

两端对称缺陷复合光子晶体特性研究

陈海波¹, 胡素梅¹, 高英俊²

(1. 广东石油化工学院物理系, 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的传输特性。计算结果表明:两端对称缺陷复合光子晶体 $[D(AB)^m D]^2$ 结构中的禁带出现两个完全共振透射峰。通过控制温度来微小改变光子晶体介电层的厚度,使得完全共振透射峰移动,且各介质厚度的变化与透射峰波长的变化呈良好的线性关系,折射率大的介电层厚度的变化对共振透射峰波长的变化较大。此结果为设计所需要的共振透射峰波长的双通道滤波器提供了理论依据,也为该结构实现热敏开关提供了理论基础。

关键词:复合光子晶体;介电厚度;双通道滤波;热敏开关

中图分类号:0431

文献标识码:A

Properties of compound photonic crystal with two symmetrical defect layer at the two sides

CHEN Hai-bo¹, HU Su-mei¹, GAO Ying-jun²

(1. Dept of Physics, Guangdong University of Petrochemical Technology, 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 are studied. The investigation results show that two resonance transmittance peaks exist in the band gap in dual-period photonic crystal $[D(AB)^m D]^2$ structure. The resonance transmittance peaks will shift with the small changes of the dielectric thickness of photonic crystal induced by a control temperature. The dependence of the wavelength change of transmittance peaks for $[D(AB)^m D]^2$ structure on each dielectric thickness change is linear. The larger the dielectric constants, the more resonance transmittance peaks effect on the dielectric thickness. The conclusion is might be used to dual-channeled filters and temperature sensing switching.

Key words: compound photonic crystal; dielectric thickness; dual-channeled filters; temperature sensing switching

1 引言

从 Yablonovitch 和 John 分别在 1987 年提出光子晶体概念以来^[1-2],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^[3-4]。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。含缺陷的光子晶体可用来制作激光器^[5-6]、光开关、发光二极管^[7-8]、滤波器^[9-10]等。但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

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 50661001);广西科学基金项目(桂科基 No. 0342004-1);茂名学院自然科学基金项目(No. 200853)资助。

作者简介:陈海波(1977-),男,硕士,高级实验师,主要从事光信息材料的研究。E-mail: chbnihao0923@163.com

收稿日期:2010-10-27

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。光子晶体制成后结构很难调节,人们还是希望通过改变外部条件来调节光子晶体的光传输特性。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,同时研究了通过改变温度来改变介质厚度,进而改变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,给光子晶体实现双通道滤波和热敏开关提供了理论依据。

2 理论与方法结构模型

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 $[D(AB)^m D]^N$ 的形式,光子晶体中介电层 AB 的材料分别为 Si 和空气, Si 的介电常数和厚度如下: $\varepsilon_A = 16.8921$, $d_A = 36.4 \text{ nm}$, 空气的介电常数和厚度为 $\varepsilon_B = 1$, 且 $d_B = 180 \text{ nm}$, 缺陷层 D 采用 SiO_2 , 其介电常数和厚度为 $\varepsilon_D = 2.1025$, $d_D = 95.5 \text{ nm}$ 。

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,首先计算了 $[D(AB)^8 D]^1$ 和 $[D(AB)^8 D]^2$ 结构的带隙特性分别如图 1(a) 和图 1(b) 所示。从图 1(a) 可知,单周期结构的光子晶体 $[D(AB)^8 D]^1$ 在 $460 \sim 1130 \text{ nm}$ 之间具有一宽禁带,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 $[D(AB)^8 D]^2$ 不改变单周期结构的带宽,但在禁带中 489.707 nm 和 862.53725 nm 处分别出现了共振透射峰 1 和共振透射峰 2。这是因为复合形成后,光子沿复合生长方向的运动受到了约束,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量子化的束缚态,各束缚态自始自终保持高透射性,透射率都接近 1。物理机制如下:电磁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;能量不等时,贯穿概率几乎为 0。此现象为该结构实现双通道滤波器提供了理论基础。复合结构光子晶体各介质的厚度很明显会影响共振透射峰的位置。

