

一维掺杂光子晶体缺陷模的干涉理论

刘启能

(重庆工商大学计算机科学与信息工程学院, 重庆 400067)

摘要 为了解释一维掺杂光子晶体缺陷模的产生机理,建立了一维掺杂光子晶体的多波束干涉模型。利用多光束干涉原理建立了一维掺杂光子晶体缺陷模的干涉理论,成功地解释了一维掺杂光子晶体中缺陷模的产生机理。应用干涉理论和特征矩阵法对一维掺杂光子晶体缺陷模的特征进行了比较研究,两者的结论是一致的。

关键词 材料; 光子晶体; 缺陷模; 干涉理论

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0806001

Interference Theory of the Defect Mode in One-Dimensional Doped Photonic Crystal

Liu Qineng

(School of Computer Science and Information Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract In order to explain the reason of the defect mode in one-dimensional (1D) doped cycle photonic crystal, a multiple-beam interference model of 1D doped photonic crystal is established. Interference theory of the defect mode in 1D doped photonic crystal is established by interference theory, and the mechanism of the defect mode of 1D doped photonic crystal is explained. The defect modes are studied by interference theory and characteristic matrix method, and their conclusion are the same.

Key words materials; photonic crystal; defect mode; interference theory

OCIS codes 160.5298; 260.2065; 030.4070; 260.3160

1 引言

光子晶体就是其介质的折射率在空间结构上呈周期性变化的带隙材料。光在光子晶体中传播时,因其与光子晶体的周期结构发生相互作用而出现光的带隙结构。利用光子晶体中光的带隙结构能够非常方便地控制光的传播方式,从而使光子晶体成为控制光传播的理想材料。光子晶体根据其周期结构空间维数的不同分为一维(1D)光子晶体、二维(2D)光子晶体和三维(3D)光子晶体。一维光子晶体的结构最简单、研究最方便,且具有其他高维光子晶体的基本属性。因此对一维光子晶体的研究成为光子晶体研究领域内的重要内容。

光子晶体的研究中,在带隙特性、缺陷模特性、滤波理论^[1-17]等方面已经取得了可喜成果。由于一维掺杂光子晶体的缺陷模特性是研制光子晶体滤

波器的理论基础,这使得对光子晶体缺陷模的研究成为光子晶体研究中的一项重要课题。文献[6]通过引入复折射率研究了杂质的吸收系数对缺陷模的影响,得出了缺陷模透射峰的峰值和半峰全宽随吸收系数的变化规律。文献[8]利用特征矩阵法研究了矩形掺杂光子晶体中电磁波的模式和缺陷模,得出了缺陷模随模式量子数和光子晶体的结构参数的变化规律。随后文献[9]研究了各向异性圆柱掺杂光子晶体的缺陷模及其量子效应,得出了各向异性圆柱掺杂光子晶体中缺陷模的变化特征。但是上述文献中都没有对缺陷模的产生原因进行研究。为了解释产生一维掺杂光子晶体缺陷模的物理机理,文献[18]通过建立起一维掺杂光子晶体的谐振腔模型,利用谐振腔的共振条件推导出缺陷模频率满足的解析公式,从理论上解释了产生一维掺杂光子晶

收稿日期: 2013-01-21; 收到修改稿日期: 2013-03-15

基金项目: 重庆市教委科技项目(KJ100717)

作者简介: 刘启能(1957-),男,博士,教授,主要从事光学与声学方面的研究。E-mail: liuqineng@yahoo.com.cn

体缺陷模的物理机理,并将共振理论的结果与特征矩阵法的结果进行比较,两者结果完全吻合。但是文献[18]中存在明显的不足:它只得出了一维掺杂光子晶体缺陷模频率的解析公式,而对缺陷模的峰高和带宽两个重要特征不能给予解决。因此,文献[18]中的共振理论不完善,有待进一步深入研究和完善。本文在文献[18]的基础上,利用光的干涉理论推出一维掺杂光子晶体缺陷模的透射率公式和频率公式,更加深入和全面地研究一维掺杂光子晶体缺陷模的产生机理和变化特征。

