

# 光量子阱单滤波、多通道开关\*

胡水龙<sup>1</sup> 徐旭明<sup>2, \*\*</sup> 于天宝<sup>2</sup>

(1 南昌大学材料科学研究所, 南昌 330047)

(2 南昌大学物理系, 南昌 330047)

**摘 要** 在对称的光学厚度为  $1/4$  波长光子晶体体系中插入另一光学厚度为半波长的光子晶体形成光量子阱. 通过控制入射光强可微小地改变此含缺陷光子晶体材料的介电常数, 从而可形成高效的多通道光学开关, 同时位于中心频率处的 EM 波保持高透射. 研究表明该光学开关的阈值随缺陷光子晶体的层数增加而减小.

**关键词** 光子晶体; 局域; 光开关; 阈值

**中图分类号** O734 **文献标识码** A

## 0 引言

光子晶体是按照晶体的对称性制备的周期性介电结构<sup>[1,2]</sup>, 利用这种周期性介电材料形成光子带隙的特性, 光子晶体可用来制作光学开关、光滤波器、光波导、光学延迟线等等<sup>[3-7]</sup>. 像晶体中的杂质或缺陷会在禁带中形成杂质能级一样, 若在光子晶体中引入缺陷, 在光子禁带中会出现反常的缺陷模<sup>[8-10]</sup>. 由于 EM 模在缺陷中的局域效应, 使得含缺陷的光子晶体有很广阔应用前景<sup>[11-13]</sup>. 将具有不同光子带隙的光子晶体组合在一起可形成光量子阱<sup>[3]</sup>, 若阱中的光子带隙出现在垒中, 我们可观察到局域的光子态, 这些量化的局域态用来形成多通道滤波. 如果位于阱中的局域态强度得到增益, 可以用来设计光学器件, 在非线性光学器件中应用尤为广泛. 例如, 强局域化的电磁场可以降低形成光学双稳态的阈值.

在一个呈对称排布的光子晶体体系正中插入另一光学厚度为半波长的光子晶体形成本文讨论的光量子阱结构, 由于 EM 波被强烈的局域在缺陷处, 使得其不仅可用来做多通道滤波, 还可以作为高效光学开关.

## 1 组合的光子晶体体系

考虑一个由 A 和 B 交替堆砌而成的布洛赫波堆的多层对称系统  $S_n$ , A 层和 B 层的折射率分别为  $n_A$  和  $n_B$ , 光学厚度均为  $\lambda_0/4$  ( $\lambda_0$  为  $1/4$  波堆截止带中心频率  $\omega_0$  对应的波长). 系统结构  $S_n = (AB)_n AA (BA)_n$ , 两端完全对称, 取  $n_A = 2.22, n_B =$

1.41,  $n = 10$ , 其透射谱中与  $\omega_0$  共振的电磁模式完全透射, 形成了一明显的量化局域态, 而且与材料 A、B 无关, 该态两侧对称地分布着一定宽度的禁带<sup>[8]</sup>.

考虑另外一个由 C 和 D 交替堆砌为  $(CD)_m$  的光子晶体  $T_m$ ,  $n_C$  和  $n_D$  分别是 C 层和 D 层的折射率, 光学厚度均为  $\lambda_0/2$ , 将  $T_m$  体系插入  $S_n$  中, 得到  $M_{nm} = (AB)_n A (CD)_m A (BA)_n$  的系统, 形成光量子阱结构,  $n_A, n_B, n$  取值与上面一致,  $n_C = 2.22, n_D = 1.41, m = 3$ , 得到透射谱如图 1 示. 此时,  $(CD)_m$  被看作缺陷, 由于缺陷态的强局域作用, 以中间量化局域态为基准, 对称地出现了两个新的量化局域态, 因而 EM 波被强烈地局域在这些地方. 这些局域态的位置和数目跟  $m, n$  密切相关. 如果保持  $n$  不变, 我们发现, 逐渐增加  $m$ , 分布在两侧的量子态会向中间靠拢, 而且禁带边缘会分裂出新的局域量子态来. 可见, 局域量子态的个数跟  $m/n$  相关,  $m/n$  越大, 对称分布在中间量子态两侧的局域量子态个数也就越多. 这是因为缺陷的数目增多, 局域态也随之增多. 该结构可用来设计多通道滤波器, 根据所需要滤波的滤波频率来调整  $m, n$  的大小.

