

文章编号: 1000-7032(2009)03-0394-05

## 可实现奇数通道滤波功能的光量子阱透射谱

苏 安<sup>1,2</sup>, 高英俊<sup>2</sup>, 焦美娜<sup>2</sup>, 卢强华<sup>2</sup>

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

**摘要:** 针对光子晶体 $(AB)_m(CD)_n(BA)_m$ 模型, 选择适当的结构参数, 通过传输矩阵法对其透射谱进行计算模拟发现, 在归一化中心频率 $0.5(\omega a/2\pi c)$ 处, 当光子晶体 $(CD)_n$ 的导带处于光子晶体 $(AB)_m(BA)_m$ 的禁带中, 且两者均以中心频率处为对称中心时, 构成镜像对称的光子晶体量子阱结构。在光量子阱透射谱的中心频率处及对称的两侧, 分布着具有规律的奇数局域共振峰, 出现明显的量子化效应, 透射峰数目和位置都可以通过光子晶体 $(CD)_n$ 的重复周期数 $n$ 来调节, 这一现象可用于设计可调性奇数通道滤波器。

**关键词:** 光子晶体; 光量子阱; 共振透射; 滤波

**中图分类号:** O431; O437

**PACS:** 42.70.Qs

**PACC:** 4270Q

**文献标识码:** A

## 1 引 言

20世纪80年代末提出的光子晶体概念<sup>[1,2]</sup>, 它的最基本特性是具有类似于电子在半导体能带结构中的禁带——光子禁带, 频率落在禁带中的光被禁止传播。由于它独特的光学特性和潜在的巨大应用前景吸引着越来越多的人进行深入研究。光子晶体在很多光学器件如光滤波器、光学开关、光波导等<sup>[3~5]</sup>设计上具有明显的应用前景。量子阱的概念是由 Esaki 和 Tsu 提出的<sup>[6]</sup>。众所周知, 电子在半导体量子阱结构中表现出许多有趣而新颖的现象<sup>[7]</sup>。利用量子阱结构可以“裁剪”半导体中电子能带的特性, 许多基于量子阱结构的新器件被制造出来, 在现代科学技术领域中发挥着重要的作用<sup>[8]</sup>。类似于半导体中的量子阱结构, 将具有不同光子带隙的光子晶体组合在一起即可形成光子晶体量子阱<sup>[9]</sup>, 常见的光子晶体量子阱结构垒层是由2块相同的光子晶体组成, 中间阱层是均匀的介电材料<sup>[9,10]</sup>; 另外一种光量子阱结构的垒层是由2块相同的光子晶体组成, 阱层与垒层的光子晶体晶格结构和晶格常数相同但材料不同<sup>[3,4,8,11,12]</sup>。当组成光量子阱结构的中间阱层光子晶体能带处于两侧垒层光子晶体禁带中时, 可形成局域的光子态, 根据这些局域光

子态的具体情况可以用来设计光滤波或是光开关<sup>[3,4,8]</sup>。本文针对光子晶体 $(AB)_m(CD)_n(BA)_m$ 模型, 选择适当的结构参数, 计算模拟了光量子阱结构的透射谱, 发现了两套量子化的共振透射谱结构, 具有典型的量子化效应。

## 2 光子晶体模型及其能带特性

参考文献[8]提出的光子晶体模型为 $(AB)_m(CD)_n(AB)_m$ , 本文选取镜像对称光子晶体模型 $(AB)_m(CD)_n(BA)_m$ , 即在镜像对称的光子晶体 $(AB)_m(BA)_m$ 中间插入 $(CD)_n$ 光子晶体形成“三明治”状光子晶体结构。分别选取A层、B层、C层和D层介质的厚度和介电常数取值如下:  $d_A = d_B = a/2, d_C = d_D = a, a$ 为晶格常数,  $\varepsilon_A = 9.0, \varepsilon_B = 1.0, \varepsilon_C = 16.0, \varepsilon_D = 1.0, m$ 和 $n$ 可为任意正整数。

应用传输矩阵法理论<sup>[13]</sup>通过 Matlab 编程计算模拟, 得出光子晶体 AB 和光子晶体 CD 的色散关系(光子能带结构)如图1, 由 CD、AB 介质组成的简单周期结构光子晶体 $(AB)_{10}$ 和 $(CD)_{10}$ 及 $(AB)_5(BA)_5$ 光子透射能带特性谱如图2, 图中频率用归一化单位 $(\omega a/2\pi c)$ 。显然, 光子能带结构具有由于布拉格散射产生的透射带的特征。

