

# 基于数值模拟技术的光子晶体点缺陷透射特性分析

赵年顺 官骏鸣

黄山学院机电与信息工程学院, 安徽 黄山 245041

**摘要** 采用基于时域有限差分技术的数值模拟方法,研究了二维正方晶格光子晶体点缺陷的透射谱。研究发现,减小或增大砷化镓介质棒半径均可以在能量禁带中形成缺陷模,且存在一一对应的关系,它们半径不同但具有相同的谐振频率。进一步发现两类缺陷场分布存在差异,减小缺陷半径会形成单模,增大缺陷半径会形成双重简并模,继续增大缺陷半径会形成多模。此外也发现两类缺陷对入射光的响应不同,前者对电场强度不敏感而后者反应明显。

**关键词** 光学器件; 光子晶体; 时域有限差分; 点缺陷; 谐振频率

中图分类号 TN252 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.042302

## Analysis of Transmission Characteristics in Photonic Crystal Point Defects Based on Numerical Simulation Technology

Zhao Nianshun Guan Junming

*School of Mechanical Electronic and Information Engineering, Huangshan University,  
Huangshan, Anhui 245041, China*

**Abstract** Numerical simulations based on the finite-difference time-domain technique are performed to investigate the transmission spectrum of defects in the two-dimensional (2D) rectangular lattice photonic crystal. The results show that the defect modes within the band gap are created by either decreasing or increasing the radius of normal GaAs rods and there exists a one-to-one correspondence between the two defects which possess different radius but similar resonance. In addition, the defect modes generated by decreasing size are single modes while those created by increasing size are doubly degenerate modes or multimodes. More importantly, the former defects are insensitive to the intensity of electric field while the latter ones exhibit strong dependence on the intensity of electric field.

**Key words** optical devices; photonic crystal; finite-difference time-domain; point defect; resonant frequency

**OCIS codes** 230.3120; 050.1950; 260.2110; 250.6715; 130.5296

## 1 引言

光子晶体(PC)<sup>[1-3]</sup>是一种由介电材料周期性排列组成的微米级结构,受折射率周期性变化的影响,光在晶体中传播时受到周期性势场的调制,形成类似于半导体能带结构的光能量禁带<sup>[4]</sup>,该禁带能阻止某些频率段的光通过。光子晶体作为控制光流动的平台,可以被用来制作各类光学器件如光开关<sup>[5]</sup>、滤波器<sup>[6]</sup>,而通过破坏光子晶体的周期性引入点缺陷,可以在光能量禁带中形成缺陷模,使原本不能传播的光经由缺陷传播<sup>[7-8]</sup>。点缺陷的应用更加广泛,它被认为是未来全光通信的核心,利用这一特性全光二极管<sup>[9]</sup>、激光器<sup>[10]</sup>、双稳器件<sup>[11-12]</sup>都可以被制作出来。因此对点缺陷的研究便成为光子晶体研究领域的一个重要方向。

目前针对点缺陷的研究主要集中在采用各类理论分析方法对缺陷结构进行运算分析<sup>[13-15]</sup>,分析重点是材料折射率对缺陷模的影响。本文利用时域有限差分(FDTD)技术<sup>[16]</sup>,通过软件模拟的方法完整地分析了点缺陷半径与缺陷模谐振频率的关系,发现光子晶体中存在三类不同性质的缺陷模,此外也研究了其中两类缺陷模的特点和差异性。

收稿日期: 2013-10-25; 收到修改稿日期: 2013-12-11; 网络出版日期: 2014-03-11

基金项目: 安徽省高校优秀青年人才基金(2009SQRZ167)、安徽省高校省级自然科学基金项目(KJ2009B114)、黄山学院校级科研项目(2007xkj010)

