

文章编号: 1000-7032(2010)01-0007-05

## 用两端对称缺陷复合光子晶体实现多通道滤波和光开关

陈海波<sup>1</sup>, 胡素梅<sup>1</sup>, 高英俊<sup>2</sup>

(1. 茂名学院 物理系, 广东 茂名 525000; 2. 广西大学 物理科学与工程技术学院, 广西 南宁 530004)

**摘要:** 用传输矩阵法计算了两端对称缺陷复合光子晶体结构的光传输特性。计算结果表明: 两端对称缺陷复合光子晶体 $[D(AB)^mD]^2$ 结构中的禁带出现两个完全共振透射峰。通过控制入射光强来微调光子晶体材料的介电常数, 使得完全共振透射峰移动, 且介电常数变化越大, 共振透射峰偏移越大, 从而形成高效率的双通道光开关。当光子晶体为 $[D(AB)^mD]^N$ 结构时, 每个完全共振透射峰都分裂为 $N-1$ 条, 这样可通过调节 $N$ 同时实现所需要通道数目的高效多通道光开关和多通道滤波器。

**关键词:** 复合光子晶体; 共振透射峰; 多通道滤波; 多通道光开关

**中图分类号:** O431.1

**PACS:** 42.70.Qs

**PACC:** 4270Q

**文献标识码:** A

## 1 引 言

自 Yablonovitch 和 John 在 1987 年分别提出光子晶体概念以来<sup>[1,2]</sup>, 人们对光子晶体进行了深入的研究。“光子禁带”和“光子局域”是光子晶体的两个主要特征。频率落在禁带中的光被禁止传播<sup>[3,4]</sup>。近来人们发现含有缺陷的光子晶体具有许多新的物理现象, 并且有广泛的应用价值。含缺陷的光子晶体可用来制作激光器<sup>[5,6]</sup>、发光二极管<sup>[7,8]</sup>、滤波器<sup>[9,10]</sup>等。目前的研究主要集中在光子晶体结构中间加入缺陷层, 如果将光子晶体的两端加入缺陷, 构成两端缺陷层的光子晶体, 同时将几个该结构的光子晶体组合在一起构成复合光子晶体, 可把其中一个光子晶体看做缺陷, 这种缺陷的可调参数比常规的单缺陷多, 同时这种结构在某种条件下还能扩大光子带隙。

本文研究了一维光子晶体两端加入缺陷层后的光传输特性, 同时研究了重复增加此含缺陷的光子晶体的层数形成复合光子晶体结构的光传输特性, 得到了一些有意义的结果, 给光子晶体实现多通道滤波和光开关提供了理论依据, 且通过调节复合光子晶体的层数可得到所需要通道数目的高效多通道光开关。

## 2 理论方法与结构模型

研究光子晶体最常用的一种方法是传输矩阵法。由于该方法已有很多文献进行详细的讨论, 本文不再深入阐述。为简单起见, 本文只讨论垂直入射的情况, 因此 TM 波和 TE 波完全相同, 也不再区分。本文讨论的两端对称缺陷复合光子晶体结构可表示为 $[D(AB)^mD]^N$ 的形式, 光子晶体中介电层 AB 的材料分别为  $\text{TiO}_2$  和空气,  $\text{TiO}_2$  的介电常数和厚度为  $\varepsilon_A = 5.4289$ ,  $d_A = 40.9$  nm, 空气的介电常数和厚度为  $\varepsilon_B = 1$ , 且  $d_B = 191$  nm, 缺陷层 D 采用  $\text{SiO}_2$ , 其介电常数和厚度为  $\varepsilon_D = 2.1025$ ,  $d_D = 100.1$  nm。

## 3 数值结果模拟与分析

为比较两端对称缺陷复合结构和单周期结构光子晶体, 首先分别计算了 $[D(AB)^8D]^1$ 和 $[D(AB)^8D]^2$ 结构的带隙特性, 分别如图 1(a) 和 (b) 所示。从图 1(a) 可知, 单周期结构的光子晶体 $[D(AB)^8D]^1$ 具有宽禁带的特点, 且禁带中无透射峰。而如图 1(b) 所示的复合结构的光子晶体 $[D(AB)^8D]^2$ 不改变单周期结构的带宽, 但在禁带中出现了两个共振透射峰。这是因为复合结构形成后, 光子沿复合生长方向的运动受到了约

收稿日期: 2008-11-10; 修订日期: 2009-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(50061001); 茂名学院自然科学基金(200853)资助项目

