

文章编号: 1001-3806(2010)03-0398-03

对称双缺陷光子晶体的缺陷模规律

马 骥, 黄正逸, 沈小明, 陈宪锋

(江苏工业学院 数理学院, 常州 213164)

摘要: 为了了解对称双缺陷光子晶体的传输特性, 采用传输矩阵法进行了数值模拟研究。当两缺陷层中间的介质层数目大于缺陷两外侧介质层总数时, 在禁带中只出现单一的缺陷模, 且其透射率随它们的差异的增大而迅速减小; 但当中间的介质层数目小于两外侧介质层总数时, 在禁带中将会出现两个透射率为 1 的缺陷模, 且两缺陷模的间距随它们的差异的增大而增大。结果表明, 缺陷层的位置对缺陷模的影响较大, 要使缺陷层中的局域电场得到有效提高, 必须使缺陷层靠近光子晶体的正中心。

关键词: 物理光学; 光子晶体; 缺陷模; 传输矩阵

中图分类号: O431.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.03.032

Defect modes of photonic crystal with symmetric double defects

MA Ji, HUANG Zheng-yi, SHEN Xiao-ming, CHEN Xian-feng

(School of Physics and Mathematics, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213164, China)

Abstract: In order to learn the propagating characteristics of the photonic crystal with symmetric double defects, they were studied by means of transfer matrix. It is found that location of defect layers significantly affects the defect mode. If the number of dielectric layers between the two defect layers is greater than the total number of dielectric layers outside the two defect layers, only one single defect mode exists in the band gap and its transmittance reduces rapidly as the difference between the two numbers increases. However, if the number of dielectric layers between the two defect layers is less than the total number of dielectric layers outside the two defect layers, two defect modes with transmittance of 1 exist in band gap and the distance between the two defect modes increases as the difference of the two numbers increases. The spatial electric field distribution of defect mode was also discussed. In order to effectively enhance the electric field in the defect layers, the double defect layers must be close to the center of photonic crystal.

Key words: physical optics; photonic crystal; defect mode; transfer matrix

引言

光子晶体是由介电常数(或折射率)周期性变化排布的材料, 具有光子带隙特征^[1]。与半导体掺杂相类似, 在光子晶体中引入缺陷, 可以在禁带中出现局域的缺陷模, 与该缺陷模频率共振的光可以隧穿过光子晶体^[2]。若光子晶体中含有多个缺陷层, 则在禁带中出现多个缺陷模, 缺陷模的数目等于光子晶体中的缺陷层数目^[3-7]。通过调节光子晶体的有关结构参量, 可以对缺陷模的位置继续调节, 利用这一特性可设计多通道滤波器、宽带滤波器。

作者设计了一个具有对称双缺陷的光子晶体, 利用传输矩阵法^[8]研究了它的透射特性。发现缺陷层的位置对缺陷模的影响较大, 并不是在禁带中一定会出现缺陷模, 只有满足一定的条件时才会在禁带中出现两个缺陷模。并由此研究了缺陷模的有关规律, 以及缺陷层中的电场分布。

1 模型与计算方法

先设计一个由 A, B 两种不同介质交替排列构成的对称光子晶体 ABAB...ABA, 具有奇数 $(2K-1)$ 个介质层, 再将其中对称的两层(即第 $K \pm i$ 层, $1 \leq i < K-1$, 它们同为介质 A 或 B)替代为第 3 种介质 D。设介质层 A, B 的折射率分别为 n_1 和 n_2 , 光学厚度为 $n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda_0/4$, λ_0 为中心波长; 缺陷层 D 的折射率为 n , 厚度为 d , 光学厚度 $nd = \lambda_0/2$, 即为半波缺陷层。这就是作者研究的对称双缺陷光子晶体。

当波长为 λ 的光波入射到该光子晶体时, 每一个

基金项目: 江苏省高校自然科学基金基础研究面上资助项目(07KJD140036); 江苏工业学院理工扶持基金资助项目(JS200802)