从图1和图2中可知, 适当地选择光子晶体

收稿日期: 2008-10-12; 修订日期: 2008-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(50661001, 50061001); 广西科学基金(桂科自0832029, 0991026, 桂科基0639004)资助项目

作者简介: 苏安(1973-), 男, 广西都安人, 主要从事光子晶体的研究。

E-mail: suan3283395@163.com

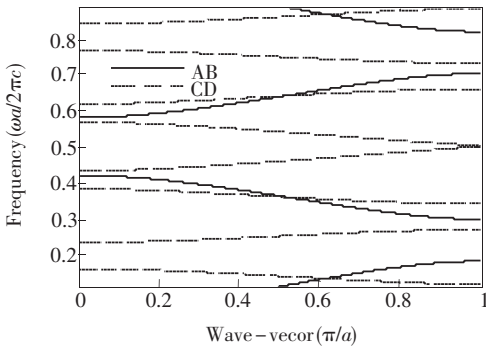


图1 AB与CD的色散关系图

Fig. 1 Dispersion relationship of AB and CD PCs

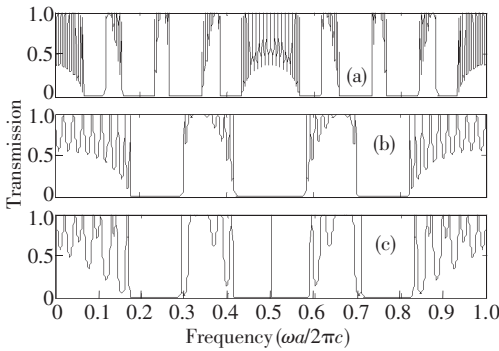


图2 (a)光子晶体(CD)<sub>10</sub>的光子透射能带谱;(b)光子晶(AB)<sub>10</sub>的光子透射能带谱;(c)光子晶体(AB)<sub>5</sub>(BA)<sub>5</sub>的光子透射能带谱。

Fig. 2 Transmission spectrum for (a) (CD)<sub>10</sub>, (b) (AB)<sub>10</sub> and (c) (AB)<sub>5</sub>(BA)<sub>5</sub> photonic crystals.

组成介质的介电常数和厚度可以使光子晶体(CD)<sub>n</sub>的中心能带刚好处于光子晶体(AB)<sub>m</sub>-(BA)<sub>m</sub>的中心禁带之中,且两者的中心均处于中心频率0.5(ωa/2πc)处并对称分布于中心频率处两侧。当在光子晶体(CD)<sub>n</sub>内传播的电磁波频率刚好处于这一区域内时,光子晶体(AB)<sub>m</sub>-(BA)<sub>m</sub>起着关卡的作用而禁止电磁波在其内传播,形成光约束。另一方面,光子晶体(CD)<sub>n</sub>在此频率范围起着势阱的作用<sup>[3,4,8]</sup>。因此,光子晶体(AB)<sub>m</sub>(CD)<sub>n</sub>(BA)<sub>m</sub>形成了一个镜像对称的一维光子晶体量子阱结构,光子晶体(AB)<sub>m</sub>-(BA)<sub>m</sub>是光子量子阱结构的垒,光子晶体(CD)<sub>n</sub>是光子量子阱结构的阱。光子晶体(CD)<sub>n</sub>也可看成是插入光子晶体(AB)<sub>m</sub>(BA)<sub>m</sub>内的缺陷层。

值得注意的是,图2(c)中光子晶体(AB)<sub>m</sub>-(BA)<sub>m</sub>的光子能带反射谱中心频率0.5(ωa/2πc)处出现一窄完全透过峰。这是因为,此时的

光子晶体(AB)<sub>5</sub>(BA)<sub>5</sub>可以看成是镜像对称的光子晶体A(BA)<sub>4</sub>(AB)<sub>4</sub>A中间插入缺陷BB一样,于是在光子能带谱上相应位置会出现单缺陷模(完全透过峰)<sup>[14~16]</sup>。也可以看成是从周期排列的光子晶体(AB)<sub>10</sub>中抽掉第6层介质A而形成的含1个缺陷的光子晶体,从而出现相应的缺陷模。

