

具有分形特征的多通道薄膜光学滤波器

陈溢杭

(华南师范大学物理与电信工程学院, 广东 广州 510006)

摘要 构造了一种具有分形特征的掺杂一维光子晶体结构并分析了其性质。数值计算结果表明,该结构的带隙中可产生多个透射通道,任意一个通道的频率可被独立调节而其他通道的频率均保持不变。此外,通过改变该分形结构的耦合层中缺陷的数目,可调节任一透射通道中的窄带透射峰数目。若一个通道的频率发生改变,则该通道内所有的透射峰频率也随之改变,而透射峰的频率间隔几乎保持不变。该结构可望应用于多通道光学滤波器的设计。

关键词 光学器件; 光子晶体; 传输矩阵; 滤波器

中图分类号 O483 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092904.1079

Multichannel Thin-Film Optical Filters With Fractal Characteristic

Chen Yihang

(*School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University,*
Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract A kind of one-dimensional doped photonic crystal with fractal characteristic is constructed and investigated. Numerical results show that such a structure can produce multiple transmission channels, and each channel can be tuned independently. By changing the number of the defects inside the coupling layers, the number of the narrow-band transmission peaks inside the channel can be tuned. As the frequency of a transmission channel changes, all transmission peaks in the channel will also shift, while the frequency interval of these peaks remains nearly invariant. These fractal structures are useful for the design of multichannel filters.

Key words optical device; photonic crystal; transfer matrix; filter

1 引 言

光子晶体是指介质的折射率按一定周期发生变化的人工材料。光子晶体具有的完全带隙性质,使它能有效地控制光在晶体中的传播行为,从而被广泛应用于制作各种光学器件^[1~4]。另一方面,人们通过改变光子晶体的周期性,包括引入缺陷,构造光子晶体异质结构等方法,使得在光子带隙内出现局域缺陷模,这些缺陷模具有许多有趣特性和潜在应用^[5,6]。在一维情形下,含缺陷的掺杂光子晶体结构可采用镀膜法制备,已广泛应用于各种多通道窄带滤波器的设计^[7,8]。然而,采用传统方法设计的多通道滤波器,各通道之间相互关联。若改变其中一个通道的频率,其它通道的频率也将相应发生改变,这给多通道滤波器的设计带来了很大困难。

“分形”的概念最早于 1982 年提出,由于该结构的特殊性质引起了人们的广泛关注^[9~11]。把分形和光子晶体两者相结合,可构造具有分形特征的光子晶体结构。由于光子晶体的几何结构对光子晶体的能带有很大影响,而这种具有分形特征的光子晶体与传统的晶体和准晶相比有着不同的特点,如透射谱存在自相似性^[12,13],这为光子晶体的理论和应用的进一步发展提供了可能。若用掺杂一维光子晶体构造具有分形特征的周期结构,其局域缺陷模也将具有独特的性质。

本文按照分形法则构造了掺杂的一维光子晶体结构,其光子带隙中可包含多个透射通道。研究发现通道之间无相互关联,各通道的频率可被独立地调节。此外,各通道中的窄带透射峰数目也可被单独调

收稿日期: 2008-06-17; **收到修改稿日期:** 2008-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(10704027)、广东省自然科学基金(07300205)和“响石”基金资助课题。

作者简介: 陈溢杭,博士,副教授,主要从事光子晶体与特民材料理论等方面的研究。E-mail: kallenmail@tom.com

节。该结果对多通道滤波器的设计有重要意义。

2 结构模型

分形结构区别于传统的周期结构和无序结构,具有自相似性的特征。这意味着物体中的局部结构具有和物体的整体结构相类似的形状特征。这里采用多层介质周期结构 $(LH)^m$ 作为分形结构的基本单元,即第零级($S=0$)分形结构一维光子晶体。其中H,L为折射率分别为 n_H, n_L 的法向光学厚度为 $1/4$ 中心波长($\lambda_0/4$)的各向同性介质膜层, m 为膜层结构的周期数。将两个基本单元 $(LH)^m$ 和 $(HL)^m$ 耦合起来形成第一级($S=1$)分形结构光子晶体 $(LH)^m D_1 (HL)^m$ 。其中 D_1 为包含缺陷的介质薄膜结构。将两个 $S=1$ 级分形结构光子晶体用耦合层 D_2 连接起来,即形成 $S=2$ 级分形结构光子晶体。以此类推,如下所示

$$\begin{aligned} S=0 & (LH)^m \\ S=1 & (LH)^m D_1 (HL)^m \\ S=2 & (LH)^m D_1 (HL)^m D_2 (LH)^m D_1 (HL)^m \\ S=3 & (LH)^m D_1 (HL)^m D_2 (LH)^m D_1 (HL)^m D_3 \\ & (LH)^m D_1 (HL)^m D_2 (LH)^m D_1 (HL)^m \\ & \dots \end{aligned}$$