作者简介: 马 骥(1979-), 男, 讲师, 主要从事光学材料方面的研究。

E-mail: angelo_ma@sina.com

收稿日期: 2009-05-14; 收到修改稿日期: 2009-07-10

介质层 j 的传输矩阵为:

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos\delta_j & -\frac{i}{\eta_j}\sin\delta_j \\ -i\eta_j\sin\delta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix} \quad (1)$$

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

(TE) 或 $\eta_j = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot \frac{n_j}{\cos\theta_j}$ (TM), θ_j 是光线在第 j 层介质

上的折射角, ϵ_0 和 μ_0 为真空中的介电常数和磁导率。将每一个介质层的传输矩阵依次连乘, 就得到整个 1

维光子晶体的总传输矩阵 $M = M_1 M_2 M_3 \dots = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$ 。

光子晶体的透射率:

$$T = \frac{4\eta_0\eta_g}{|\eta_0 a + \eta_0 \eta_g b + c + \eta_g d|^2} \quad (2)$$

式中, η_0, η_g 为光子晶体的两外侧介质导纳。

2 结果与讨论

取 $K=16$, 即缺陷光子晶体的总层数是 31 层为例进行数值模拟, 计算中 $n_1=1.5, n_2=2.5, n=2$, 外侧空气 $n_0=n_g=1$, 中心波长 $\lambda_0=1.50\mu\text{m}$, 光波垂直射向光子晶体。

定义一个参量 S , 为两缺陷层之间的介质层数目与缺陷两外侧介质层总数目的差值, 该参量 S 可以表征缺陷层在光子晶体中的位置。

2.1 缺陷模规律

数值模拟计算表明, 随着缺陷层位置的不同, 即 S 的不同, 该光子晶体在禁带中出现的缺陷模规律将不同。图 1 绘出了不同 S 时的透射谱。研究发现, 当

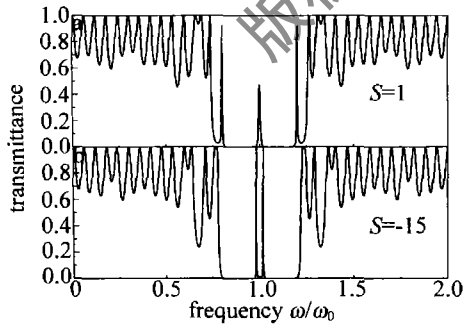


Fig. 1 Transmission spectra of photonic crystal

$S > 0$ 时在禁带中出现的缺陷模不是两个, 而是一个, 且其透射率小于 1; 只有当 $S < 0$ 时才会出现在禁带中出现两个透射率为 1 的缺陷模。

为了清晰看出不同 S (大于 0) 时在中心频率 ω_0 处出现的单一缺陷模的变化规律, 图 2 中绘出了 S 分别为 1, 5, 9 时的透射谱。可以发现, 随着 S 的增大, 即左右对称的缺陷层位置越来越远离光子晶体的正中

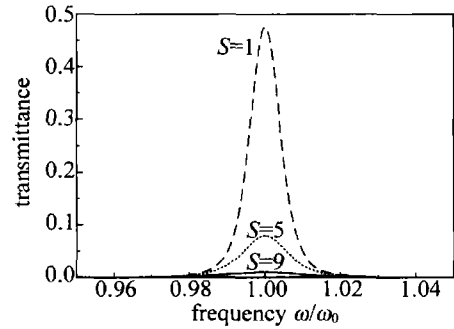


Fig. 2 Influence of S on the single defect mode

心, 在中心频率 ω_0 处出现的缺陷模的透射率愈来愈小, $S > 9$ 时已经小于 0.01, 也就是说, 在光子晶体的禁带中不会出现缺陷模。

单一缺陷模的这一变化可以这样解释, 以 $S=5$ 为例, 在两缺陷层的最外侧各有 6 层介质, 而在两缺陷层之间却有 17 层介质。可以将 17 分成 $6+5+6$ 3 段, 整个光子晶体可以看成左边 13 层 (ABABABDBABABA)、右边 13 层、中间 5 层 (BABAB)。左右的两个 13 层可以视为两个 F-P 结构, 它们均可以透过频率为 ω_0 的共振模, 但该共振模却位于中间 5 层结构的禁带中。对于中间结构的光子晶体 (层数即为 S), 频率为 ω_0 的光波的透射率随 S 的增大而快速减小 (禁带加深)。这就理解为什么 $S=1$ 时单一缺陷模 ω_0 的透射率最大, 约为 0.5; 而当 S 较大时透射率趋于 0。

