄透射峰,增益强度与重复周期数 *m* 和 C 层折射率虚部数值大小密切相关,且随着 *m* 的偶数递增,透射峰向高频微弱移动。这些现象为光子晶体实现单通道光滤波器和单通道光放大器提供理论设计指导。

3.3 周期数 *m* 对光子晶体透射率的影响

保持 3.2 节的参数,当光子晶体的重复周期数 *m* 从 1 到 32 依次递增时,计算可得光子晶体

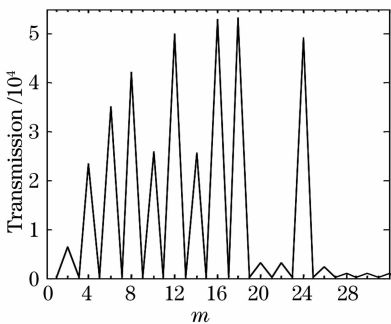


图 4 光子晶体透射率随周期数 *m* 的变化
 Fig. 4 Transmittance spectrum versus the layer number *m* of photonic crystal

(ABCBA)_m 的能带透射峰峰值随重复周期数 *m* 的变化曲线如图 4 所示。*m* 为奇数时,峰值一直保持 0.05(ω/ω₀)的透射率,*m* 为偶数时出现波动范围比较大的透射增益现象,但峰值都远远高于 *m* 为奇数时的峰值,且当 *m* 等于 16 和 18 时增益最强,达到 5.3 × 10⁴。

3.4 复介质负虚部 *k* 大小对透射谱的影响

取光子晶体重复周期数 *m* = 12,在其他参数不变的情况下,当吸收系数 *k* 绝对值从 0 到 3 变化时,光子晶体(ABCBA)₁₂的透射峰随 *k* 的大小变化曲线如图 5 所示。从图 5 可知,随着 *k* 值的增大,在 0.200 和 2.300 附近出现比较明显的增益现象,当 *k* 的大小为 2.309 时,在中心频率 1.0(ω/ω₀)处出现最强的单峰增益现象,达到 1.15 × 10⁵ (ω/ω₀) 倍增。

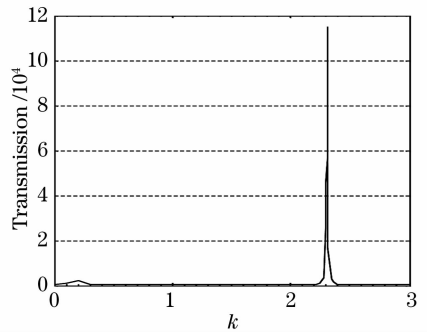


图 5 复介质负虚部 *k* 大小对透射谱的影响
 Fig. 5 Transmission spectrum versus the negative imaginary part of dielectric constant *k*

4 结 论

利用传输矩阵法计算模拟了一维光子晶体(ABCBA)_m的透射谱,当介电常数为实数时,光子晶体透射谱出现与光子晶体重复周期数 *m* - 1 数值对应的共振透射峰,具有可调多通道光滤波的特性。

当光子晶体含有复介质负虚部后,透射峰出现多条合一现象,单透射峰处于中心频率 1.0(ω/ω₀)处或中心频率处周围,且当周期数 *m* 为奇数时,出现透射率恒为 0.05(ω/ω₀)的透射衰减现象;当周期数 *m* 为偶数时出现透射增益现象,增益的强度与重复周期数 *m* 和虚部数值大小密切相关;当 *m* = 18 时增益达到最强,当 *m* = 12,负虚部大小等于 2.309 时出现增益极大值;随着 *m* 按偶数递增,出现单透射峰微小地向高频移动现象。该光子晶体模型及其光学传输特性可为光子晶体实现单通道光滤波器、多通道光滤波器和光放大器提供理论指导。