### 3 结果与讨论

固定光子量子阱垒层光子晶体(AB)<sub>m</sub>(BA)<sub>m</sub>的重复周期数m=5,其它各参数保持上述值不变,随着阱层光子晶体(CD)<sub>n</sub>重复周期数n从1~6递增,计算模拟得到光子量子阱结构(AB)<sub>5</sub>(CD)<sub>n</sub>(BA)<sub>5</sub>的光子透射能带谱,如图3所示。从透射谱中可知:

(1)在中心频率0.5(ωa/2πc)处总会出现一条透射率为100%的完全透射峰。这是因为:在图2中,特别提出的是,频率周期为1.0(ωa/2πc)的光子晶体(CD)<sub>n</sub>的光子能带是两个频率周期为0.5(ωa/2πc)的光子能带首尾相联而成的。即阱层光子晶体(CD)<sub>n</sub>的中心能带,是由频率周期为0.5(ωa/2πc)时的前后两个高、低能带合并而成的一个宽能带。因为当由一个频率周期扩展到两个频率周期时,会出现前频率周期的高能带与后频率周期的低能带相接合并成一个宽能带。此处这两个能带刚好镜像对称分布于中心频率0.5(ωa/2πc)处两侧。因此,处于中心禁带内

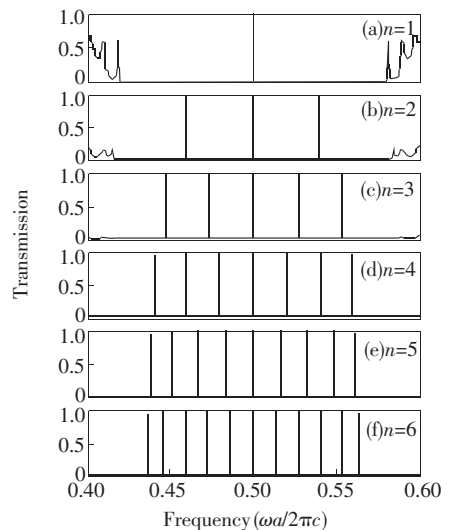


图3 (AB)<sub>5</sub>(CD)<sub>n</sub>(BA)<sub>5</sub>光子量子阱的透射能带谱  
Fig. 3 Transmission spectrum for (AB)<sub>5</sub>(CD)<sub>n</sub>(BA)<sub>5</sub> (n = 1~6) photonic QW

的中心能带可以看成两个相距为零并镜像对称的能带共同处于宽的中心禁带中,则构成的光子量子阱也可看成是由两个镜像对称的子量子阱组成。由于镜像对称的缘故,两个子量子阱的宽度和高度又完全相等,则共振达到最大,于是共振隧穿也达到最强<sup>[17~19]</sup>。即在中心频率处形成一条相对较宽的透射率为 100% 的透过峰。

(2) 在中心频率的两侧,对称分布着两套结构和特点相同的透射峰,且透射峰的条数都分别等于阱层光子晶体  $(CD)_n$  的重复周期数  $n-1$  数值。由上述(1)分析可知,中心频率处对称的两侧,存在着两个镜像对称的子量子阱,于是出现结构和特点相同并镜像对称的两套透射谱线。单独从左右其中之一子量子阱看,当  $n=1$  时,CD 是插入光子晶体  $(AB)_5(BA)_5$  内的两块缺陷,由于 C 和 D 的折射率相差很大,且距离很近,则缺陷模波函数之间发生严重交迭,发生缺陷模之间的强耦合作用,导致缺陷模峰值急剧下降,从而在能带图中没体现出来<sup>[14,15,20~22]</sup>。从对称角度看,由于 C 和 D 的折射率不同,光子晶体  $(AB)_5CD(BA)_5$  不再具备镜像对称性,则 C 和 D 缺陷模强耦合产生分裂成的两条透射峰值远小于 1 甚至消失<sup>[15,16,20~22]</sup>。当  $n=2$  时,  $(CD)_2$  可以看成是插入光子晶体  $(AB)_5(BA)_5$  内的两块缺陷,即把 CD 看成是一块缺陷,则  $(AB)_5(CD)_2(BA)_5$  又形成一个镜像对称的光子晶体,于是出现一条透射峰。

