

# 具有双量子阱结构的一维光子晶体透射谱特性研究

## Transmission Spectra in the Double Quantum Well of One-dimensional Photonic Crystal

苏 安

SU An

(河池学院物理与电子工程系, 广西宜州 546300)

(Department of Physics and Electronic Engineering, Hechi University, Yizhou, Guangxi, 546300, China)

**摘要:** 在适当选择结构参数的基础上, 采用传输矩阵法计算模拟一维光子晶体  $(AB)_m(CD)_n(AB)_m$  结构模型的透射谱, 当光子晶体  $(CD)_n$  相邻的两个导带分别处于光子晶体  $(AB)_m(AB)_m$  相邻的两个禁带中时, 构成一维光子晶体双量子阱结构, 在光子阱透射谱的归一化频率  $0.3(\omega_a/2c)$  和  $0.55(\omega_a/2c)$  两处周围, 分布着两套具有规律的局域共振峰, 出现明显的量子化效应, 且两套透过峰数目都可以通过光子晶体  $(CD)_n$  的重复周期数  $n$  来调节, 这一现象可以用于设计可调性多通道滤波器。

**关键词:** 光子晶体 光子量子阱 共振透射 滤波

中图分类号: O431 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2009)01-0064-03

**Abstract** By choosing structural parameters properly, the transmission spectra of the model of photonic crystal  $(AB)_m(CD)_n(AB)_m$  is calculated by means of the transfer matrix method. When the two transmission bands nearby of photonic crystal  $(CD)_n$  are completely inside the two band gaps nearby of photonic crystal  $(AB)_m(AB)_m$  and the double quantum well of photonic crystal is formed. At both sides of the frequencies  $0.3(\omega_a/2c)$  and  $0.55(\omega_a/2c)$  in the reduced units in the transmission spectra of the well, there is an obvious quantization effect for transmission-peak, which symmetrically distributed and orderly localized. The number of the transmission peaks can be modulated by changing the number of period  $n$  of photonic crystal  $(CD)_n$ . This can be used for designing the adjustable multiple filters.

**Key words** photonic crystal, photonic quantum well, resonance transmission, filter

上世纪 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的研究。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>设计上具有重要的应用。量子阱的概念是由 Esaki 和 Tus 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, 使其在现

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以形成光子晶体量子阱<sup>[9]</sup>, 常见的有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>; 另外一种光子晶体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是材料不同<sup>[3, 4, 8, 11, 12]</sup>。当组成光子晶体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, 可以形成局域的光子态, 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  $(AB)_m(CD)_n(AB)_m$  模型一维光子晶体, 选择适当的结构参数, 计算模拟光子晶体量子阱结构的透射谱, 发现两套量子化的共振透射谱结构, 具

收稿日期: 2008-07-09

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

### 1 一维光子晶体模型及其能带特性

选定一维光子晶体结构模型为  $(AB)_m (CD)_n$  ( $AB)_m$ , 参考文献 [8] 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:  $d_A = d_B = d_C = d_D = a/2$ ,  $a$  为晶格常数,  $\epsilon_A = 6.0, \epsilon_B = 1.0, \epsilon_C = 13.0, \epsilon_D = 1.0$ ,  $m$  和  $n$  可以为任意正整数。

应用传输矩阵理论<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 示, 由 CD AB 介质组成的简单周期结构一维光子晶体  $(CD)_{10}$  和  $(AB)_{10}$  光子透射能带谱如图 2, 图 1 和图 2 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过带的特征。从图 1 和图 2 中可知, 适当地选择光子晶体组成介质的介电常数和厚度可以使一维光子晶体  $(CD)_n$  相邻的第 1 个能带、第 2 个能带分别处于一维光子晶体  $(AB)_m$  相邻的第 1 个、第 2 个禁带之中, 则当在光子晶体  $(CD)_n$  内传播的电磁波频率刚好处于这两区域内时,  $(AB)_m$   $(AB)_m$  光子晶体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  $(CD)_n$  在此频率范围起着势阱的作用<sup>[3, 4, 8]</sup>。因此, 光子晶体  $(AB)_m (CD)_n (AB)_m$  形成了一个一维光子晶体双量子阱结构, 光子晶体  $(AB)_m (AB)_m$  是光量子阱结构的垒, 光子晶体  $(CD)_n$  是光量子阱结构的阱。光子晶体  $(CD)_n$  也可看成是插入光子晶体  $(AB)_m (AB)_m$  内的缺陷层