在接下来的计算中,选取常用的镀膜材料 $n_H=2.35$ (ZnS), $n_L=1.38$ (MgF₂)。此外,选取 $m=6$, $\lambda_0=700$ nm。

3 计算结果及讨论

首先考虑分形结构的耦合层中包含一个MgF₂介质缺陷层,即 $D_1=\alpha L, D_2=H\beta LH, D_3=H\gamma LH, \dots$ 。其光学厚度可分别由参数 α, β 和 γ 进行调节。用传输矩阵法计算了 $S=0$ 级分形结构 $(LH)^6$ 的透射谱,如图1(a)所示。从图中可见,在中心波长700 nm附近出现了光子带隙。接着分析 $S=1$ 级分形结构 $(LH)^6 \alpha L (HL)^6$,即含单个缺陷层的对称一维光子晶体结构。从图1可见,在光子带隙中出现一个窄带透射通道 α 。通过改变缺陷层 αL 的光学厚度,可调节透射通道的频率,如图1(b)~图1(d)所示。随着系数 α 从1.7增加到2.3,该通道 α 往长波段显著地移动。

接着,考虑 $S=2$ 级分形结构 $(LH)^6 \alpha L (HL)^6 H\beta LH (LH)^6 \alpha L (HL)^6$,其透射谱如图2所示。从图中可见,在带隙中出现了两个透射通道。其中缺陷层 βL 控制通道 β ,而通道 α 由两个缺陷层 αL 共同控制。

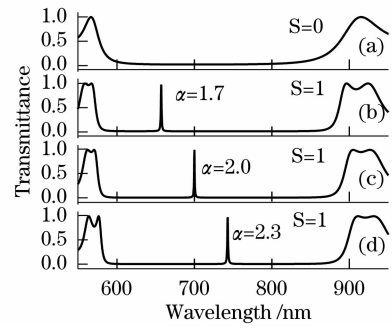


图1 $S=0$ 和 $S=1$ 级分形结构的透射谱。其中(a)对应结构 $(LH)^6$; (b), (c)和(d)对应结构 $(LH)^6 \alpha L (HL)^6$
Fig. 1 Transmission spectra for fractal multilayers with $S=0$ for structure $(LH)^6$ (a), and $S=1$ for structure $(LH)^6 \alpha L (HL)^6$ (b), (c) and (d), respectively

由图2(a)可见,当系数 $\alpha=2.0, \beta=0.2$ 时,通道 α 和 β 的波长分别为699.9 nm和748.2 nm。若保持 β 不变而将 α 增加为2.2,由图2(b)可见,透射通道 α 往长波段显著移动,其波长变为728.7 nm,而通道 β 的波长几乎保持不变。此时,若保持 α 不变而改变 β 使得 $\alpha=2.2, \beta=0.3$,如图2(c)所示,通道 α 的波长仅减小了约0.1 nm,而通道 β 则发生了较大移动,波长变为770.0 nm。这意味着带隙中两个透射通道的波长可分别由系数 α 和 β 单独调节。

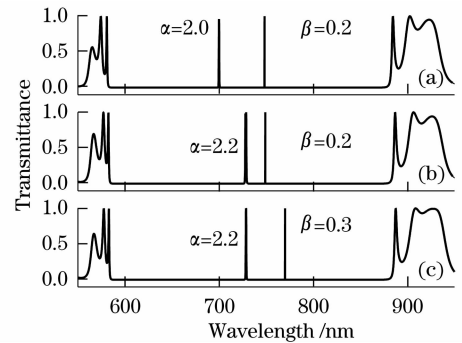


图2 $S=2$ 级分形结构 $(LH)^6 \alpha L (HL)^6 H\beta LH (LH)^6 \alpha L (HL)^6$ 的透射谱

Fig. 2 Transmission spectra for $S=2$ fractal structure of $(LH)^6 \alpha L (HL)^6 H\beta LH (LH)^6 \alpha L (HL)^6$