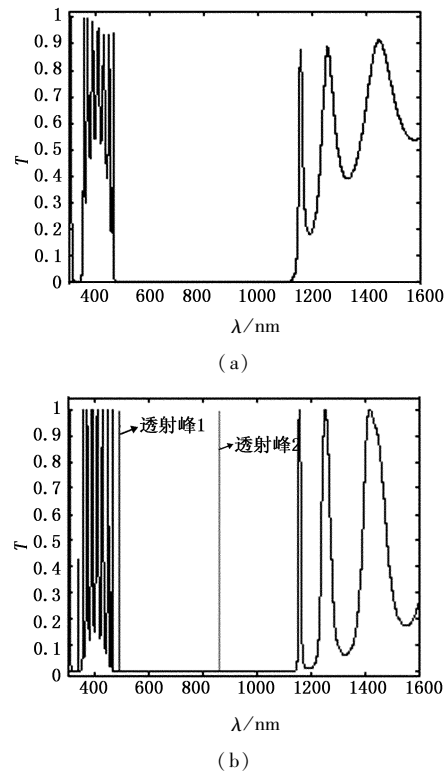
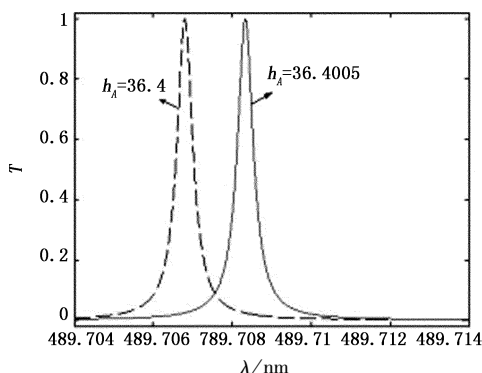


图1 $[D(AB)^8 D]^1$ 和 $[D(AB)^8 D]^2$ 结构的透射谱

Fig. 1 transmission spectrum for $[D(AB)^8 D]^1$ and $[D(AB)^8 D]^2$ structure

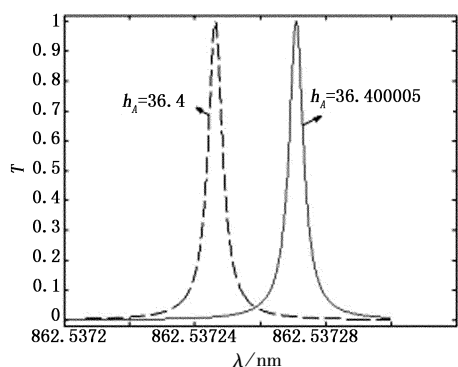
如果通过改变温度来微小地改变各介质的厚度,则复合结构中共振束缚态的能量将发生改变,因此束缚态的波长也将随之变化,故光子晶体透射谱中的共振透射峰将发生移动。做为例子,图 2(a) 绘出了 A 介质的厚度变化 0.0005 nm 时, $[D(AB)^8 D]^2$ 结构中共振透射峰 1 位置的变化,图中实线和虚线分别对应 A 介质厚度为 36.4 nm 和 36.4005 nm 。图 2(b) 绘出了 A 介质的厚度变化 0.000005 nm 时,该结构中共振透射峰 2 位置的变化,图中实线和虚线分别对应 A 介质厚度为 36.4 nm 和 36.400005 nm 。为了更清晰地考察透射峰的变化,图中只给出了共振透射峰附近的波长范围对应的透射谱。从图中可以看出,只要 A 的厚度起了很微小的变化,两共振透射峰都有一个较大的偏移,从而使得束缚态的透射率急剧下降。当 A 介质厚度的变化量为原来的 1.37×10^{-5} 时,透射峰 1 就发生偏移,原位置的透射峰消失;而当 A 介质厚度的变化量为原来的 1.37×10^{-7} 时,透射峰 2 就发生偏移,原位置的透射峰也消失,且透射峰 2 对介质的厚度变化更灵敏。经计算,当透射峰 1 的透射率变为原来的 5% 时,波长移动了 0.0008 nm ,而当透射峰 1 的透射率变为原来的 5% 时,波长移动了 0.00002 nm 。这给该结构的光子