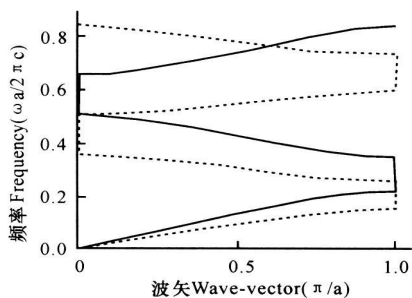


图 1 晶体 AB 与 CD 的色散关系

Fig. 1 Dispersion relationship of AB and CD PCs  
— : AB, ..... : CD

### 2 光量子阱的透射谱结构与分析

固定光量子阱垒层光子晶体  $(AB)_m$  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  $(CD)_n$  重复周期数  $n$  从 1~6 递增, 计算模拟得光量子阱结构  $(AB)_5 (CD)_n (AB)_5$  的光子透射

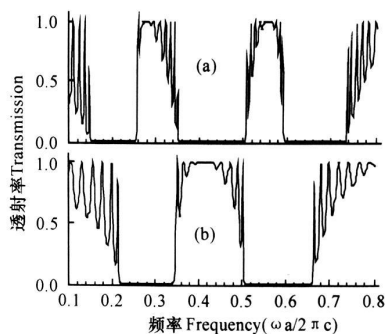


图 2 一维光子晶体的光子透射能带谱

Fig. 2 Transmission spectrum for one-dimensional PCs

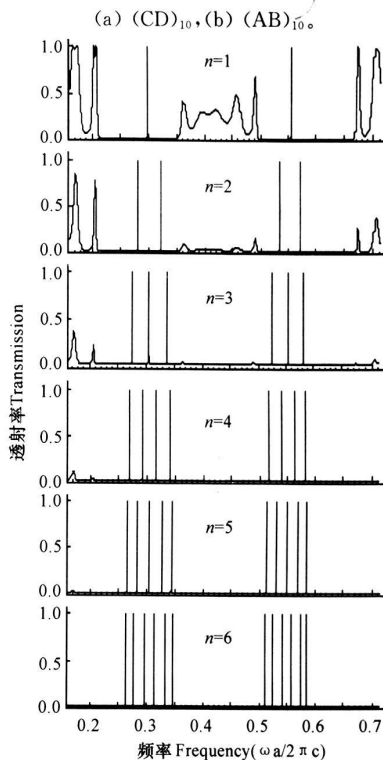


图 3  $(AB)_5 (CD)_n (AB)_5$  光量子阱随  $n$  变化的透射能带谱

Fig. 3 Transmission spectrum for  $(AB)_5 (CD)_n (AB)_5$  photonic QW

从图 3 可知: (1) 在  $0.26 \sim 0.34 (\omega a/2\pi c)$  和  $0.51 \sim 0.59 (\omega a/2\pi c)$  两频率区域分别出现两套具有规律的透射谱线, 各套谱线的条数随光子晶体  $(CD)_n$  重复周期数  $n$  的变化而变化, 并且条数等于数值  $n$ 。从图 1 和图 2 可知, 在  $0.26 \sim 0.34 (\omega a/2\pi c)$  和  $0.51 \sim 0.59 (\omega a/2\pi c)$  两频率区域处, 光子晶体  $(CD)_n$  的第 1 第 2 个能带分别处于光子晶体  $(AB)_n$  的第 1 第 2 个禁带中, 则当在光子晶体  $(CD)_n$  内传播的电磁波频率刚好处于这两区域内时,  $(AB)_5$   $(AB)_5$  光子晶体起着关卡的作用而禁止电磁波在其

内传播,形成光约束,产生量子阱效应。即垒层光子晶体  $(AB)_s(AB)_s$  不能持续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层光子晶体  $(CD)_n$  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量子阱<sup>[3,4,8,14]</sup>。这个量子效应现象从图中尖锐的透过峰可以看出。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。有趣的是,所有的峰对应的透射率都是 100%,就是说,在这些束缚态中,光可以完全透射。这些束缚态与光波的可传输性密切相关,表现为阱中  $0.26 \sim 0.34(\omega_a/2\pi c)$  和  $0.51 \sim 0.59(\omega_a/2\pi c)$  两频率区域处分布的与光子晶体  $(CD)_n$  重复周期数  $n$  密切相关联的两套完全窄透过峰,各组透过峰数目都分别等于  $n$  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及位置,形成可调性的高效多通道光滤波器。对比一般一维光子晶体,要得到不同数目或不同位置的透过峰,常用的方法为在周期性排列的光子晶体不同位置插入相应数目的缺陷,此法比起通过调节阱层光子晶体  $(CD)_n$  的重复周期数  $n$  来控制透过峰数目和位置麻烦得多。另外,该一维光子晶体模型因形成两个相邻的量子阱结构,因此不仅存在出现单套透射谱结构和特点,且同时还增加了结构和特点相同的另一套透射谱,这对于设计光学器件将有重要的作用。