相反, 当 $S < 0$ 时将在禁带中出现两个透射率为 1 的缺陷模。随着 S 负值的增加, 这两个以中心频率 ω_0 对称的缺陷模之间的劈裂也就越大, 如图 3 所示。缺

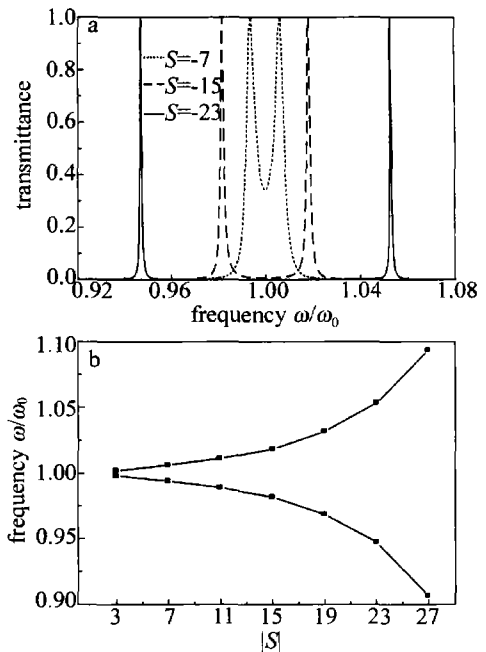


Fig. 3 Influence of S on the splitting defect modes

陷模的这种劈裂现象, 可以借助固体物理中的紧束缚方法来加以分析^[9-11]。在紧束缚理论中, 左右的两个

缺陷层中的局域态存在着相互作用。当缺陷层相隔较远时,它们之间的相互作用较弱,导致简并的缺陷模产生很弱的劈裂现象;但随着两缺陷层的靠近(相当于 S 的负值越来越大),不同缺陷间的相互作用将逐渐加强,导致缺陷模劈裂现象愈来愈明显,出现图3所示的结果。

2.2 缺陷模的电场分布

当入射电磁波以缺陷模频率入射时,电磁场能量将在缺陷层处高度局域,这是光子晶体的另一个基本特性^[2]。利用这一特性,若在缺陷处引入非线性介质,将产生较强的非线性效应,可以用来抑制或增强自发辐射,或制造高效率 and 零阈值的激光器、高品质的激光谐振腔^[12]等。为此,作者研究了光子晶体中缺陷模的电场分布情况。

首先研究了单一缺陷模频率的电磁波在光子晶体中的传播,图4中绘出了不同 S 时的电场振幅平方的

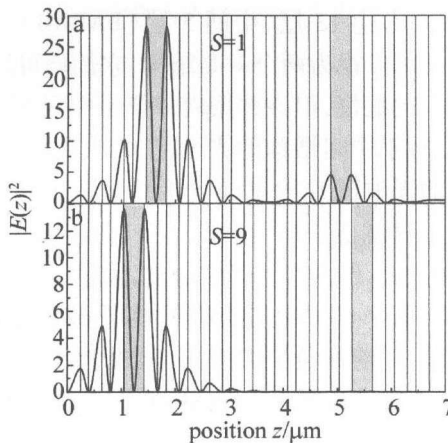


Fig. 4 Electric field distribution of single defect mode

分布规律,已将入射电场振幅归一化为1。可以看出,随着 S 的增加,即缺陷层越来越远离正中心,缺陷层(图4中的灰色区域)中的局域电场的强度将逐渐降低,特别是第2个缺陷层中的电场,较第1个缺陷层的下降将愈加明显,导致该缺陷模的透过率急剧下降,以致于不能透过光子晶体。