晶体实现双通道热敏开关提供了理论基础。



(a) 透射峰 1

(a) transmission peak 1



(b) 透射峰 2

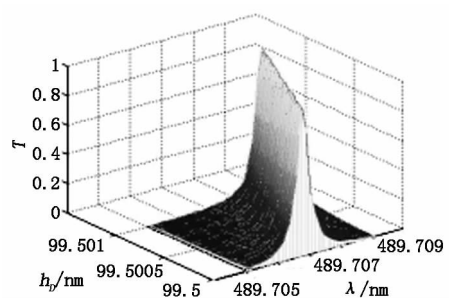
(b) transmission peak 2

图2 $[D(AB)^8D]^2$ 复合结构透射峰与A介质厚度的变化关系

Fig.2 dependence of the confined for $[D(AB)^8D]^2$ structure on C dielectric thickness change

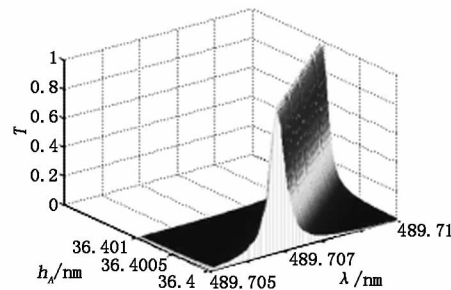
图3和图4给出了介质层A、D厚度变化与两透射峰变化的立体图,从图3可以看出,复合结构的光子晶体各介质厚度变化与透射峰波长的变化都呈良好的线性关系,说明各介质的厚度变化越大,透射峰的波长偏移越大。这是因为改变各介质的厚度,也就改变了各介质的位相,引起光子晶体导通带移动,从而实现对透射峰波长的调整。从图3也可以看出,折射率大的介质A的厚度变化对透射峰波长的变化影响较大。这是因为A介质的厚度起了非常微小的变化就使得光学厚度有比较大的变化,进而导致电磁波位相的改变,从而改变透射峰的透射状态,同时透射峰2受介质厚度的影响大于透射峰1,且透射峰2比透射峰1更尖锐,半峰宽小,品质因子高。从图2和图3及图4也可以看出,我们可以通过改变温度来微小地改变介质的厚度,进而得到所需要的束缚态的波长。因为在一个全光网络系统中,通道位置和品质因子Q对滤波器都是很重要的,这在光通信系统中对设计双通道滤波器具有