作者简介: 陈海波(1977-), 男, 湖南隆回人, 主要从事光信息材料的研究。

E-mail: chbnihao0923@163.com

束,原来不可能出现透射峰的光子禁带中出现了透射峰,每个透射峰对应于一个分离束缚态,各束缚态自始至终保持高透射性,透射率都接近 1。物理机制如下:EM 波以共振贯穿方式通过复合光子晶体,当入射光子的能量与复合光子晶体中的束缚态能量一致时,贯穿概率可接近 1;而能量不等时,贯穿概率几乎为 0。

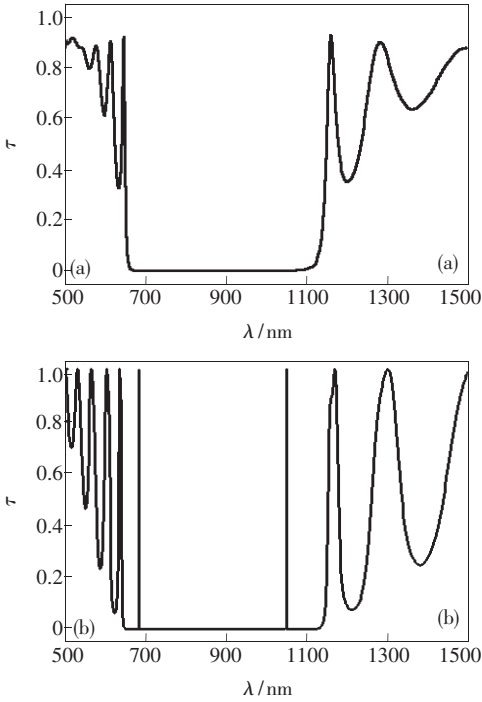


图 1  $[D(AB)^8D]^1$  (a) 和  $[D(AB)^8D]^2$  (b) 结构光子晶体的透射谱

Fig. 1 Transmission spectra for  $[D(AB)^8D]^1$  (a) and  $[D(AB)^8D]^2$  (b) structure photonic crystals

为了更清楚地说明复合结构  $[D(AB)^mD]^N$  中  $N$  对谱线分裂的影响,图 2(a)、(b)、(c) 分别给出了该结构中  $N$  分别为 3, 4, 7 对应的透射谱。与图 1 比较,缩小了波长范围,只选取了波长大约为 687.2 nm 处束缚态所对应的波长范围,以便能够清楚地分辨各分裂谱。由图可见,此透射峰分裂成了多个共振透射峰, $N$  越大,透射峰分裂得越多。对比发现,图 1(b) 中的另一共振透射峰也具有此特点,并发现每一共振透射峰都分裂为  $N - 1$  个。我们可以用紧束缚方法分析在这种复合结构中共振透射模式产生的机理。在复合量子阱结构中,在此波长范围内,每一个光子晶体可以看作一个缺陷,且将出现共振模式。每一缺陷层有相应的共振模式,也称为本征模式。由于耦合作用,共

振贯穿而成的本征模式将分裂,这个分裂属于共价键组合成键和反成键类型。由紧束缚方法可得,分裂模式的数目等于缺陷层的数目。在我们的这种  $[D(AB)^mD]^N$  结构中有  $N - 1$  个缺陷层,因此每一本征模式对应的透射峰将分裂为  $N - 1$  个。由 TB 方法分析可得,缺陷膜间的距离导致了透射膜在波长上的分裂。仔细比较图 2 中共振峰的分裂谱,可以发现各分裂谱线波长很接近,复合结构中周期数越多,波长间隔越小,这样波谱利用率将大大提高。由于各条谱线互不交叠,这样在有限的禁带区域可以成倍增加光子束缚态,使信道密度最大化,光波有效带宽的使用最优化,有望在光通信超密集波分复用和光学精密测量中获