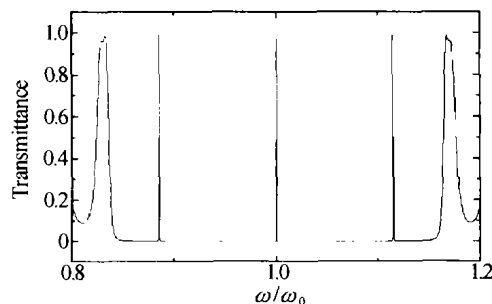


图 1  $(AB)_{10} A (CD)_3 A (BA)_{10}$  光量子阱结构的透射谱  
Fig. 1 Transmission spectrum for symmetric  $(AB)_{10} A (CD)_3 A (BA)_{10}$  PQW structure

## 2 光开关的形成

我们利用上述结构来构造低阈值的多通道光开

\*国家自然科学基金(批准号:62068001)、江西省自然科学基金资助项目和南昌大学基础理论基金项目资助

\*\* Email: ncxmxcn@ncu.edu.cn

收稿日期:2003-07-21

关. 材料 A 和 C 采用 GaAs, B 和 D 采用 SiO<sub>2</sub>, 折射率分别为 3.4 和 2.22. 选择  $m=10, n=5$ , 透射谱的禁带中出现了三个局域的响应态. 下面讨论对称分布在中间局域态两侧的光量子态的变化. 如果通过光照来同时改变 C、D 的介电常数, 由于折射率  $n = \sqrt{\epsilon}$ , 折射率也随之而发生改变. 图 2 画出了在  $\Delta n_c = \Delta n_d = 0.003$  的情况下, 两端局域响应态的透射率的变化, 从图中很容易看到, 只要 C、D 的介电常数起了很微小的变化, 局域响应态的透射峰就会有一个较大的偏移, 从而使得局域的响应态的透射率就急剧下降, 当入射光强度减少到原来的 5% 时便形成了光开关, 图 3 还给出了  $n_c$  从 3.4 逐渐增到 3.41 时透射率的变化情况, 从图中也明显可以看出随着  $\Delta n_c, \Delta n_d$  的增大, 透射峰的偏移越大, 透射率的变化加剧. 相应地, 入射光的强度控制着光开关的阈值. 实际上, 体系 T<sub>m</sub> 中材料介电常数的改变就反映了入射光强的阈值. 增加 T<sub>m</sub> 的层数, 我们发现两端局域的响应态向中间靠拢, 且其半宽由于局域化的增强而变窄, 此时, 形成光开关所需的阈值光强逐渐减小, 因而形成了更加高效的光开关. 与此同时, 禁带两端分离出新的量化局域态来, 这些态的半宽比原来要大, 从而这些响应态形成光开关的阈值不会小于靠近中端的局域态. 也就是说, 多通道开关形成的阈值决定于最边缘需要形成光通开关的阈值. 从另一个角度考虑, 由于 EM 波被强烈的局域在缺

陷处, 只要缺陷层的光学长度起了非常微小的变化就能导致 EM 波位相的改变, 如此就改变了局域态的透射状态. 与此同时, 无论介质的介电常数如何改变, 对应于布洛赫波堆特征频率  $\omega_0$  的响应态透射率始终保持高透射. 因此, 我们可以通过控制入射光强反转所有位于禁带中 (除了位于中心频率的局域态) 的量化响应态. 这样就可以用来构造低阈的多通道光开关, 同时通过调整体系材料的光学厚度, 可以使得某个频率位于中心频率处而自始至终保持高透射性. 如此就实现了单滤波、多通道光学开关的设计. 当然, 如果不需要某个频率保持高透射, 可让 S<sub>n</sub> 光子晶体体系不采用对称的结构, 即去除 T<sub>m</sub> 两端的 A 层, 这样中心频率处不再有高透的局域态, 位于禁带中所有的局域态都能够通过控制入射光强而反转, 形成纯粹的多通道光开关.

### 3 结论

利用光学厚度为半波长的光子晶体作为光子量子阱插入对称的光子晶体体系中, EM 波被强烈的局域化. 局域化的光子量子态依赖于缺陷材料, 通过控制入射光强微小改变缺陷光子晶体材料的介电常数形成高效的多通道光开关, 同时, 由于母体光子晶体的对称性, 使得位于中心频率处的 EM 波保持高透射, 如此形成了单透、多通道的光开关. 增加缺陷光子晶体的层数, 该光学开关的阈值减小.