作者简介: 赵年顺(1981—),男,硕士,助教,主要从事光子晶体器件方面的研究。E-mail: 289177074@qq.com

## 2 物理模型与数值模拟

光子晶体的基本结构如图1所示,这是一种由砷化镓(GaAs)介质棒周期性分布于空气中构成的四方点阵结构,介质棒半径为 $0.2a$ , $a$ 为晶格常数,设 $a=1\ \mu\text{m}$ ,介质棒的线性折射率为3.4,空气的折射率为1。中间灰色介质棒表示将要引入点缺陷的位置,可以通过改变介质棒的半径引入点缺陷,设该介质棒半径为 $r$ 。

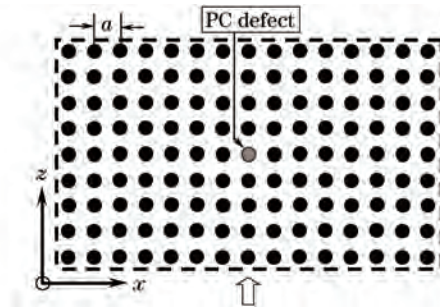


图1 光子晶体结构

Fig.1 Structure of photonic crystal

这种二维(2D)光子晶体结构简单且具有很宽的能量禁带。它的制备可以通过各类刻蚀技术实现,如分子束刻蚀技术、金属氧化物化学气相沉积和激光全息刻蚀技术。因此该结构在光子晶体研究领域被广泛使用。采用FDTD技术对该结构进行数值模拟,得该结构只存在TE模(电场平行于介质棒)能量禁带,从图2中可以看到,该光子晶体存在两个能量禁带,对应归一化频率分别为 $0.280\sim 0.440$ 和 $0.720\sim 0.740$ ,频率在能量禁带内的光波不能在光子晶体中传播,其中第一个能量禁带区域较宽,点缺陷的缺陷模将在这个能量禁带中形成。

改变结构中心位置介质棒的半径引入点缺陷,在缺陷处会形成一个量子化的束缚态,又称缺陷模,当原本处在能量禁带中的光能量与束缚态的能量一致时,便会发生谐振,使该禁带中的光能通过缺陷传播。运用FDTD技术对点缺陷进行数值模拟计算,计算时采用完美匹配层作为吸收边界,得到图3所示结果。

在图3中横轴表示缺陷的半径,纵轴表示能量禁带区域,圆点表示对应某缺陷半径的缺陷模谐振频率。由图可见,增大和减小缺陷的半径均可以在能量禁带中形成缺陷模,当缺陷半径减小时,缺陷模谐振频率的移动范围在 $0.280\sim 0.380$ 之间,且随着半径的减小,谐振频率逐渐增大。当半径为 $r=0$ 时,谐振频率为 $0.378$ 。另一方面增大缺陷的半径,缺陷模的谐振频率首先出现在禁带上边缘,然后随着缺陷半径的增大,谐振频率逐渐下移,直至移动到禁带的下边缘处。当半径超过 $0.475\ \mu\text{m}$ 时,缺陷模会出现多模形态,即缺陷区域存在多个极值点,缺陷模分裂成两个或以上的谐振透射峰。当半径超过 $0.554\ \mu\text{m}$ 时,缺陷模在整个禁带范围内均有分布,已看不出分布规律。这些现象产生的原因是因为光子晶体由折变介质材料周期排列构成,在缺陷处增加介质或提高介质的折射率,光局域在缺陷中谐振,其谐振频率会向低频方向移动,反之,谐振频率会向高频一侧移动。也就是说,在整个缺陷变化范围内,缺陷模有着三个不同的变化范围段,通过调节缺陷尺寸,可以选择性地使原本处在禁带中的特定频率的光波通过该器件。此外,值得注意的是,在减小