2 缺陷模现象

一维掺杂光子晶体的两边是由 A 层(折射率为 n_1 、厚度为 d_1)和 B 层(折射率为 n_2 、厚度为 d_2)两种介质周期性地交替构成,中间是插入一 C 层(折射率为 n_3 、厚度为 d_3),形成 $(AB)^N C (BA)^N$ 结构。如图 1 所示。取 $n_1=2.8, n_2=1.8, n_3=3.5$, 中心波长 $\lambda_0=600\text{ nm}$, 其中心频率 $f_0=c/\lambda_0$ (c 为真空中的光速), $N=5$ 。设归一化频率 $g=f/f_0, f$ 为入射波的频率。

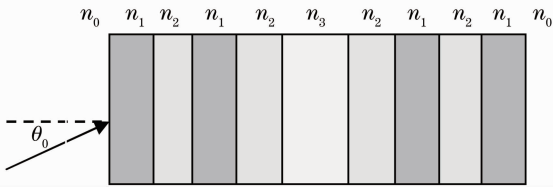


图 1 一维掺杂光子晶体

Fig. 1 One-dimensional doped photonic crystal

取 $n_1 d_1 = \lambda_0/4, n_2 d_2 = \lambda_0/4, n_3 d_3 = \lambda_0/2$, 利用特征矩阵法计算出横电 (TE) 波以入射角 $\theta_0=0.2\text{ rad}$ 入射一维掺杂光子晶体后其透射率 T 随归一化频率的响应曲线,如图 2 所示。由图 2 可知,当光以入

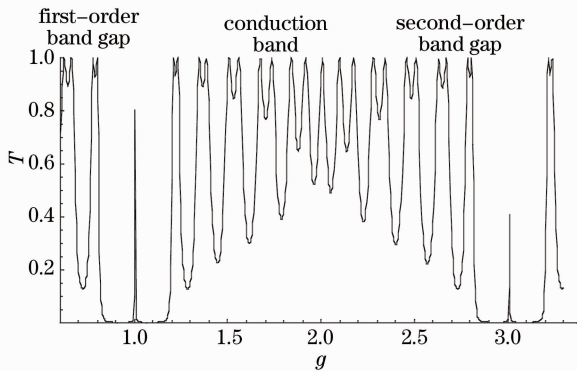


图 2 透射率随归一化频率响应曲线(特征矩阵法)

Fig. 2 Response curve of transmittance along the change of normalized frequency (characteristic matrix theory)

射角 $\theta_0=0.2\text{ rad}$ 入射一维掺杂光子晶体时,在一级禁带的中间 $g=1$ 附近出现了一个缺陷模;在二级禁带的中间 $g=3$ 附近也出现了一个缺陷模。这表明缺陷模会随着 g 的增加周期性地出现在不同的禁带内。但特征矩阵法存在以下不足:它只能给出缺陷模的计算结果,而不能对缺陷模产生的原因给出理论解释。

3 模型与理论

为了解释一维掺杂光子晶体缺陷模的产生原因,建立了一维掺杂光子晶体的多光束干涉模型:一维掺杂光子晶体的结构为 $(AB)^N C (BA)^N$, 构成以 C 层为中心层的对称结构,如图 3 所示。光进入 C 层后会在 C 层的前后两个平行界面间往复地反射,第一束透射光为光线 1,第二束透射光为光线 2,第三束透射光为光线 3, ..., 这些无限多条光线会在透射空间发生相干干涉,相干干涉产生的透射峰就形成了一维掺杂光子晶体的缺陷模。由多光束干涉理论^[19]可得,这无限多条光线在透射空间发生相干干涉的透射率为

$$T = \frac{1}{1 + [2r/(1-r^2)]^2 \sin^2(\delta/2)}. \quad (1)$$

式中 r 为 B、C 两层界面的反射系数, δ 为相邻两条透射光线的相位差,

$$\delta = 4\pi d_3 \cos \theta_3 / \lambda_3, \quad (2)$$

式中 θ_3, λ_3 分别为 C 层中光的折射角和波长。要使 (1) 式出现极大值必须满足下列条件:

$$\begin{aligned} \delta/2 &= 2\pi d_3 \cos \theta_3 / \lambda_3 = j\pi, \\ j &= 1, 2, 3, \dots, \end{aligned} \quad (3)$$