接着考虑 $S=3$ 级分形结构 $(LH)^6 \alpha L (HL)^6 H\beta LH (LH)^6 \alpha L (HL)^6 H\gamma LH (LH)^6 \alpha L (HL)^6 H\beta LH (LH)^6 \alpha L (HL)^6$ 。如图3所示,在带隙中将出现3个透射通道。其中缺陷层 γL 控制通道 γ 的波长,而通道 β 由两个缺陷层 βL 共同控制,通道 α 由四个缺陷层 αL 共同控制。从图3(a)和(b)可见,若保持 β, γ 不变,将 α 从1.5增加到1.8,则通道 α 的波长从632.0 nm变为671.3 nm,而通

道 β 和 γ 几乎没有变化。同样,若单独改变系数 β 或 γ ,则通道 β 或 γ 将发生明显移动,而其余两个通道的波长变化均很小,如图 3(c)和(d)所示。由此可见,带隙中的三个透射通道的波长可分别由系数 α 、 β 和 γ 单独调节。类似的,可通过提高分形结构的级数 S 以增加在带隙内的透射通道的数目,而且这些透射通道的波长均可被独立地进行调节,该具有分形特征的光子晶体结构在多通道滤波器的设计上具有重要的应用价值。

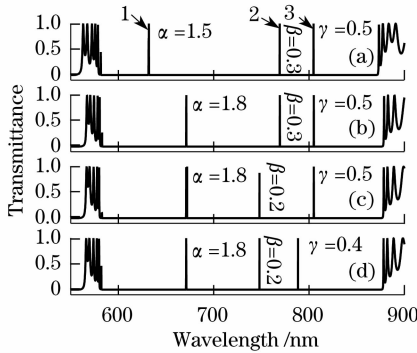


图 3 $S=3$ 级分形结构 $(LH)^6 \alpha L (HL)^6 H \beta LH (LH)^6 \alpha L (HL)^6 H \gamma LH (LH)^6 \alpha L (HL)^6 H \beta LH (LH)^6 \alpha L (HL)^6$ 的透射谱

Fig. 3 Transmission spectra for fractal structure of $(LH)^6 \alpha L (HL)^6 H \beta LH (LH)^6 \alpha L (HL)^6 H \gamma LH (LH)^6 \alpha L (HL)^6 H \beta LH (LH)^6 \alpha L (HL)^6$

各透射通道可独立地进行调节是因为它们分别由不同的缺陷层所产生。如图 3 中的三个通道分别与缺陷层 αL 、 βL 、 γL 所产生的缺陷模相对应,各透射通道对应的波长只取决于其所对应的缺陷层的光学厚度。为了理解上述机理,计算了电场在分形结构光子晶体中的场强分布。图 4 和图 5 分别给出了对应图 3(a) 中的三个透射通道波长的电场的分布情况。其中图 4 对应的电场波长为 632.0 nm,从图 4(a) 中可见电场仅在缺陷层 αL 位置有较强的局域。在一维光子晶体中引入的缺陷层,导致了缺陷模的产生。对应缺陷模频率的电磁场在缺陷层内部的分布形式是驻波,如图 4 所示。这是因为缺陷层两侧均为有限周期的光子晶体结构,而缺陷模频率位于两侧的光子晶体的带隙中,耦合到缺陷层内部的光波将在缺陷层的两个端面上产生强烈反射,形成驻波干涉,表现为电磁场的高度局域。此外,缺陷的引入还使得光子晶体结构中的非缺陷处的电场得到了提升,如图 4(b) 所示,整个结构中的电场均不为零,即电场可穿越光子晶体继续传播,这导致在带隙中出现透射峰。类似的,图 5(a) 中波长为 769.2 nm

的电场只在缺陷层 βL 处有较强的局域,而图 5(b) 中波长为 804.7 nm 的电场则只在缺陷层 γL 处有较强的局域。因此,图 3 中各透射峰的电场局域分别发生在不同的缺陷层,这进一步验证了各透射通道的产生源自不同的缺陷层。与图 4(b) 类似,图 5(a) 和(b) 中电场在非缺陷处也均不为零。