很重要的意义。



(a) 介质D

(a) dielectric layer D

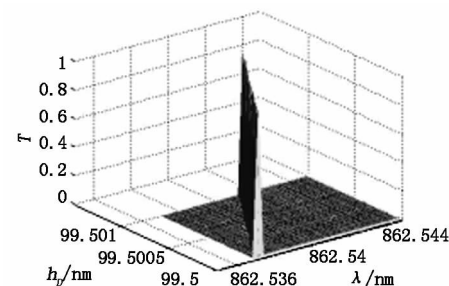


(b) 介质A

(b) dielectric layer A

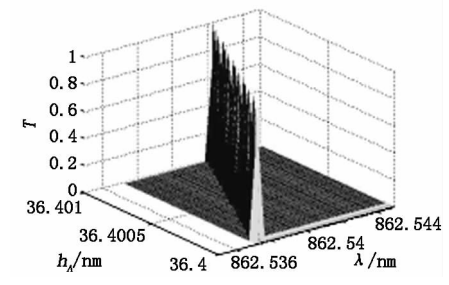
图3 透射峰1随各介质厚度变化的立体图

Fig.3 the 3-D of the first transmission peak Resulting from the thickness



(a) 介质D

(a) dielectric layer D



(b) 介质A

(b) dielectric layer A

图4 透射峰2随各介质厚度变化的立体图

Fig.4 the 3-D of the second transmission peak resulting from the thickness

图5和图6进一步分别画出了组成 $[D(AB)^8D]^2$ 复合结构的介电层D和A厚度与透射峰

1 和透射峰 2 波长变化的关系。从图 5 可以看出,各介电层 D 和 A 的厚度变化与透射峰 1 波长的变化呈良好的线性关系,且当介电层 D 和 A 的厚度分别变化 1 nm 时,透射峰波长变化了 1.8 nm 和 3 nm。从图 6 也可以看出,介电层 D 和 A 的厚度变化与透射峰 2 波长的变化也呈良好的线性关系,且当介电层 D 和 A 的厚度分别变化 1 nm 时,透射峰波长变化了 4.4 nm 和 5 nm。

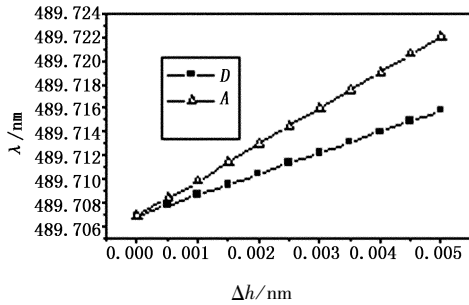


图5 透射峰 1 波长变化与介电层 A 和 D 厚度的变化关系
Fig.5 dependence of the change of the first transmission peak on
 A and D dielectric thickness change

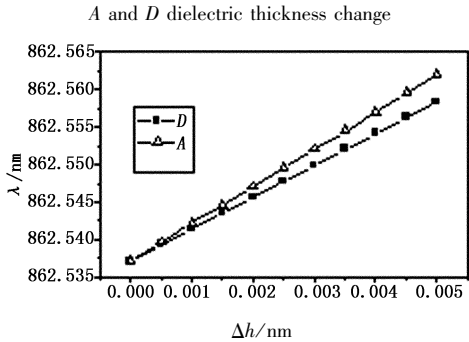


图6 透射峰 2 波长变化与介电层 A 和 D 厚度的变化关系
Fig.6 dependence of the change of the second transmission peak on
 A and D dielectric thickness change

从图 3 ~ 图 6 可知,介质厚度的微小变化会引起透射峰的移动,而温度的变化会引起介质厚度的变化,利用这个特性可把此结构应用于热敏开关中。已知室温时, A 介质 Si 的线膨胀系数为 $3.06 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ^[10], 缺陷层 D 介质 SiO_2 的线膨胀系数为 $0.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ^[11]。故当温度变化 1°C 时, A 介质的厚度变化了 1.1138×10^{-4} nm, D 介质的厚度变化了 0.4975×10^{-4} nm。所以由图 5 可知,当温度变化 1°C 时,由于 A 介质的厚度变化会引起透射峰 1 的波长移动 3.3414×10^{-4} nm,引起透射峰 2 的波长移动 5.569×10^{-4} nm;而由于 D 介质的厚度变化会引起透射峰 1 的波长移动 0.8955×10^{-4} nm,引起透射峰 2 的波长移动 2.189×10^{-4} nm。故当温度变化 1°C 时,由于介电层 A 和 D 厚度变化而引起透射峰 1 的波长共移动了 4.2369×10^{-4} nm,引起透射峰 2

的波长共移动了 7.758×10^{-4} nm。由以上讨论的温度变化而引起介质厚度变化进而得到透射峰波长变化的关系,可以将图 5 和图 6 中介质厚度变化与透射峰波长变化的关系转化为温度变化与透射峰波长变化的关系如图 7 所示。由图 7 可知,温度变化与透射峰波长变化之间也呈良好地线性关系,这给该结构应用于热敏开关提供了理论基础。当透射峰的透射率降为 5% 时,形成热敏开关。而由以上讨论可知,当透射峰 1 的透射率降为 5% 时,波长移动了 0.0008 nm。而当透射峰 2 的透射率降为 5% 时,波长移动了 0.00002 nm。由图 7 可知,当温度变化 1.8882°C 时会引起透射峰 1 移动 0.0008 nm,形成了热敏开关;而当温度变化 0.0258°C 时,透射峰 2 移动了 0.00002 nm,形成了热敏开关。这进一步表明透射峰 2 对温度变化更敏感。从以上讨论可知,我们也可以通过改变温度来微小地调节透射峰的波长,进而得到所需要波长的滤波器。