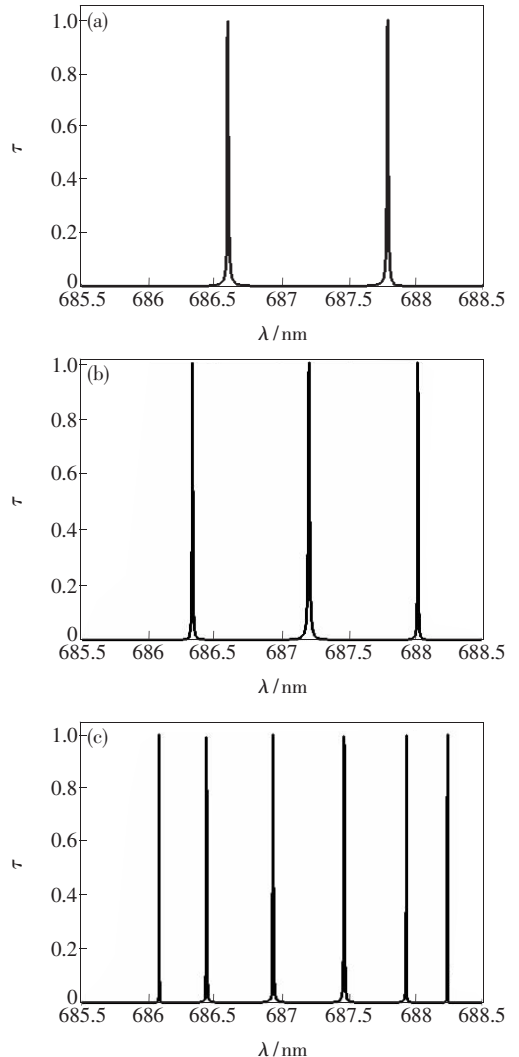


图 2 不同  $N$  的  $[D(AB)^8D]^N$  结构光子晶体的透射谱 (a)  $N=3$ ; (b)  $N=4$ ; (c)  $N=7$

Fig. 2 Transmission spectra for  $[D(AB)^8D]^N$  structure photonic crystal with (a)  $N=3$ ; (b)  $N=4$ ; (c)  $N=7$ .

得广泛应用。同时,我们只要简单地改变该结构中的周期数  $N$ , 就可以得到所需要通道数目的多通道滤波器。

如果通过光照来同时改变 A、D 的介电常数, 则复合结构中共振束缚态所对应的能量将发生改变, 因此束缚态所对应的波长也将随之变化, 故光子晶体透射谱中的共振透射峰将发生移动。图 3 给出了  $\Delta\varepsilon_A = \Delta\varepsilon_D = 0.000 5$  时,  $[D(AB)^8D]^2$  结构中两束缚态透射率的变化, 为了更清晰地考察透射峰的变化, 图中只给出了束缚态附近的波长范围内的透射谱。从图中可以看出, 只要 A、D 的介电常数有很微小的变化, 束缚态的透射峰就会有一个较大的偏移, 从而使得束缚态的透射率急剧下降。这给该结构的光子晶体实现双通道光开关提供了理论基础。同样, 图 4 给出了  $\Delta\varepsilon_A = \Delta\varepsilon_D = 0.000 5$  时, 复合结构  $[D(AB)^mD]^N$  中  $N$  分别为 3, 4, 7 对应的束缚态的变化。从图中可以看出, A、D 的介电常数起了很微小的变化时, 图 2 中束缚态的每个分裂透射峰就会有一个较大的偏移。这样可以通过简单地调节  $N$  得到所需要通道数目的光开关。这也给该结构的光子晶体同时实现多通道滤波功能和光开关功能提供了理论依据。

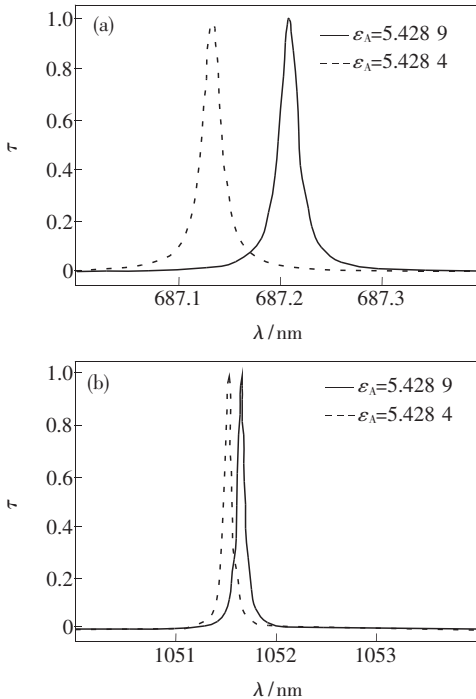


图 3  $[D(AB)^8D]^2$  结构光子晶体的束缚态与介电常数的变化关系

Fig. 3 Dependence of the confined states for  $[D(AB)^8D]^2$  structure photonic crystal on dielectric constant