(3) 式就是出现一维掺杂光子晶体缺陷模透射峰的条件。利用折射定律 $n_0 \sin \theta_0 = n_3 \sin \theta_3$ 和 $f = c/(n_3 \lambda_3)$, 由 (1) 式得出缺陷模的透射率随归一化频率 g 和入射角 θ_0 的变化关系为

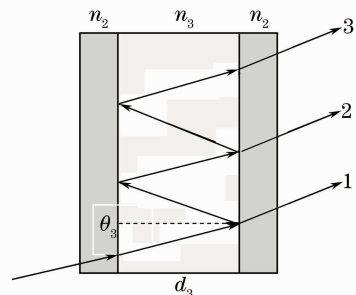


图 3 多光束干涉模型

Fig. 3 Multiple-beam interference model

$$T = \frac{1}{1 + [2r/(1-r^2)]^2 \sin^2(2\pi n_3 d_3 g f_0 \sqrt{1 - n_0^2 \sin^2 \theta_0 / n_3^2 / c})}. \quad (4)$$

由(3)式得出现缺陷模峰值的归一化频率满足的条件为

$$g_j = jc / (2n_3 d_3 f_0 \sqrt{1 - n_0^2 \sin^2 \theta_0 / n_3^2 / c}), \quad j = 1, 2, 3, \dots, \quad (5)$$

(5)式中的 j 称为缺陷模的级数, $j=1$ 对应一级缺陷模, $j=2$ 对应二级缺陷模, \dots 。取 $n_1 d_1 = \lambda_0 / 4$, $n_2 d_2 = \lambda_0 / 4$, $n_3 d_3 = \lambda_0 / 2$, $\theta_0 = 0.2 \text{ rad}$, 由(4)式计算出缺陷模的透射率随归一化频率的响应曲线, 如图4所示。由图4可以看出, 在归一化频率 $g=1, 2, 3, \dots$ 附近出现了一级缺陷模、二级缺陷模、三级缺陷模、 \dots 。结合图2可以看出, $g=2, 4, 6, \dots$ 附近是该一维掺杂光子晶体导带所在的位置, 所以在这些位置的缺陷模会被导带淹没。因此, 该一维掺杂光子晶体只能出现奇数级缺陷模。比较图2和图4可以看出, 干涉理论的结果与特征矩阵法的结果是吻合的, 这表明干涉理论能成功地解释一维掺杂光子晶体缺陷模的产生原因。

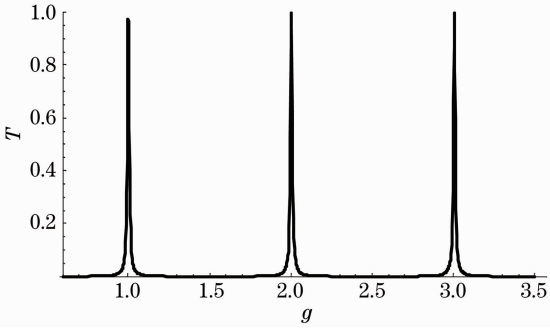


图4 透射率随归一化频率响应曲线(干涉理论)

Fig. 4 Response curve of transmittance along the change of normalized frequency (interference theory)

由(3)式可推出光正入射($\theta_0 = 0$)时, 缺陷模峰值的波长满足的关系:

$$2n_3 d_3 = j\lambda_3, \quad j = 1, 2, 3, \dots, \quad (6)$$

(6)式正是文献[18]中由共振腔模型推出的缺陷模波长公式。由此表明, 由干涉理论推导出了(4)式和(5)式比文献[18]得出的结果能更加全面、深刻地揭示了产生一维掺杂光子晶体缺陷模的物理机理。