从量子阱效应角度看,阱层光子晶体  $(CD)_n$  的重复周期数  $n \geq 2$  时,可以把  $(CD)_n$  看成是插入光子晶体  $(AB)_5(BA)_5$  中间的另一块光子晶体。由于在中心频率  $0.5(\omega a/2\pi c)$  处,光子晶体  $(CD)_n$  的中心能带刚好完全落在垒层光子晶体  $(AB)_5(BA)_5$  的中心禁带之中,即垒层光子晶体  $(AB)_5(BA)_5$  不能维持频率处于禁带内的电磁波的传播,此频率范围内的光被限制在阱光子晶体  $(CD)_n$  内,光子晶体量子阱中由于量子限制效应而产生光子的束缚态。类似于半导体量子阱中的电子,对光子的限制效应将导致频率的量子化,这种情况下电磁波只能以共振隧穿方式通过光子量子阱<sup>[3,4,8,22]</sup>。这个量子效应现象从图中尖锐的透射峰可以看出。这些峰与光子晶体中的缺陷态所对应的峰是类似的,但是这些峰对应的是光子晶体量子阱中由于量子限制效应而产生的光子的束

缚态。这些束缚态与光波的可传输性密切相关,表现为中心频率  $0.5(\omega a/2\pi c)$  处两侧对称分布的两套窄透射峰,透射峰数目和位置分别与光子晶体  $(CD)_n$  重复周期数密切相关,且透射峰的峰值大都接近或达到 1,透射峰数目等于  $n-1$  数值,于是可以通过调节阱层光子晶体  $(CD)_n$  的重复周期数  $n$  来控制透过峰的数目和位置。

(3) 综合上述,光子量子阱的透射峰总数目与阱层光子晶体  $(CD)_n$  的重复周期数  $n$  数值的关系为  $2n-1$ ,即出现总数目和位置可调节的奇数透射峰。

(4) 随着阱层光子晶体  $(CD)_n$  周期数  $n$  的增加,中心频率处透射峰的透射率和位置保持不变,两套透射谱线的中心逐渐慢慢靠近,各透射峰之间的距离随之减小,但因此随着  $n$  的增加,量子阱结构的各透射峰对光频率的反应将更加灵敏。

(5) 透射谱所处的带宽范围很小,阱层光子晶体  $(CD)_n$  周期数  $n=6$  时,11 条透射峰所在范围为  $0.435 \sim 0.565(\omega a/2\pi c)$ ,占的带宽仅为  $0.130(\omega a/2\pi c)$ 。但是几乎所有的透射峰的透射率都等于 100%,所以此结论对设计高效、高灵敏度的光学滤波器件具有重大意义。

## 4 结 论

(1) 由于存在两个相接并镜像对称的子光子量子阱构成一个大量子阱的缘故,不仅出现了单套透射谱线结构和特点,同时还增加了结构和特点相同的另一套透射谱线,且两套谱线的对称中心还出现一条完全透射峰。单套透射谱线的条数分别等于阱层光子晶体  $(CD)_n$  的重复周期数  $n-1$  数值,光子量子阱的总透射谱线数目等于  $2n-1$  数值,可形成典型的奇数通道滤波。(2) 透射谱线所占的带宽很窄,即对频率的反应相当灵敏。因为在很窄的禁带范围内,同时出现两套结构和特点、透射峰数目相同并镜像对称的透射谱线,以及对称频率中心处恒定的一条透射峰,而且透射峰的数目和位置可以通过阱层光子晶体  $(CD)_n$  的重复周期数  $n$  加以调节和控制,所以该结构参数对应的光子量子阱结构在某种程度上将更具实际应用前景。利用这些透射谱的特征,对于设计可调性高效、高灵敏度的奇数通道光学器件将具有理论和现实指导意义,并具有巨大的应用潜力。