当 $S < 0$ 时缺陷模的电场分布如图5所示,计算中

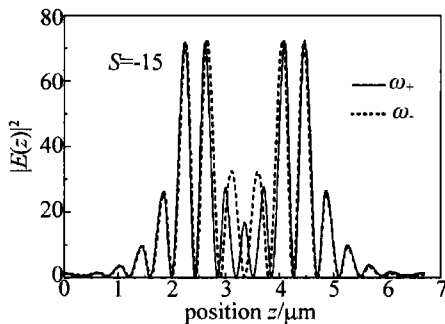


Fig. 5 Electric field distribution of splitting defect modes

劈裂的两个缺陷模频率取自图3,同样入射电场振幅

归一化为1。可以发现,较高频率 ω_+ 缺陷模的电场分布具有偶宇称特征,而较低频率 ω_- 的电场分布具有奇宇称特征。这就是说,在紧束缚理论中, ω_+ (ω_-)是两个缺陷的局域模相互作用而耦合成的对称模(反对称模)。由图5还可以发现,这两个不同的缺陷模在缺陷层处的局域电场的强度几乎是一样的。

图6中给出了不同 S 时,局域模在缺陷层处电场

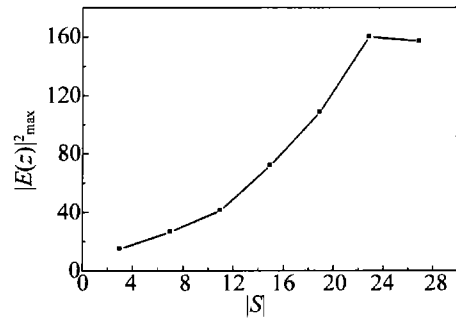


Fig. 6 Enhanced factor of electric field square in defect layers with different S 振幅平方的最大值的变化规律。可以发现,随着 S 负值的增加(两缺陷层逐渐靠近),缺陷层处的局域电场逐渐增强。当 $S = -23$ (两缺陷层之间只有3个介质层)时,局域电场的强度最强,当 $S = -27$ (两缺陷层之间仅剩1层)时略有降低。这从图3可以看出,当 $S = -27$ 时,缺陷模的劈裂最大,已接近禁带的边缘,两缺陷层外侧的部分(可视为14层介质的光子晶体)对电磁波的遏制作用减弱,使得缺陷层中的局域电场的强度反不如 $S = -23$ 时的情形。

3 结论

利用传输矩阵法研究了对称双缺陷光子晶体的传输特性。发现缺陷层的位置对缺陷模的影响较大,当两缺陷层中间的介质层数目大于缺陷两外侧介质层总数目时,在禁带中只出现单一的缺陷模,且其透射率随它们的差异的增大而迅速减小;只有当中间的介质层数目小于两外侧介质层总数目时,才会在禁带中出现两个透射率为1的缺陷模。还研究了缺陷模的空间电场分布,要使缺陷层中的局域电场的强度较大,必须使缺陷层靠近光子晶体的正中心。

参考文献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58 (20): 2059-2062.
- [2] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58 (23): 2486-2489.
- [3] FANG Y T, SHEN T G, TAN X L. Study on one dimensional photonic crystal with impurity defect [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24 (11): 1557-1560 (in Chinese).

(下转第404页)

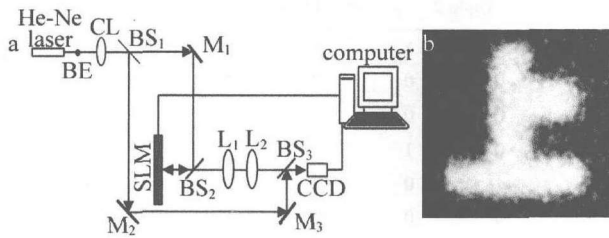


Fig. 4 Setup and result of optical experiment

a—setup of optical experiment b—result of optical experiment

两路,一路经过平面反射镜 M_2 和 M_3 作为参考光;另外一路经 M_1 和 BS_2 照射到 SLM 上,由于 SLM 上显示的是的 $d(x,y)e(x,y)$,所以经 SLM 反射调制后的光为 $e_p(x,y)d_p(x,y)$,最后经 L_1 和 L_2 组成的 $4f$ 系统成像到 CCD 上,与参考光干涉获得解密图像如图 4b 所示。