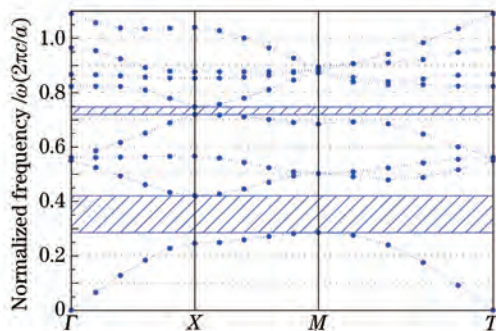


图2 光子晶体的光能量带隙结构

Fig.2 Optical energy band gap of photonic crystal

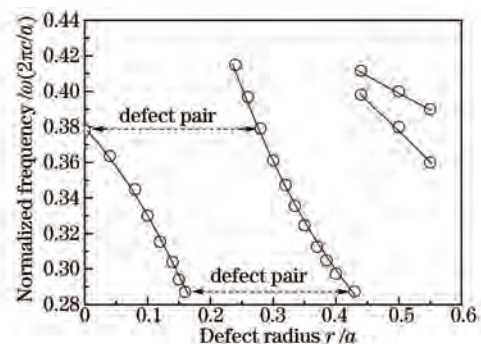


图3 二维光子晶体中谐振频率与缺陷半径的关系

Fig.3 Dependence of resonant frequency on defect size in 2D PC

或增大缺陷半径方向存在一一对应的缺陷模,它们半径不同但具有相同的谐振频率,对光频率的选通性相同。图3中奇模从半径为0直到半径为 $0.161\ \mu\text{m}$ 的范围内都能在偶模中找到这种对应关系。

### 3 两种缺陷模的透射谱和相位分布

接下来分析两种缺陷模的特点和区别。研究表明两类缺陷模虽然谐振频率相同但在特性上存在差异。在奇模段选择半径为0和 $0.031\ \mu\text{m}$ 的两个缺陷,对应具有相同谐振频率的缺陷半径分别为 $0.282\ \mu\text{m}$ 和 $0.289\ \mu\text{m}$ 。图4中给出了奇模中两个缺陷的透射谱,由图可知,缺陷模呈单峰形态,半径为0的缺陷谐振频率为0.378,而半径为 $0.031\ \mu\text{m}$ 的缺陷谐振频率为0.372。设入射光波的初相角为0,在探测器位置测得透射光波的相位分布也在图中标出,两个缺陷波峰处的相位均为 $\pi/2$ ,在数值模拟时发现,光能量主要集中在缺陷区域,在缺陷中心存在电场能量的最大值并向四周快速衰减。既然电场能量只在缺陷中心存在一个极值,则该缺陷模称为奇模形态。

与两缺陷一一对应的点缺陷 $0.282\ \mu\text{m}$ 和 $0.289\ \mu\text{m}$ 的透射谱在图5中给出,它们的透射谱与奇模中对应的缺陷基本相同,但相位分布存在明显差异。

图5(a)中半径为 $0.282\ \mu\text{m}$ 的缺陷模谐振频率0.378,这与半径为0的点缺陷谐振频率相同,但其线宽相对较宽,透射峰值有所下降,即品质因数 $Q$ 有所降低。同时也能看到半径为 $0.289\ \mu\text{m}$ 的缺陷模与图4中缺陷半径为 $0.031\ \mu\text{m}$ 的缺陷模一致,通过探测器可测得输出端的透射波相位分布,由图可以看到两个缺陷在谐振频率处的相位为0,另外在数值模拟时通过观察电场能量在缺陷区域的分布可以发现,电场强度在缺陷区域平面上存在两个极值,这种模式可成为双重简并的偶模形态。比较两缺陷的相位分布曲线可知,入射光在两种不同的缺陷中得到两种不同的相位模式,减小缺陷半径形成的是单模形态,增大缺陷半径形成的是双重简并模形态即偶模形态。继续增大缺陷半径,在缺陷区域内存在多个极值点,从透射谱上看有着多个独立的谐振频率,即多模形态。该结果可为点缺陷半径的选择提供参考。