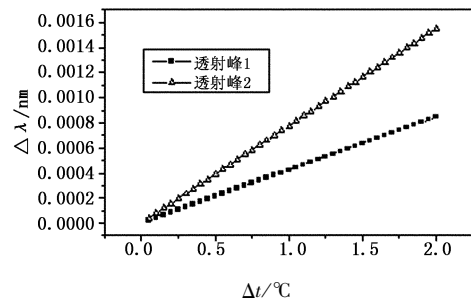


图7 $[D(AB)^8D]^2$ 复合结构透射峰波长变化与温度的变化关系
Fig.7 dependence of the change of confined wavelength for
 $[D(AB)^8D]^2$ on temperature change

4 结 论

用传输矩阵法计算了两端对称缺陷复合光子晶体的光传输特性。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。此现象为该结构实现双通道滤波器提供了理论基础。

复合结构光子晶体各介质的厚度很明显会影响共振透射峰的位置。通过控制温度来微小改变光子晶体介电层的厚度,使得完全共振透射峰移动,且各介质厚度的变化与透射峰波长的变化呈良好的线性关系,折射率大的介电层厚度的变化对共振透射峰波长的变化较大。经计算,当温度分别变化 1.8882°C 和 0.0258°C 时会使两透射峰的透射率降为原来的 5%,此结果为该结构实现热敏开关提供了理论基础,也为设计所需要的共振透射峰波长的双通道滤波器提供了理论依据。

参考文献:

- [1] Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Phys Rev Lett, 1987, 5(20): 2059 – 2061.
- [2] Johns. Strong localtion of photons in certain disordered dielectric super lattices [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(23): 2486 – 2489.
- [3] Wang Rui, Zhang Cunxi, Nie Yihang. Band structure and propagation properties of one-dimension anisotropy photonic crystals [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(1): 89 – 93. (in Chinese)
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, 36(1): 89 – 93.
- [4] Chen Xianfeng, Shen Xiaoming, Jiang Meiping, et al. Studies on the defect mode properties of 1D photonic crystal [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 34(12): 1876 – 1880. (in Chinese)
陈宪锋, 沈小明, 蒋美萍, 等. 一维光子晶体的缺陷模特性研究 [J]. 光子学报, 2007, 34(12): 1876 – 1880.
- [5] Wang Hong, Ouyang Zhengbiao. Amplification of one 2D imensional photonic crystals defect-mode lase [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(11): 1691 – 1697. (in Chinese)
王宏, 欧阳征标, 韩艳玲. 一维光子晶体缺陷模激光器的放大特性 [J]. 光学学报, 2006, 26(11): 1691 – 1697.
- [6] Panter O, Leer K, Scherer A, et al. Two-dimensional photonic band-gap defect mode laser [J]. Science, 1999, 284(5421): 1819 – 1821.
- [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 trsnssitor action with bistable switching in a photonic crystal cross-waveguide geometry [J]. Opt Lett, 2003, 28(24): 2506 – 2508.
- [9] Zhang Yuping, Zhang Huiyun, Zhang Yi. Super narrow and multi-channel narrow photonic crystal optical filters [J]. Acta Sinica Quantum Optic, 2004, 10(4): 173 – 175. (in Chinese)
张玉萍, 张会云, 郑义. 超窄带和多通道窄带光子晶体滤波器 [J]. 量子光学学报, 2004, 10(4): 173 – 175.
- [10] Qian Xiangzhong. Design of the tunable photonic crystals filter based on ferroelectric liquid crystal defect [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(3): 426 – 428. (in Chinese)
钱祥忠. 铁电液晶缺陷光子晶体调谐滤波器的设计 [J]. 光子学报, 2007, 36(3): 426 – 428.