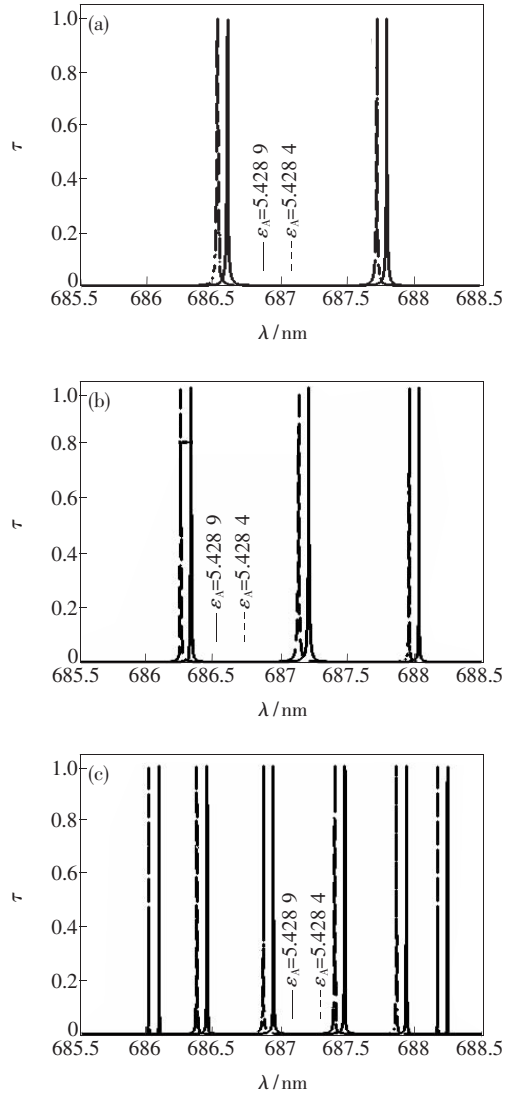


图 4 不同  $N$  的  $[D(AB)^8D]^N$  结构的束缚态与光子晶体介电常数的变化关系 (a)  $N=3$ ; (b)  $N=4$ ; (c)  $N=7$   
Fig. 4 Dependence of the confined states for  $[D(AB)^8D]^N$  structure photonic crystal on dielectric constant with different  $N$ , (a)  $N=3$ ; (b)  $N=4$ ; (c)  $N=7$ .

为了更清晰地得出光子晶体的介电常数的变化与束缚态偏移的情况, 图 5 给出  $\varepsilon_A$  从 5.428 9 逐渐减小到 5.426 9 时,  $[D(AB)^mD]^2$  结构中波长大约为 687.2 nm 处束缚态透射率的变化情况。由图可见, 介质的介电常数变化越大, 透射峰的偏移越大。

图 6 进一步地给出了  $\varepsilon_A$ 、 $\varepsilon_D$  的变化量与束缚态偏移量的关系, 图中假设 A、D 介电常数的变化相等, 即  $\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_A = \Delta\varepsilon_D$ , 从图 6 可以看出, 复合结构的各介质介电常数的变化与束缚态波长的变化基本上呈线性关系, 说明各介质的介电常数变

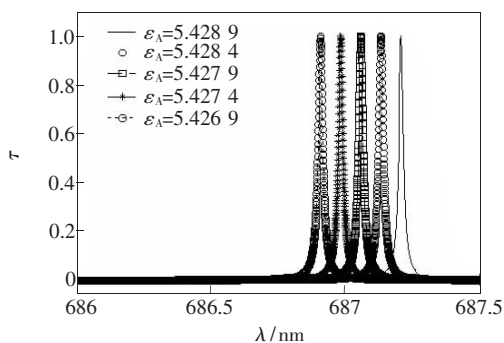


图 5  $[D(AB)^8D]^2$  结构光子晶体的束缚态随  $\varepsilon_A$  的变化关系

Fig. 5 Dependence of the confined state for  $[D(AB)^8D]^2$  structure photonic crystal on  $\varepsilon_A$

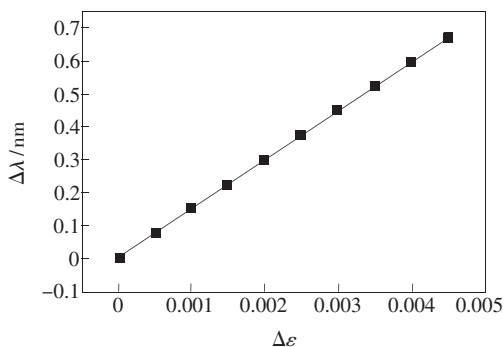


图 6  $[D(AB)^8D]^2$  结构光子晶体束缚态波长变化量与  $\varepsilon_A$ 、 $\varepsilon_D$  变化量的关系

Fig. 6 Dependence of the confined wavelength variation  $\Delta\lambda$  on  $\Delta\varepsilon$  for  $[D(AB)^8D]^2$  structure photonic crystal

化越大,束缚态的波长偏移越大。因此,我们可以通过改变光照来微小地改变束缚态的波长,即通过改变光照来得到我们所需要的束缚态的波长。同时我们也可以由束缚态的波长来计算不同光照下介质的介电常数。