把掺杂缺陷作为共振微腔处理, 这与一维掺杂光子晶体的真实结构存在着一定的差别, 主要差别在于共振微腔中的光波反射面完全定位在共振微腔的两个界面, 而在一维掺杂光子晶体中光波的反射面会渗透到一维光子晶体内部, 因此实际共振微腔的尺寸大于缺陷层的宽度。这种模型上的近似会使缺陷模干涉理论的结果出现一些偏差。下面在说明

缺陷模干涉理论正确性的同时也指出其偏差。

4 缺陷模比较研究

为了进一步说明缺陷模干涉理论的正确性, 利用干涉理论和特征矩阵法对缺陷模的特征进行了对比研究。由(5)式可以看出缺陷模的归一化频率 g 受入射角 θ_0 、杂质折射率 n_3 和杂质厚度 d_3 的影响, 下面分别研究缺陷模随 θ_0 、 n_3 、 d_3 的变化特征。

4.1 缺陷模随入射角的变化

为了研究缺陷模随入射角的变化规律, $n_1 d_1$ 、 $n_2 d_2$ 、 $n_3 d_3$ 取值与第3节相同, 利用特征矩阵法和(4)式计算出一级缺陷模的 g 随 θ_0 的响应曲线, 如图5和图6所示。图5和图6中白色细带为缺陷模, 黑色区域为禁带。比较图5、图6和(5)式可以得出:

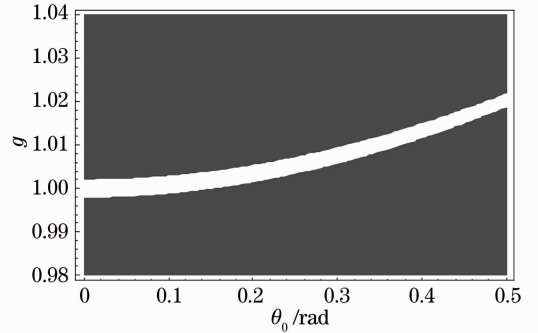


图5 归一化频率随入射角响应曲线(特征矩阵法)

Fig. 5 Response curve of normalized frequency with the change of incident angle (characteristic matrix theory)

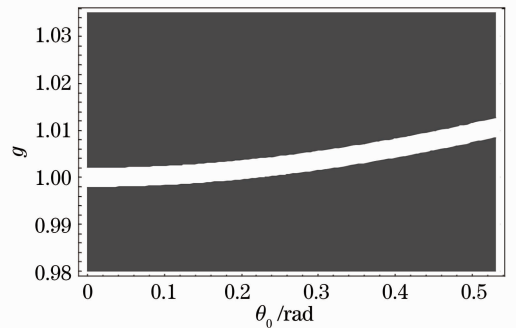


图6 归一化频率随入射角响应曲线(干涉理论)

Fig. 6 Response curve of normalized frequency with the change of incident angle (interference theory)

1) 干涉理论的结果与特征矩阵法的结果是一致的。缺陷模的 g 都随 θ_0 的增加而增大,即按(5)式中的函数规律变化。缺陷模的频率宽度随着入射角的增加无明显变化。

2) 干涉理论的结果与特征矩阵法的结果也存在着细微的差别,特征矩阵法的结果中 g 随 θ_0 的增加而增大,且增大的速度要略大一些。

4.2 缺陷模随杂质折射率的变化

为了研究缺陷模随杂质折射率的变化规律,取 $n_1 d_1 = \lambda_0/4$ 、 $n_2 d_2 = \lambda_0/4$ 、 $n_3 d_3 = \lambda_0/4$ 、 $\theta_0 = 0.1 \text{ rad}$,利用特征矩阵法和基于干涉理论的(4)式计算出一级缺陷模的 g 随 n_3 的响应曲线,分别如图7和图8所示。图7和图8中白色细带为缺陷模,黑色区域为禁带。比较图7、图8和(5)式可以得出:

1) 干涉理论的结果与特征矩阵法的结果也基本一致。缺陷模的 g 都随 n_3 的增加而减小,即按(5)式中的函数规律变化。缺陷模的频率宽度随着 n_3 的增加而无明显变化。

2) 干涉理论的结果与特征矩阵法的结果也存在着小的差别,干涉理论的结果中缺陷模的 g 随 n_3 的增加而减小的速度要略大一些。

4.3 缺陷模随杂质厚度的变化

杂质厚度即 d_3 ,为了便于研究令 $d_3 = X\lambda_0$, X 为无量纲的参变量。(4)式和(5)式可以化为随 X 的变化函数:

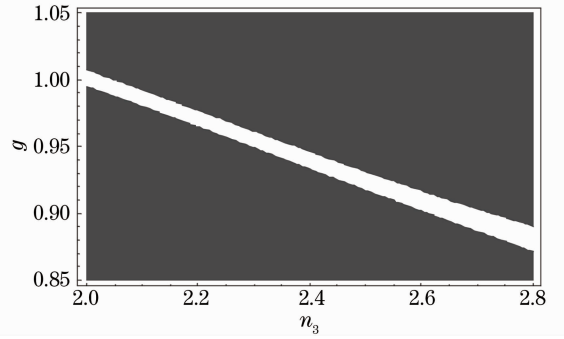


图7 归一化频率随杂质折射率响应曲线(特征矩阵法)
Fig.7 Response curve of normalized frequency with the change of the index of impurities (characteristic matrix theory)

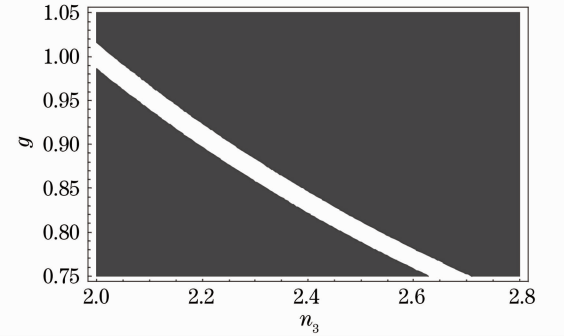


图8 归一化频率随杂质折射率响应曲线(干涉理论)
Fig.8 Response curve of normalized frequency with the change of the index of impurities (interference theory)

$$T = \frac{1}{1 + [2r/(1 - r^2)]^2 \sin^2(2\pi n_3 X g \sqrt{1 - n_0^2 \sin^2 \theta_0 / n_3^2})}, \quad (7)$$

$$g_j = j / (2n_3 X \sqrt{1 - n_0^2 \sin^2 \theta_0 / n_3^2}), \quad j = 1, 2, 3, \dots, \quad (8)$$

固定 $\theta_0 = 0.1 \text{ rad}$ 、 $n_3 = 3.5$,利用特征矩阵法和基于干涉理论的(7)式计算出一级缺陷模的 g 随 X 的响应曲线,分别如图9和图10所示。图9和图10中白色细带为缺陷模,黑色区域为禁带。比较图9、图10和(8)式可以得出:

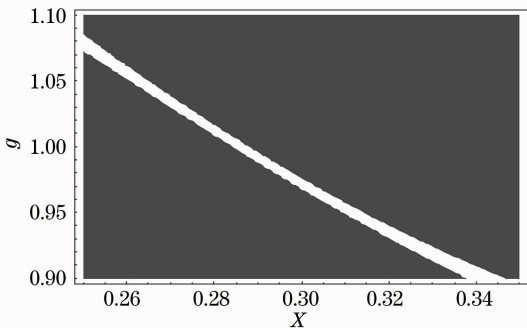


图9 归一化频率随杂质厚度响应曲线(特征矩阵法)
Fig.9 Response curve of normalized frequency with the change of X (characteristic matrix theory)