3 结论

从以上理论分析和实验结果表明,基于干涉的二值图像逻辑恢复算法加密技术是可性的。与以往方法相比,加密过程非常方便,完全可以在计算机中完成;解密原理和系统设置简单,不需要系统精确对准,容易实现。由于采用的是一幅特定图像作为加密后的图像,再加上多重密匙认证,安全性能非常高。

参考文献

- [1] REFREGIER P, JAVIDI B. Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding [J]. *Opt Lett*, 1995, 20 (7):767-769.
- [2] TAKANORI N, BAHRAM J. Optical encryption using a joint transform correlator architecture [J]. *Opt Engng*, 2000, 39 (8): 2031-2035.
- [3] CARNICER A, MONTES-USATEGUI M, ARCOS S, *et al.* Vulnerability to chosen-cyphertext attacks of optical encryption schemes based on double random phase keys [J]. *Opt Lett*, 2005, 30 (13): 1644-1646.
- [4] MOGENSEN P C, IUCKSTAD J. A phase-based optical encryption system with polarization encoding [J]. *Opt Commun*, 2000, 173 (1): 177-183.
- [5] HAN J W, PARK C S, RYU D H, *et al.* Optical image encryption based on XOR operations [J]. *Opt Engng*, 1999, 38 (1): 47-54.
- [6] LI R, LI P. Research on the image security in double random phase real-value encryption [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34 (6): 952-955 (in Chinese).
- [7] LI R, LI P. Real-value encryption for optical security system based on holography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37 (5): 957-959 (in Chinese).
- [8] DENG X P, ZOU K. Optical image encryption using one random phase mask based on spotlight illumination in the Fresnel domain [J]. *Laser Technology*, 2006, 30 (4): 442-444 (in Chinese).
- [9] DENG X P, ZOU K. Optical image encryption using one random phase mask based on spotlight illumination in the Fresnel domain [J]. *Laser Technology*, 2006, 30 (3): 327-328 (in Chinese).
- [4] DU G Q, LIU N H. Optical transmission spectra of one dimensional photonic crystals with a mirror symmetry [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53 (4): 1095-1097 (in Chinese).
- [5] CHEN X F, JIANG M P, SHEN X M, *et al.* The defect modes in one-dimensional photonic crystal with multiple defects [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57 (9): 5709-5712 (in Chinese).
- [6] DONG H X, JIANG H T, YANG C Q, *et al.* Properties of impurity band in one-dimensional photonic crystal coupled-resonator containing defect layers with negative refractive index [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55 (6): 2777-2780 (in Chinese).
- [7] JIN Y, HUANG ZY, 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).
- [8] JIANG M P, JIANG X F, SHEN X M, *et al.* Study on the polarization property of 1-D photonic crystals [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, 22 (4): 612-616 (in Chinese).
- [9] BAYINDIR M, TEMELKURAN B, OZBAY E. Tight-binding description of the coupled defect modes in three-dimensional photonic crystals [J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 84 (10): 2140-2143.
- [10] BAYINDIR M, TANRISEVEN S, OZBAY E. Propagation of light through localized coupled-cavity modes in 1-D photonic band-gap structures [J]. *Appl Phys*, 2001, A72 (1): 117-119.
- [11] XIE Y M, LIU Zh D. Local defect modes in photonic crystal with a number of structural defects [J]. *Laser Journal*, 2005, 26 (6): 34-36 (in Chinese).
- [12] VILLENEUVE P R, FAN S, JOANNOPOULOS J D. Microcavities in photonic crystals: mode symmetry, tenability, and coupling efficiency [J]. *Phys Rev*, 1996, B54 (11): 7837-7842.

(上接第 400 页)