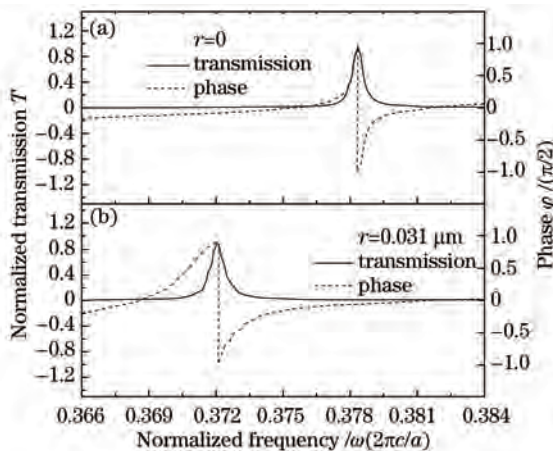


图4 半径为(a) 0和(b)  $0.031\ \mu\text{m}$  的缺陷模透射谱及相位分布曲线

Fig.4 Transmission and phase spectra of PC defects with radius (a)  $r=0$  and (b)  $r=0.031\ \mu\text{m}$

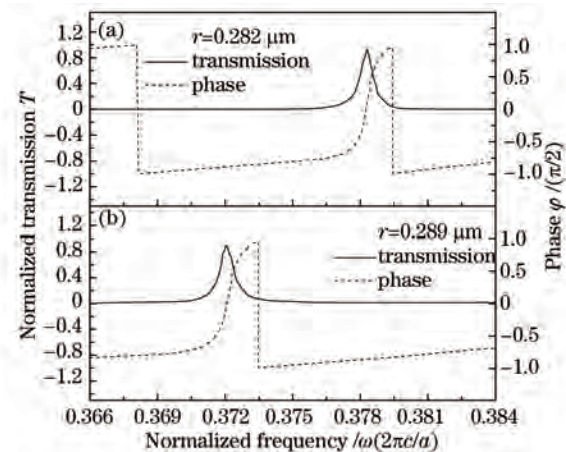


图5 半径为 $0.282\ \mu\text{m}$ 和 $0.289\ \mu\text{m}$ 的缺陷模透射谱及相位分布曲线

Fig.5 Transmission and phase spectra of PC defect with radius  $r=0.282\ \mu\text{m}$  and  $r=0.289\ \mu\text{m}$

### 4 缺陷模的非线性响应

当考虑缺陷材料的非线性因素时,两缺陷对入射光的应激响应也存在不同。制作介质棒选用的是具有Kerr非线性的GaAs材料,折射率 $n(x,z)=n_0+n_2E^2(x,z)$ ,其中 $n_0$ 为线性折射率, $n_2$ 是材料的非线性系数,取为0.01, $E(x,z)$ 表示局域的电场强度。当具有一定能量的光通过缺陷传播时,光能量集中在缺陷区域,在缺陷区域中存在电场分布,由上述关系式可知材料的折射率会增大,且随着光能量的增强折射率变得更大,而材

料折射率的变化直接导致缺陷模谐振频率的位移。

首先,分析半径为0和0.282  $\mu\text{m}$  的一对缺陷模非线性响应特性的差异。半径为0的缺陷模对入射光波不会有任何响应,这是因为在缺陷处只有空气介质,它没有非线性系数,故缺陷对电场强度不敏感,折射率不会发生改变,缺陷模也不会移动。

对于半径为0.282  $\mu\text{m}$  的点缺陷,选择功率分别为0.01、0.1、0.5  $\text{W}/\mu\text{m}^2$ 且频率在谐振频率处的光波入射并观察其透射行为。图6给出了数值模拟结果。

由图6可以看出,当功率为0.01  $\text{W}/\mu\text{m}^2$ 时,透射谱与线性情况一致。随着功率的增加,缺陷模的位置向低频方向移动,如在原谐振频率处的光波,它的透射率随功率的增强急剧下降。另外也能看到缺陷透射谱逐渐形成双峰,这是因为提高入射功率,在缺陷处的场强增大,缺陷的折射率变大,缺陷模会向低频方向移动,而该结果又导致入射光波透射率降低,缺陷处的场强变小,使得缺陷模又回移。因此,缺陷模的移动实际上是在起点与终点之间的动态移动,所得曲线是取平均值的結果。