(2)随着阱层光子晶体  $(CD)_n$  周期数  $n$  的增加,光量子阱结构  $(AB)_s(CD)_n(AB)_s$  的禁带(阱)逐渐变宽,最终由双禁带(阱)二合一为一个宽的禁带(阱)。即从  $n=1$  时的  $0.21 \sim 0.36(\omega_a/2\pi c) < \text{带宽 } \Delta\omega = 0.15(\omega_a/2\pi c) >$  和  $0.50 \sim 0.67(\omega_a/2\pi c) < \text{带宽 } \Delta\omega = 0.17(\omega_a/2\pi c) >$  的双禁带,渐变成  $n=6$  时的  $0.15 \sim 0.74(\omega_a/2\pi c) < \text{带宽 } \Delta\omega = 0.59(\omega_a/2\pi c) >$  的单禁带。计算还表明,当垒层光子晶体  $(AB)_m$  的周期数  $m$  大于或等于 10,阱层光子晶体  $(CD)_n$  周期数  $n$  大于或等于 4 时,光量子阱结构即趋向于一个很宽而完整的禁带。因此,利用此光量子阱能够构造出具有非常宽禁带的光学器件。这一特点将在制作宽带光反射镜方面具有重要的应用价值。还有,随着阱层光子晶体  $(CD)_n$  的周期数从 1 增加到 6,光量子阱结构  $(AB)_s(CD)_n(AB)_s$  的能带谱最终都形成一个宽约为  $\Delta\omega = 0.59(\omega_a/2\pi c)$  左右的禁

带,在禁带内,于  $0.26 \sim 0.35(\omega_a/2\pi c)$  和  $0.51 \sim 0.59(\omega_a/2\pi c)$  的两处频率范围分别出现两套透射谱线,所占带宽分别为  $\Delta\omega = 0.09(\omega_a/2\pi c)$  和  $\Delta\omega = 0.08(\omega_a/2\pi c)$ 。若把两套透射谱线看成一个整体,则透射谱线所处范围为  $0.26 \sim 0.59(\omega_a/2\pi c)$ ,带宽则为  $\Delta\omega = 0.33(\omega_a/2\pi c)$ ,比单量子阱结构所占带宽明显增加,这对于拓宽光学器件的频谱范围将产生重要影响。若与单量子阱结构的单套谱线相比,单量子阱结构谱线所处的频率区域宽,而双量子阱结构两组谱线分别所处的频率区域相对较窄。因此,后者在成倍增加透过峰数目的同时,对光波频率的反应还更加灵敏。

(3)随着阱层光子晶体  $(CD)_n$  周期数  $n$  的增加,两组透射谱线的中心逐渐慢慢靠近,各透过峰之间的距离随之减小,则量子阱结构的各透过峰对光频率的反应也将更加灵敏。

### 3 结论

(1)一维光子晶体  $(AB)_s(CD)_n(AB)_s$  由于存在 2 个相邻的光量子阱的缘故,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,使透射峰数目(或者说是通道数)增加一倍,两套透射谱线的条数都分别等于阱层光子晶体  $(CD)_n$  的重复周期数  $n$ 。

(2)在单套透射谱线的情况下,双量子阱结构的一维光子晶体透射谱线所处频率范围更窄,即谱线对光频率的反应敏感度更高。

(3)当把两套谱线看成一整体时,两套谱线所占的带宽一般单量子阱结构的带宽更宽,即适用的频率范围更广。

因为同时出现两套结构和特点,透过峰数目相同的透射谱线,而且透过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一维光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、高灵敏度的双系多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): 2059-2061.