参 考 文 献

- 1 E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and elect ronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 2 S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super-lattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 3 Tong Kai, Cui Weiwei, Li Zhiquan. Strain-measurement of one-dimensional photonic crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 837~840
童 凯, 崔卫卫, 李志全. 一维光子晶体的应变测量[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 837~840
- 4 Yin Jianling, Huang Xuguang, Liu Songhao. A variable optical attenuator based on the photonic crystal waveguide[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5): 671~674
殷建玲, 黄旭光, 刘颂豪. 光子晶体波导可调光衰减器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 671~674
- 5 Xu Yulong, Hao Qinghai, Su Xiyu. The research on the properties of one-dimension photonic crystal with the imaginary part of complex dielectric constant [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2006, **12**(2): 109~112
许玉龙, 郝清海, 苏希玉. 具有复介电常量一维光子晶体的特性研究[J]. *量子光学学报*, 2006, **12**(2): 109~112
- 6 Lou Shuqin, Wang Zhi, Ren Guobin *et al.*. The research on the properties of two-dimensional photonic with the imaginary part of dielectric constant[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 313~318
娄淑琴, 王 智, 任国斌 等. 具有复介电常量二维光子晶体的特性研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 313~318
- 7 Chen Xianfeng, Shen Xiaoming, Jiang Meiping *et al.*. Studies on the defect mode properties of 1D photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1877~1880
陈宪锋, 沈小明, 蒋美萍 等. 一维光子晶体的缺陷模特性研究 [J]. *光子学报*, 2005, **34**(12): 1877~1880
- 8 Chen Haibo, Gao Yingjun, Hu Sumei. Properties of 1D three element photonic crystals with an imaginary part of dielectric constant defect[J]. *Laser & Infrared*, 2008, **38**(6): 594~596
陈海波, 高英俊, 胡素梅. 具有复介电缺陷一维三元光子晶体禁带特性的研究[J]. *激光与红外*, 2008, **38**(6): 594~596
- 9 Liu Jing, Zheng Zhiqiang, Feng Zhuohong *et al.*. Tunable optical filter based on two-dimensional heterostructure photonic crystal with neighboring dot-defects and curved waveguide [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 2034~2037
刘 璟, 郑志强, 冯卓宏 等. 二维异质结光子晶体中含近邻点缺陷的弯曲波导的可调谐滤波特性[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 2034~2037
- 10 Meng Qingsheng, Ouyang Zhengbiao, Wang Jong C *et al.*. Mode types and their related properties of one-dimensional photonic crystal resonant cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1290~1294
孟庆生, 欧阳征标, 王仲淳 等. 一维光子晶体谐振腔的模式类型及其性质[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1290~1294
- 11 H. Hirayama, T. Hamano, Y. Aoyagi. Novel surface emitting laser diode using photonic band-gap crystal cavity [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**(5): 791~793
- 12 E. Chow, S. Y. Liu, S. G. Johnson *et al.*. Three-dimensional control of light in a two-dimensional photonic crystal slab [J]. *Nature*, 2000, **407**(6807): 983~986
- 13 F. Yanikm, S. Fan. All-optical trnsnsitor action with bistable switching in a photonic crystal cross-waveguide geometry [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(24): 2506~2508
- 14 O. Panter, K. Leer, A. Scherer *et al.*. Two-dimensional photonic band-gap defect mode laser [J]. *Science*, 1999, **284**(5421): 1819~1821
- 15 Benistyh, C. Weisbuch, S. Olivier *et al.*. Low-loss photonic-crystal and monolithic in pintegration: bands, bend, lasers, filters[C]. *SPIE*, 2004, **5360**: 119~128
- 16 Wang Hui, Li Yongping. An eigen matrix method for obtaining the band structure of photonic crystals [J]. *Acta Physica*, 2001, **50**(11): 2172~2174
王 辉, 李永平. 用特征矩阵法计算光子晶体的带隙结构[J]. *物理学报*, 2001, **50**(11): 2172~2174