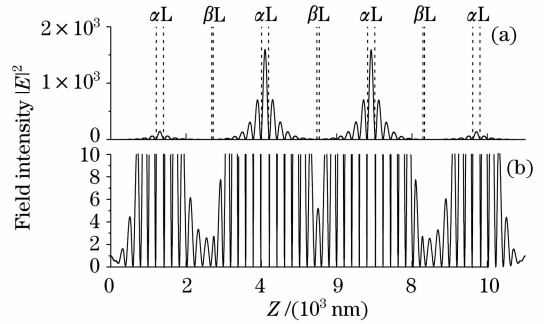


图 4 对应于图 3(a) 中波长为 632.0 nm 透射峰 1 的电场在分形结构中的分布。图中 αL 、 βL 、 γL 分别对应 MgF_2 缺陷层所处的位置。(a) 和(b) 中纵坐标场强的单位不同

Fig. 4 Electric field distributions in the fractal structure corresponding to the transmission peaks 1 in Fig. 3 (a) at wavelength 632.0 nm. αL , βL , and γL denote the positions of the coupling layers of MgF_2 . The units of the electric field intensity $|E|^2$ in (a) and (b) are different

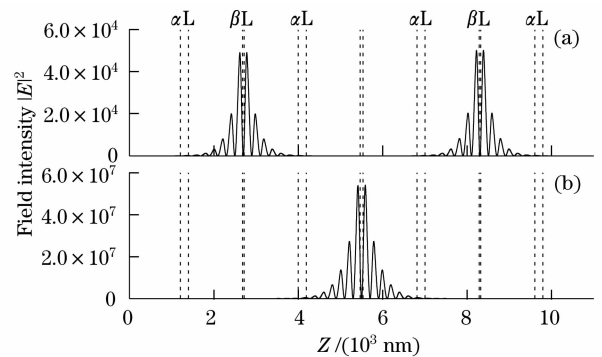


图 5 对应图 3(a) 中透射峰 2 和 3 的电场在分形结构中的分布。对应波长分别为 (a) 769.2 nm, (b) 804.7 nm

Fig. 5 Electric field distributions corresponding to the second and third transmission peak in Fig. 3(a). The corresponding wavelengths are (a)

769.2 nm and (b) 804.7 nm, respectively

上述讨论针对分形结构中的耦合层包含一个 MgF_2 缺陷层。若耦合层中包含多个缺陷层,则每个透射通道中的透射峰数目也将随之增加。考虑 D_1 包含两个缺陷层,即 $D_1 = \alpha L HLHLH \alpha L (HL)^6$ 计算了 $S=1$ 级分形结构 $(LH)^6 \alpha L HLHLH \alpha L (HL)^6$

的透射谱,如图6所示。从图6可见,带隙中的透射通道 α 包含两个透射峰,它们的波长均由 αL 缺陷层控制。这是因为两个光学厚度相同的缺陷层均与同一频率的缺陷模相对应,两个缺陷层的同时存在使得原本简并的缺陷模发生分裂,从而产生两个透射峰。图6中,当 $\alpha=1.7$ 时,两透射峰的波长分别为638.0 nm,673.9 nm。若 α 增大为2.0,两透射峰均往长波段明显移动,而它们的波长间隔仅增加了2 nm。随着 α 进一步增大为2.3,两透射峰也进一步往长波段移动,而波长间隔仍保持稳定。

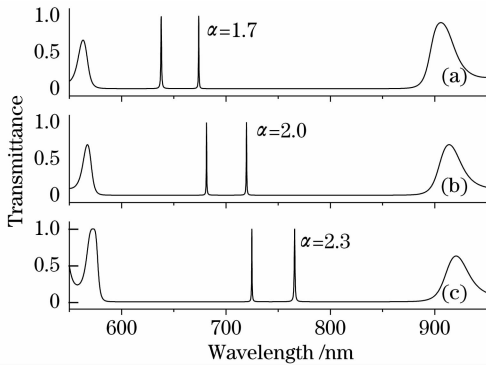


图6 $S=1$ 级分形结构 $(LH)^6 \alpha L HLHLH \alpha L (HL)^6$ 的透射谱

Fig. 6 Transmission spectra for $S=1$ fractal structure of $(LH)^6 \alpha L HLHLH \alpha L (HL)^6$