再来分析半径为0.031  $\mu\text{m}$  和0.289  $\mu\text{m}$  的一对缺陷模的非线性响应特性。由图7可以看到,当功率为0.01  $\text{W}/\mu\text{m}^2$ 时,透射谱与线性情况一致。随着入射功率的增大,两缺陷模的差异越来越明显。半径为0.031  $\mu\text{m}$  的缺陷模对入射功率有响应,但响应程度不大,而半径为0.289  $\mu\text{m}$  的缺陷模非线性响应非常强烈,透射率下降很快且透射谱呈双峰形态,与图6中半径为0.282  $\mu\text{m}$  的缺陷比较可知,它对入射光更敏感。由此可见,光波经由非线性点缺陷传播时,缺陷模对光的敏感程度与缺陷半径有关,缺陷半径越小,介质折射率改变的范围越小,缺陷模非线性响应越弱,反之,缺陷半径越大,缺陷的非线性响应越强,缺陷模的变化越明显。

从以上分析可知,设计光器件时,若希望缺陷模受入射光的影响较小,如设计滤波器、分波器等,可以选择小尺寸的缺陷。若希望缺陷模在入射光源的激励下产生动态移动,如设计光敏开关、全光二极管等,可以选择大尺寸的缺陷。

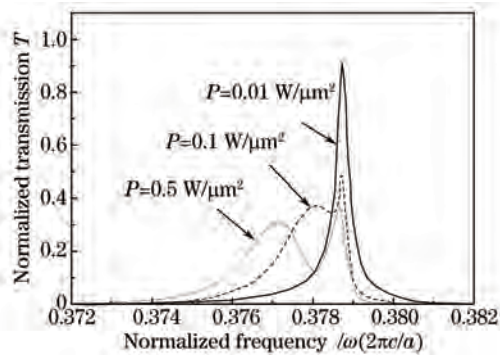


图6 半径为 $r=0.282 \mu\text{m}$ 的非线性点缺陷在不同功率光波入射下的透射谱

Fig.6 Transmission spectra of nonlinear PC defect at different excitation densities with radius  $r=0.282 \mu\text{m}$

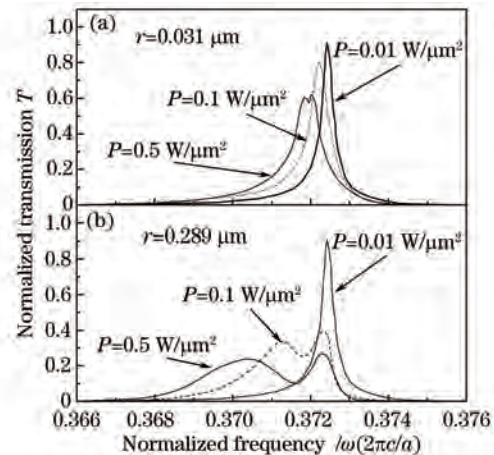


图7 半径为(a) 0.031  $\mu\text{m}$  和(b) 0.289  $\mu\text{m}$  的非线性点缺陷在不同功率光波入射下的透射谱

Fig.7 Transmission spectra of nonlinear PC defects at different excitation densities with radius (a)  $r=0.031 \mu\text{m}$  and (b)  $r=0.289 \mu\text{m}$

## 5 结 论

利用时域有限差分技术对点缺陷进行数值模拟,并分析了缺陷模随缺陷半径的变化规律和内在特性,发现减小或增大缺陷半径均可以在禁带中形成缺陷模,且在两变化方向上存在一一对应的具有相同谐振频率的缺陷模。选择半径为0和0.282  $\mu\text{m}$  的缺陷对以及半径为0.031  $\mu\text{m}$  和0.289  $\mu\text{m}$  的缺陷对作为研究对象,分析发现两类缺陷电场相位分布不同,奇模范围中的缺陷在透射峰值处的相位为 $\pi/2$ ,而偶模中的缺陷在透射峰值处的相位为0。此外,两类缺陷对入射光的响应也有差别,减小缺陷半径所得的缺陷模受入射光影响较小,而大尺寸的缺陷在入射光的激励下响应比较剧烈,设计者可以根据不同的目的和要求选择合适