## 4 结 论

用传输矩阵法计算了两端对称缺陷复合光子晶体结构的光传输特性。计算结果表明:两端对称缺陷复合光子晶体  $[D(AB)^mD]^2$  结构中的禁带出现两个完全共振透射峰。通过光照来微小改变光子晶体介质的介电常数,共振透射峰将发生移动,且介电常数变化越大,共振透射峰偏移越大,进而形成高效的双通道光开关。而在复合结构  $[D(AB)^mD]^N$  中,两个共振透射峰都分裂为  $N-1$  条,且各分裂谱线波长很接近;复合结构中周期数  $N$  越大,波长间隔越小,这样波谱利用率大大提高,且各条谱线互不交叠,这样在有限的禁带区域可以成倍增加光子束缚态,使信道密度最大化,光波有效带宽的使用最优化,有望在光通信超密集波分复用和光学精密测量中获得广泛应用。同时,可以通过调节  $N$  来同时实现我们所需要通道数目的多通道滤波器和多通道光开关。

## 参 考 文 献:

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **5** (20):2059-2061.
- [2] John S. Strong localities of photons in certain disordered dielectric super lattices [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23):2486-2489.
- [3] Chen Haibo, Gao Yingjun, Hu Sumei. Properties of mirror symmetrical photonic crystals with an imaginary part of dielectric constant defect [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2008, **29**(2):233-236 (in Chinese).
- [4] Li Hongtao, Shao Mingzhu, Luo Shiyu. Band structure of one-dimensional photonic crystal with dielectric constant as a sine-squared function in coordinate space [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2008, **29**(2):230-232 (in Chinese).
- [5] Liu Shengli, Li Yigang, Gao Yanli. High power widely tunable Yb-doped photonic crystal fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2007, **27**(9):1664-1667 (in Chinese).
- [6] Benisty H, Weisbuch C, Olivier S, et al. Low-loss photonic-crystal and monolithic InP integration: bands, bend, lasers, filters [J]. *SPIE*, 2004, **5360**:119-128.
- [7] Chow E, Liu S Y, Johnson S G, et al. Three-dimensional control of light in a two-dimensional photonic crystal slab [J]. *Nature*, 2000, **407**(6807):983-986.
- [8] Yanikm F, Fan S. All-optical transistor action with bistable switching in a photonic crystal cross-waveguide geometry [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(24):2506-2508.
- [9] Xudong C, Hafner C, Vahldieck R. Design of ultra-compact metallo-dielectric photonic crystal filters [J]. *Optics Express*,

2005, **13**(16):6175-6180.

- [10] Qiao F, Zhang C, Wang J, *et al.* Photonic quantum-well structures: Multiple channeled filtering phenomena [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(23):3698-3702.
- [11] Yan Mingbao, Wang Hailong, Zhou Ping. Transmission properties of 2D photonic crystals with triangular dielectric rods [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2009, **30**(1):1-6 (in English).
- [12] Wu Yaode, Li Jijun, Chen Haiyan. Propagating characteristics and applications of parallel photonic crystal waveguides [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2009, **30**(5):673-677 (in Chinese).
- [13] Zhang Zhengren, Long Zhengwen, Yuan Yuquan. Transmission characteristic of GHz wave band in dispersive photonic crystal [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2009, **30**(5):678-681 (in Chinese).

## Multiple Channeled Filters and Optical Switches Using Compound Photonic Crystal with Two Symmetrical Defect Layer at The Two Ports

CHEN Hai-bo<sup>1</sup>, HU Su-mei<sup>1</sup>, GAO Ying-jun<sup>2</sup>

(1. Department of Physics, Maoming College, Maoming 525000, China;

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

**Abstract:** By using the method of optical transfer matrix, the optical transmission properties of compound photonic crystal with two symmetrical defect layer at the two ports were studied. The investigation results showed that two resonance transmittance peaks exist in the band gap in dual-period photonic crystal  $[D(AB)^mD]^2$  structure. The resonance transmittance peaks will shift with the small changes of the dielectric constants of photonic crystal induced by a control light. The more the dielectric constants change, the more resonance transmittance peaks shift, leading to high-efficiency dual channeled optical switches being realized. Each resonance transmission peak can split into  $N - 1$  different transmission peaks in the  $[D(AB)^mD]^N$  structure photonic crystal. We can gain appropriate multiple channel filters and optical switches by adjusting  $N$ .

**Key words:** compound photonic crystal; resonance transmittance peak; multiple channel filters; multiple channeled optical switch

**CLC number:** O431.1

**PACS:** 42.70.Qs

**PACC:** 4270Q

**Document code:** A