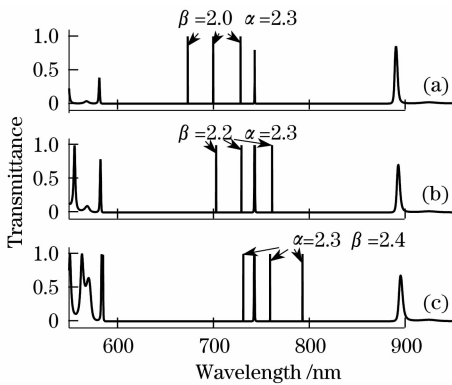


图7 $S=2$ 级分形结构 $(LH)^6 \alpha L (HL)^6 H \beta L HLHLH \beta L HLHLH \beta L H (LH)^6 \alpha L (HL)^6$ 的透射谱

Fig. 7 Transmission spectra for $S=2$ fractal structure of $(LH)^6 \alpha L (HL)^6 H \beta L HLHLH \beta L HLHLH \beta L H (LH)^6 \alpha L (HL)^6$

接着还分析了 $S=2$ 级分形结构。这里令 D_1 包含一个缺陷层, D_2 包含三个缺陷层,即 $D_1 = \alpha L$, $D_2 = H \beta L HLHLH \beta L HLHLH \beta L H$,其透射谱如图7所示。从图中可见,原来的透射通道 β 分裂为三个透射峰。随着系数 β 的增大,通道 β 中的三个透射峰均向长波段移动,而且它们的波长间隔变化

很小。与之相对,随着 β 的改变,通道 α 对应的透射峰几乎保持不动。由此可见,通过改变耦合层中缺陷的数目,可控制透射通道内窄带透射峰的数目。同一通道内的透射峰的波长可通过缺陷层的光学厚度进行调节,而透射峰的波长间隔保持恒定。上述性质对多通道滤波器的设计同样具有重要的意义。

4 结 论

利用一种简单的分形法则构造了具有分形特征的一维光子晶体结构。研究表明,该结构的带隙中可产生多个透射通道,每个透射通道的频率均可被单独进行调节。此外,改变光子晶体结构中缺陷层的数目,可调节透射通道中的窄带透射峰数目。同一通道内的窄带透射峰的频率均随通道频率的改变而改变,而透射峰的频率间隔保持恒定。该研究结果对多通道滤波器的设计提供了有效的途径。

参 考 文 献

- Schilling J, Muller F, Matthias S *et al.*. Three-dimensional photonic crystals based on macroporous silicon with modulated pore diameter[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(9): 1180~1182
- Hu X H, Chan C T. Photonic crystals with silver nanowires as a near-infrared superlens[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(9): 1520~1522
- Yablonovitch E, Gmitter T J. Photonic band structure: The face-centered-cubic case employing nonspherical atoms[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **67**(17): 2295~2298
- Gu Guochang, Li Hongqiang, Chen Hongtao *et al.*. Properties of Light Propagation in 1-D Periodic Dielectric Structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6): 728~734
- 顾国昌, 李宏强, 陈宏涛 等. 一维光子晶体材料中的光学传输特性[J]. *光学学报*, 2000, **20**(6): 728~734
- Noda S, Chutinan A, Imada M. Trapping and emission of photons by a single defect in a photonic bandgap structure[J]. *Nature*, 2000, **407**(6804): 608~610
- Lonar M, Yoshie T, Scherer A. Low-threshold photonic crystal laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(15): 2680~2683
- Qin. Q, Lu H, Zhu S N *et al.*. Resonance transmission modes in dual-periodical dielectric multilayer films [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(26): 4654~4656
- Chen Yihang, Xu Qingzhen. Twin defect modes in one-dimensional photonic crystals with defect layers of multiple single-negative-materials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1498~1502
- 陈溢杭, 徐清振. 多个单负材料缺陷一维光子晶体的孪生缺陷模[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1498~1502
- Matijaevic V, Beasley M R. Fractal multilayered superconductors [J]. *Phys. Rev. B*, 1987, **35**(7): 3175~3180
- Saavedra G, Furlan W D, Monsoriu J A. Fractal zone plates[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(12): 971~973
- Chen D, Wang S, Li L *et al.*. Microstrip filter with H-shaped fractal[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(25): 253507
- Lavrinenko A V, Zhukovsky S V, Sandomirski K S *et al.*. Propagation of classical waves in nonperiodic media: Scaling properties of an optical cantor filter[J]. *Phys. Rev. E*, 2002, **65**(3): 036621
- Jaggard D L, Sun X G. Reflection from fractal multilayers[J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(24): 1428~1431