尺寸的缺陷。

### 参 考 文 献

- 1 Yablonovith E. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059–2062.
- 2 Zhang Liang, Zhang Wei, Nie Qihua, *et al.*. Research progress of two-dimensional photonic crystal waveguides [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 030008.  
章 亮, 张 巍, 聂秋华, 等. 二维光子晶体波导研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(3): 030008.
- 3 Qu Lianjie, Yang Yuede, Huang Yongzhen. Slow-light characteristics of photonic crystal waveguides[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0113002.  
曲连杰, 杨跃德, 黄永箴. 光子晶体波导慢光特性研究[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0113002.
- 4 Ho K M, Chan C T, Soukoulis C M. Existence of a photonic gap in periodic dielectric structures[J]. Phys Rev Lett, 1990, 65(10): 3152–3155.
- 5 Ziolkowski R W, Tanaka M. FDTD analysis of PBG waveguides, power splitters and switches[J]. Optical and Quantum Electronics, 1999, 31(9): 843–855.
- 6 Wang Jizhou, Xiong Yuqing, Wang Duoshu, *et al.*. Filtering characteristics and application of defect mode of one-dimensional photonic crystal[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(10): 2914–2919.  
王济洲, 熊玉卿, 王多书, 等. 一维光子晶体缺陷模的滤波特性及应用研究[J]. 光学学报, 2009, 29(10): 2914–2919.
- 7 Feng Chen, Feng Guoying, Zhou Hao, *et al.*. Characteristic analysis on photonic crystal laser cavity with one-dimensional photonic bandgap[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0802009.  
冯 琛, 冯国英, 周 昊, 等. 一维光子带隙光子晶体激光腔的特性分析[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0802009.
- 8 Wei Qi, Cheng Ying, Liu Xiaojun. The influence of point defect array on directional emission of phononic crystal waveguide[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(12): 124301.  
魏 琦, 程 营, 刘晓峻. 点缺陷阵列对声子晶体波导定向辐射性能的影响[J]. 物理学报, 2011, 60(12): 124301.
- 9 Scalora M, Dowling J P, Bowden C M, *et al.*. The photonic band edge optical diode[J]. J Appl Phys, 1994, 76(10): 2023–2026.
- 10 Seo M K, Jeong K Y, Yang J K, *et al.*. Low threshold current single cell hexapole mode photonic crystal laser[J]. Appl Phys Lett, 2007, 90(17): 171122.
- 11 Wang R, Dong J, Xing D Y. Dispersive optical bistability in one dimensional doped photonic bandgap structures[J]. Phys Rev E, 1997, 55(5): 6301–6304.
- 12 Lidorikis E, Busch K, Li Q M, *et al.*. Optical nonlinear response of a single nonlinear dielectric layer sandwiched between two linear dielectric structures[J]. Phys Rev B, 1997, 56(23): 15090–15099.
- 13 Wang Rong, Liang Binming, Zhang Lichao, *et al.*. Tunable optical power splitter based on the point defects of two-dimensional photonic crystal[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0123001.  
王 荣, 梁斌明, 张礼朝, 等. 基于二维光子晶体点缺陷可调谐光功率分配器[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0123001.
- 14 Qi jingren. Characteristics of band gap and defect of photonic crystals[J]. Chinese J Spectroscopy Laboratory, 2012, 29(5): 3235–3237.  
齐京仁. 光子晶体带隙和缺陷的特性[J]. 光谱实验室, 2012, 29(5): 3235–3237.
- 15 Zhao Huanyu, He Cunfu, Wu Bin, *et al.*. Experimental investigation of two-dimensional multi-point defect phononic crystals with square lattice[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(13): 134301.  
赵寰宇, 何存富, 吴 斌, 等. 二维正方晶格多点缺陷声子晶体实验研究[J]. 物理学报, 2013, 62(13): 134301.
- 16 Noda S, Chutinan A, Imada M. Trapping and emission of photons by a single defect in a photonic bandgap structure[J]. Nature, 2000, 407(6804): 608–610.