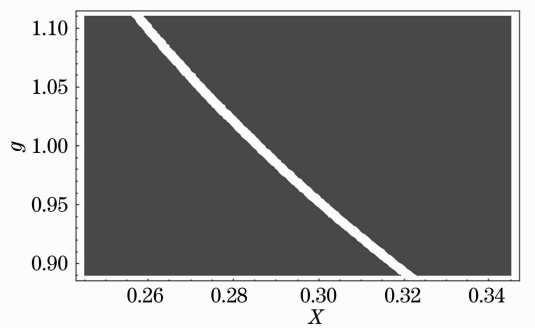


图10 归一化频率随杂质厚度响应曲线(干涉理论)
Fig.10 Response curve of normalized frequency with the change of X (interference theory)

1) 干涉理论的结果与特征矩阵法的结果基本一致。缺陷模的 g 都随 d_3 的增加而减小, 即按(8)式中的反比规律变化。 g 宽度随着 d_3 的增加而无明显变化。

2) 干涉理论的结果与特征矩阵法的结果也存在细微的差别, 干涉理论的结果中 g 随 d_3 的增加而减小, 且减小的速度要略大一些。

特征矩阵法的结果与干涉理论的结果的一致性表明: 本文建立的一维掺杂光子晶体的缺陷模干涉理论是正确的, 它不仅能够用光的干涉理论成功地解释缺陷模的产生机理, 而且能够以解析公式的形式反映出缺陷模的全貌特征。干涉理论不仅弥补了特征矩阵法不能解释缺陷模产生机理的不足, 而且还弥补了文献[18]中的解析公式不能对缺陷模进行全貌分析的不足。

干涉理论的结果与特征矩阵法的结果存在的差异表明: 缺陷模的干涉理论虽然抓住了产生缺陷模的主要因素, 即杂质层的多光束干涉, 但是干涉理论没有考虑杂质层两边的周期结构对缺陷模的影响, 因而使两种方法的结果出现一些差异。

5 结 论

为了解释一维掺杂光子晶体缺陷模的产生机理, 建立了一维掺杂光子晶体的多波束干涉模型, 并利用光的干涉原理建立了一维掺杂光子晶体缺陷模的干涉理论。利用缺陷模的干涉理论成功地解释了一维掺杂光子晶体中缺陷模的产生机理, 并弥补了缺陷模的共振理论不能对缺陷模的峰高和半峰全宽进行全貌分析的不足。