## 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 ] Liu Dandong, Chen Guangde, Xu Zhongfeng. A switching mechanism based on photonic quantum-well effects [J]. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 2006, **35**(9):1321-1323 (in English).
- [ 4 ] Hu Shuilong, Xu Xuming, Yu Tianbao. The single filtering and multiple channeled switches in photonic quantum-well structures [J]. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 2004, **33**(8):1004-1005 (in Chinese).
- [ 5 ] Chen Haibo, Gao Yingjun, Hu Sumei. Properties of mirror symmetrical photonic crystals of dielectric constant defect layer with imaginary part [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2008, **29**(2):233-235 (in Chinese).
- [ 6 ] Esaki L, Tus R. superlattice and negative differential conductivity semiconductors [J]. *IBM J. Res. Dev.*, 1970, **14**(1): 61-65.
- [ 7 ] Mendez E E, Klitzing K V. *Physics and Applications of Quantum Wells and Superlattices* [M]. NATO ASI, New York, 1987.
- [ 8 ] Qiao F, Zhang C, Wang J, et al. Photonic quantum-well structures: Multiple channeled filtering phenomena [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(23):3698-3700.
- [ 9 ] Moussa R, Foteinopoulo U S, Zhang Lei, et al. Negative refraction and superlensing in a 2D photonic crystal structure [J]. *Phys. Rev. B*, 2005, **71**(8):085106-1-5.
- [ 10 ] Yano S, Segawa Y, Bae J S, et al. Quantized state in a single quantum well structure of photonic crystals [J]. *Phys. Rev. B*, 2001, **63**(15):153316-1-4.
- [ 11 ] Chen Xiaoshuang, Lu Wei, Shen S C. Photonic resonant transmission in the quantum-well structure of photonic crystals [J]. *Solid State Commun.*, 2003, **127**(8):541-544.
- [ 12 ] Liu Jing, Sun Junqiang, Huang Chongqing, et al. Improvement of resonant tunneling spectral character of two-dimensional quantum wells [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2007, **28**(3):325-329 (in Chinese).
- [ 13 ] Wang Hui, Li Yongping. An eigen matrix method for obtaining the band structure of photonic crystals [J]. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2001, **50**(11):2172-2174 (in Chinese).
- [ 14 ] Du Guiqiang, Liu Nianhua. Optical transmission spectra of one-dimensional photonic crystals with a mirror symmetry [J]. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2004, **53**(4):1905-1908 (in Chinese).
- [ 15 ] Du Guiqiang, Liu Nianhua. Complete transmission and application of one-dimensional photonic crystals with multiple defects [J]. *Acta Sinica Quantum Optica* (量子光学学报), 2004, **10**(3):98-101 (in Chinese).
- [ 16 ] Gao Yingjun, Wang Yuling. Transmission band of photonic crystals with a defect layer [J]. *Physica Scripta*, 2007, T129: 349-352.
- [ 17 ] Tsu R, Esaki L. Tunneling in a finite superlattice [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **22**(11):562-564.
- [ 18 ] Chang L L, Esaki L, Tsu R. Resonant tunneling in semiconductor double barriers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1974, **24** (12):593-595.
- [ 19 ] Korol A M. Effect of scattering in the potential barriers on the tunneling transparency of a disordered superlattice [J]. *Phys. Rev. B*, 1994, **50**(4):2661-2662.
- [ 20 ] Geng Jiguo, Shi Zonghua, Yan Kezhu. Study of band gap structure of photonic crystals with two defects [J]. *J. Optoelectronics · Laser* (光电子·激光), 2006, **17**(12):1497-1500 (in Chinese).
- [ 21 ] An Liping, Liu Nianhua. The interaction between two defects in one-dimensional photonic crystals [J]. *Journal of Nanchang University*(Natural Science)(南昌大学学报,自然科学版), 2002, **26**(4):337-340 (in Chinese).
- [ 22 ] Liu Jing, Huang Chongqing, Sun Junqiang, et al. Spectral splitting in multiple quantum well structures composed of photonic crystals [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (量子电子学报), 2008, **25**(2):203-207 (in Chinese).

# Transmission Spectrum of Photonic Crystal Quantum-well Structure for Realizable Odd-passage Filter

SU An<sup>1,2</sup>, GAO Ying-jun<sup>2</sup>, JIAO Mei-na<sup>2</sup>, LU Qiang-hua<sup>2</sup>

(1. Department of Physics and Electronic Engineering, Hechi University, Yizhou 546300, China;

2. Department of Physical Science and Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** To the structure of photonic crystal  $(AB)_m(CD)_n(BA)_m$ , when choosing proper structural parameters, its transmission spectra is calculated and simulated by means of the transfer matrix method. At the central frequency of the reduced units  $0.5(\omega a/2\pi c)$ , when the transmission band of photonic crystal  $(CD)_n$  is completely inside the band gap of photonic crystal  $(AB)_m(BA)_m$ , both sharing the same central frequency as their symmetry centers, mirror symmetrical photonic quantum well is formed. At both sides of the central frequencies in the reduced units in the transmission spectra of the well, there are odd resonance-peaks, which symmetrically distributed and orderly localized, and form an obvious quantization effect for transmission-peak. The number and the location of the transmission peaks can be modulated by changing the number of period  $n$  of photonic crystal  $(CD)_n$ . This could be used for designing the adjustably odd-passage filters.

**Key words:** photonic crystal; quantum well; resonance transmission; filter

**CLC number:** O431; O437

**PACS:** 42.70.Qs

**PACC:** 4270Q

**Document code:** A