#### 参考文献

- 1 Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(20): 2059 ~ 2062
- 2 John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(23): 22486 ~ 2489
- 3 Qiao F, Zhang C, Wang J, et al. Photonic quantum-well structures; Multiple channeled filtering phenomena. *Appl Phys Lett*, 2000, **77**(23): 3698 ~ 3702
- 4 Lan S, Nishikawa S, Wada O. Leveraging deep photonic band gaps in photonic crystal impurity bands. *Appl Phys Lett*, 2001, **78**(15): 2101 ~ 2103
- 5 Zhu S Y, Liu N H, Chen H, et al. Time delay of light propagaton defect modes of one-dimensional photonic band-gap structures. *Opt Commun*, 2000, **174**(2): 139 ~ 143
- 6 Joannopoulos J D, Meade R D, Winn J N. Photonic crystals, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1995: 19 ~ 32
- 7 欧阳征标, 刘海山, 李景镇. 光子晶体超窄带滤波器. 光子学报, 2002, **31**(2): 281 ~ 283
- 8 Ouyang Z B, Liu H S, Li J Z. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(2): 281 ~ 283
- 9 Yablonovitch E, Gmitter T G. Donor and acceptor modes in

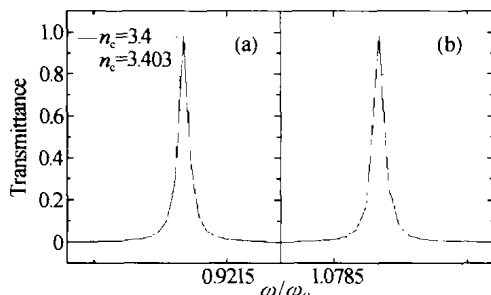


图 2 (AB)<sub>10</sub>A(CD)<sub>5</sub>A(BA)<sub>10</sub> 光子量子阱结构局域态与缺陷层介电常数的变化关系

Fig. 2 Dependence of the confined for (AB)<sub>10</sub>A(CD)<sub>5</sub>A(BA)<sub>10</sub> PQW structure on dielectric constant change of defects materials

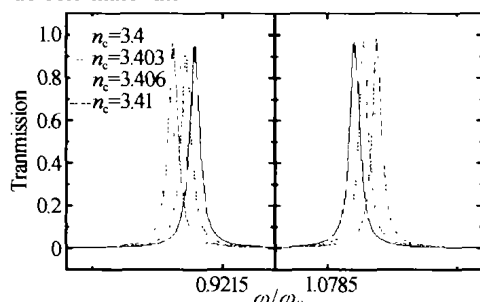


图 3 (AB)<sub>10</sub>A(CD)<sub>3</sub>A(BA)<sub>10</sub> 光子量子阱结构的透射谱随  $n_c$  的变化

Fig. 3 The transmission spectrum for symmetric (AB)<sub>10</sub>A(CD)<sub>3</sub>A(BA)<sub>10</sub> PQW structure's change with  $n_c$

- photonic band structure. *Phys Rev Lett*, 1991, **67**(24):3380 ~ 3383
- 9 Liu N H. Defect modes of stratified dielectric media. *Phys Rev(B)*, 1997, **55**(7):4097 ~ 4100
- 10 安丽萍,刘念华. 一维光子晶体中多缺陷耦合导致的杂质带. *光子学报*, 2003, **32**(9):1083 ~ 1085  
An L P, Liu N H. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9):1083 ~ 1085
- 11 Lan S, Nishikawa S, Sugimoto Y. *Phys Rev(B)*, 2002, **65**(16):165208-1 ~ 09
- 12 Lan S, Nishikawa S, Ishikawa H, *et al.* Design of impurity band-based photonic crystal waveguides and delay lines for ultrashort optical pulse. *J Appl Phys*, 2001, **90**(9):4321 ~ 4327
- 13 Fan S, Villeneuve P R, Joannopoulos J D, *et al.* Channel prop tunneling through localized states. *Phys Rev Lett*, 1998, **80**(5):961 ~ 963

## The Single Filtering and Multiple Channeled Switchs in Photonic Quantum-well Structures

Hu Shuilong<sup>1</sup>, Xu Xuming<sup>2</sup>, Yu Tianbao<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Materials Science, Nanchang University, Nanchang 330047

<sup>2</sup> Department of Physics, Nanchang University, Nanchang 330047

Received date: 2003-07-21

**Abstract** The formation of photonic quantum well structures by employing another half wave photonic crystals in symmetrical quarter-wave photonic crystals is demonstrated. Due to the strong localization of electromagnetic wave at defect regions, the confined states are greatly dependent on the defects. High-efficiency multiple channeled optical switches can be realized by the small changes of the dielectric constants the defect PC induced by a control light. The strong localization of EM wave can be realized by using an impurity band of coupled cavity as an optical well. At the same time, the EM wave in the center frequency is kept to high transmission. The threshold of such switches can be made very low by increasing the layer number of defect PC.

**Keywords** Photonic crystal; Located; Optical switch; Threshold

**Hu Shuilong** was born in Gaoan, Jiangxi province on Sep. 02, 1977. He received his bachelor degree of science from physics department of Nanchang University in 2001. Now, he is a M. S. candidate in Nanchang University. His main research interests are in the field of condensed matter physics and photonic crystals.