参 考 文 献

- 1 Wang Rui, Zhang Cunxi, Nie Yihang. Band structure and propagation properties of one-dimension anisotropy photonic crystals[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 35(1): 89-92.
王 瑞, 张存喜, 聂一行. 一维各向异性光子晶体的带隙结构和传输特性[J]. 光子学报, 2007, 35(1): 89-92.
- 2 Li Rong, Ren Kun, Ren Xiaobin. Angular and wavelength selectivity of band gaps of holographic photonic crystals for different polarizations [J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(8): 2520-2523.
李 蓉, 任 坤, 任晓斌. 一维光子晶体带隙结构对不同偏振态的角度和波长响应[J]. 物理学报, 2004, 53(8): 2520-2523.
- 3 Liu Qineng. Analytical study on total reflection tunnel effect of 1-D photonic crystal[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0219002.
刘启能. 一维光子晶体的全反射隧穿效应的解析研究[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0219002.
- 4 Zhang Gaoming, Peng Jingcui, Jian Zhijian, et al.. Orthogonality relations among modes in left-handed materials slab waveguide[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(4): 1846-1849.
张高明, 彭景翠, 蒋知渐, 等. 左手材料薄板波导中模式之间的正交关系[J]. 物理学报, 2006, 55(4): 1846-1849.
- 5 Xu Xuming, Fang Liguang, Liu Nianhua. Unusual photonic tunneling in multilayer system with a negative refraction index layer[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(12): 1676-1679.
徐旭明, 方利广, 刘念华. 含负折射率层的多层体系的反常光子隧穿[J]. 光学学报, 2005, 25(12): 1676-1679.
- 6 Liu Qineng. Effect of impurity absorption on one-dimensional photonic crystal defect mode [J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(6): 777-780.
刘启能. 杂质吸收对一维光子晶体缺陷模的影响[J]. 中国激光, 2007, 34(6): 777-780.
- 7 Shang Tingyi, Zheng Yi, Zhang Huiyun. Omnidirectional gap and defect mode of one-dimensional photonic crystals with negative-index materials [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(4): 663-666.
尚廷义, 郑 义, 张会云. 含负折射率材料一维光子晶体的全方位带隙和缺陷模[J]. 光子学报, 2007, 36(4): 663-666.
- 8 Liu Qineng. The mode and defect mode of electromagnetic wave in rectangular doped photonic crystal[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(4): 2551-2555.
刘启能. 矩形掺杂光子晶体中电磁波的模式和缺陷模[J]. 物理学报, 2010, 59(4): 2551-2555.
- 9 Liu Qineng. The defect mode and the quantum effect of light wave in cylindrical anisotropic photonic crystal[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(1): 014217.
刘启能. 各向异性圆柱掺杂光子晶体的缺陷模及其量子效应[J]. 物理学报, 2011, 60(1): 014217.
- 10 Liu Qineng. Filtering feature of 1D rectangle doping photonic crystal [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 2041-2044.
刘启能. 一维矩形掺杂光子晶体的滤波特性[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2041-2044.
- 11 Yuntuan Fang, Zhongcheng Liang. Unusual transmission through usual one-dimensional photonic crystal in the presence of evanescent wave[J]. Opt Commun, 2010, 283(10): 2102-2106.
- 12 Liu Qineng. Defect mode and mode of electromagnetic wave in cylindrical doping photonic crystal[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(4): 991-995.
刘启能. 圆柱形掺杂光子晶体中电磁波的模式和缺陷模[J]. 中国激光, 2010, 37(4): 991-995.
- 13 Li Lei, Liu Guiqiang, Chen Yuanhao. An optical switch based on coupled heterostructure photonic-crystal waveguides [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0123002.
黎 磊, 刘桂强, 陈元浩. 光子晶体异质结构耦合波导光开关[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0123002.
- 14 Yu Jianli, Shen Hongjun, Ye Song, et al.. Design of novel highly efficient photonic crystal multi-channel drop filter [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1106003
余建立, 沈宏君, 叶 松, 等. 一种新型高效光子晶体多信道下载滤波器设计[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1106003.
- 15 Zhang Dong, Zhao Jianlin, Lü Shuyuan. Slow light waveguide with low group-velocity dispersion and low loss in 2-D photonic crystal[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0112001.
张 栋, 赵建林, 吕淑媛. 低群速度色散和低损耗的二维光子晶体慢光波导[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0112001.
- 16 Chen Xuchong, Feng Shuai, Zhang Beibei, et al.. Subwavelength imaging characteristics of the near-infrared silicon-based metallic photonic crystal slabs [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0123003.
陈胥冲, 冯 帅, 张贝贝, 等. 近红外波段硅基金属光子晶体平板的亚波长成像特性[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0123003.
- 17 Zhou Xingpeng, Shu Jing, Lu Binjie, et al.. Two-wavelength division demultiplexer based on triangular lattice photonic crystal resonant cavity[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0123001.
周兴平, 疏 静, 卢斌杰, 等. 基于三角晶格光子晶体谐振腔的双通道解波分复用器[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0123001.
- 18 Liu Qineng. Resonance theory of the defect mode of 1-D doping photonic crystal[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(4): 446-450.
刘启能. 一维掺杂光子晶体缺陷模的共振理论[J]. 光子学报, 2012, 41(4): 446-450.
- 19 E 赫克特, A 赞斯. 光学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1980. 691-693.
E Hecht, A Zajac. Optics [M]. Beijing: People's Education Press, 1980. 691-693.