(下转第 69 页 Continue on page 69)

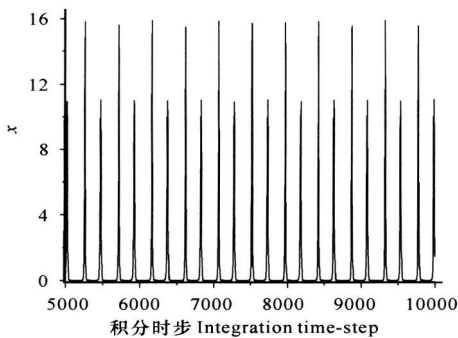


图5 系统被控制在2周期轨道

Fig. 5 The system was controlled at 2-periodic orbit

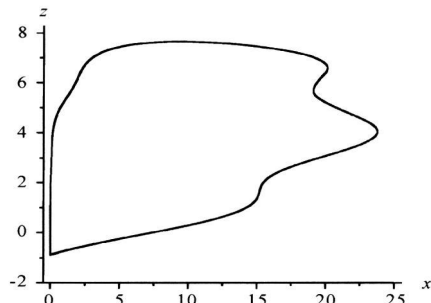


图6 系统被控制在1周期轨道

Fig. 6 The system was controlled at 1-periodic orbit

### 3 结论

在 LMN Y Laser 的前置偏置电压中加入正弦控制信号,通过选择不同的控制强度系数,可以将系统控制在高周期或者低周期轨道上,在提高输出功

率的同时还能得到品质良好的激光输出。该控制方法简单易于工程上实现,对于获得品质良好的高功率激光输出有较好的参考价值。

#### 参考文献:

- [1] Huang L Y, Luo X S. Synchronization of chaotic storage-ring free-electron laser by Bi-Directional coupling scheme with the coupling strength varied periodically [J]. Chin Phys Lett, 2006, 23(2): 297-300.
- [2] 方锦清,姚伟光.非线性环型腔激光器的动力学特性及其混沌控制[J].强激光与粒子束,2001,13(2): 155-163.
- [3] 黄良玉,罗晓曙,方锦清.用滑模变结构控制方法实现外腔反馈式半导体激光器的混沌控制[J].物理学报,2005,54(2): 543-549.
- [4] Meucci R, McAllidter Ryan, Roy Rajarshi. Chaotic function generator Complex dynamics and its control in a loss-modulated Nd: YAG laser [J]. Physical Review E, 2002, 66 026216
- [5] Volodchenko K V, Ivanov V N, Gong Sung-huan. Phase synchronization in coupled Nd: YAG lasers [J]. Optics Letters, 2001, 26(18): 1406-1408.
- [6] Schenckzu Schweinsberg A, Dressler U. Characterization and stabilization of the unstable fixed points of a frequency doubled Nd: YAG laser [J]. Physical Review E, 2001, 63 056210.
- [7] Ahlborn A, Parlitz U. Chaos control of an intracavity frequency-doubled Nd: YAG laser [J]. AIP Conf Proc, 2004, 742 241-246.

(责任编辑: 邓大玉)

(上接第 66页 Continue from page 66)

- [2] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(23): 22486-2489.
- [3] 刘丹东,陈光德,徐忠锋.基于量子阱效应的光开关[J].光子学报,2006,35(9): 1321-1323.
- [4] 胡水龙,徐旭明,于天宝.光子量子单滤波.多通道开关[J].光子学报,2004,33(8): 1004-1005.
- [5] 袁彬彬,蔡祥宝,马骏,等.二维光子晶体光波导透射特性研究[J].光学仪器,2007,29(4): 13-16.
- [6] Esaki L, Tus R. Superlattices and Negative differential conductivity semiconductors [J]. IBM J Res De, 1970, 14 61-65.
- [7] Mendez E E, VonKlitzing K. Physics and applications of quantum wells and superlattices [M]. New York natoasi, 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, Foteinopoulou S, Zhang Lei, et al. Negative refraction and superlensing in a 2D photonic crystal structure [J]. Phys Rev: B, 2005, 71(8): 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): 1-4.
- [11] Chen Xiao-shuang, Lu Wei. Photonic resonant transmission in the quantum-well of photonic crystals [J]. Solid State Commu, 2003, 127(8): 541-544.
- [12] 葛祥友,李平,王效杰,等.不同晶格常数光子晶体构成的光子量子阱中的共振模 [J].应用光学,2006,27(5): 336-338.
- [13] 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.
- [14] 刘靖,黄重庆,孙军强,等.光子晶体多量子阱中的谱线分裂 [J].量子电子学报,2008,25(2): 203-207.

(责任编辑: 邓大玉)