

## 多通道可调谐 1.55 $\mu\text{m}$ 光子晶体滤波器

毛红敏, 马锡英, 王晓丹, 徐国定

(苏州科技学院 数理学院, 江苏 苏州 215009)

**摘要:** 建立了  $(AB)^N$  型一维光子晶体结构多通道可调谐滤波器模型, 其中  $A$  层是砷化镓 (GaAs) 材料,  $B$  层是由掺铝的氧化锌层和氧化锌层 (AZO/ZnO) 交替排列构成的具有人工周期结构的各项异性材料。根据电磁波的传输矩阵理论, 推导了光子晶体的透射率公式。数值模拟表明: 此结构光子晶体透射中心波长是 1.55  $\mu\text{m}$ , 对应于光子通带; 透射峰的数量由光子晶体的周期  $N$  决定;  $B$  层中填充因子  $h$  从  $2/3$  增加到  $11/12$ , 峰值波长蓝移且移动范围超过 200 nm;  $A$  和  $B$  层厚度增加, 透射峰中心波长发生红移; 而入射角度的增加将使透射峰中心波长蓝移; 在各参数的调控范围内, 光子晶体均保持较高的透射率不变。这些现象为光通信波段多通道可调谐高性能滤波器的设计提供了理论参考。

**关键词:** 滤波器; 光子晶体; 多通道; 可调谐

中图分类号: O431 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0620002

## Multi-channel tunable 1.55 $\mu\text{m}$ filter based on photonic crystal

Mao Hongmin, Ma Xiyang, Wang Xiaodan, Xu Guoding

(School of Mathematics and Physics, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

**Abstract:** A filter model with one-dimensional photonic crystal structure  $(AB)^N$  was proposed. Layer  $A$  was gallium arsenide (GaAs) material and layer  $B$  was an artificial periodic structure material.  $B$  was anisotropic and made of aluminum-doped zinc oxide and zinc oxide (AZO/ZnO) alternately. Based on the theory of electromagnetic wave transmission matrix, the transmission rate of photonic crystal was derived. The numerical simulation shows that the center wavelength of the transmission is 1.55  $\mu\text{m}$  and corresponds to the photon pass band. The number of transmission peaks was determined by the period  $N$  of the photonic crystal. Increasing the filling factor  $h$  of the  $B$  layer from  $2/3$  to  $11/12$ , the transmission peak wavelength was blue shifted and the moving range exceeds 200 nm. Increasing the thickness of the  $A$  and  $B$  layers, the peak wavelength was red shifted. When the incidence angle increases, the peak wavelength was blue shifted. The photon crystal will maintain a high transmittance within the control range of each parameter. These phenomena provide a theoretical reference for the design of multi-channel tunable high performance filter for optical communication.

**Key words:** filter; photonic crystal; multi-channel; tunable

收稿日期: 2016-10-10; 修订日期: 2016-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(61306004); 江苏省自然科学基金(BK20130263); 苏州科技大学校科研基金(XKZ201609)

作者简介: 毛红敏(1976-), 女, 讲师, 博士, 主要从事电磁场传播与光电子技术的研究。Email: hongminmao@mail.usts.edu.cn

## 0 引言

大容量高密度光通信系统和光学精密测量领域,不但要求光滤波器具有较高的信号透过率,还要求能够传输多个信道,来适应密集程度越来越高的信息通信技术的要求,因此,研制具有窄通带、易集成和微型化特征的光滤波器具有重要意义。目前,光滤波器的种类主要包括法布里-珀罗谐振腔滤波器、马赫-曾德干涉型光滤波器、基于光栅的滤波器等,这些滤波器由于块状结构,体积大,难于满足迅速发展的光波分复用系统的要求。

光子晶体<sup>[1]</sup>具有光子禁带和光子局域两大特性,独特的能带结构及由此导致的奇特电磁特性,正好迎合了多信道传输的要求,为光滤波器的设计和制造提供了新的结构思路。目前,已报道了多种不同结构光子晶体滤波器的研究,如李文胜<sup>[2]</sup>等人报道了含掺杂半导体的光子晶体梳状滤波器,刘艳红<sup>[3]</sup>等人报道了基于各向异性的光子晶体角度滤波器和潘继环<sup>[4]</sup>等人研究的光子晶体量子阱滤波器。这些滤波器的工作范围都不在 1.55 μm 波段附近,不能应用于光通信领域。李萍<sup>[5]</sup>等研究了可应用于波分复用的复周期结构光子晶体滤波器,为光通信波段的滤波器提供了一种选择。

2012 年,Naik<sup>[6]</sup>等人报道了一种新的基于半导体材料的具有人工周期结构的各项异性材料,由 16 个掺铝的氧化锌层和氧化锌层(AZO/ZnO)交替形成。2016 年,Wu<sup>[7]</sup>等人研究了含此半导体材料的光子晶体,在 2.4~2.8 μm 近红外波段存在多个透射峰,且峰值位置具有可调谐性。

AZO/ZnO 材料的折射率随波长变化显著,在 1.55 μm 波段具有较小的折射率,GaAs 材料在 1.55 μm 波段具有较高的折射率,因此,文中选择由 AZO/ZnO 和 GaAs 材料构建光子晶体滤波器,采用传输矩阵理论<sup>[8]</sup>,对其 1.55 μm 波段的滤波特性进行研究。数值模拟了光子能带结构,通过参数优化使 1.55 μm 波段范围位于光子晶体的通带内。调整光子晶体的周期结构,能够改变 1.55 μm 附近滤波器的通道数量;改变光子晶体 A 和 B 层的厚度,能够实现滤波透射峰值波长的调谐。此类型滤波器不含缺陷层,结构简单,制作和设计难度小,可为光通信波段滤波器

的设计提供更多的材料和结构选择,并有望在光通信的波分复用技术和光学精密测量等领域获得应用。

## 1 光子晶体滤波器结构模型与理论

光子晶体是空气/(AB)<sup>N</sup>空气型结构,如图 1 所示。

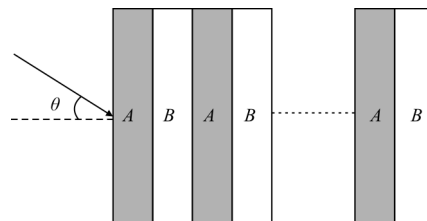


图 1 一维光子晶体结构

Fig.1 Structure of 1-D photonic crystal

图中, $N$  为光子晶体周期, $A$  是半导体材料砷化镓 (GaAs), $B$  是掺铝氧化锌层和氧化锌层交替形成的各向异性半导体材料(AZO/ZnO)。 $B$  层介质的介电函数为<sup>[6]</sup>:

$$\epsilon_B = \begin{pmatrix} \epsilon_p & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_p & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_v \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: $\epsilon_p$  和  $\epsilon_v$  分别为介电函数  $\epsilon_B$  的平行分量和垂直分量。可表示为:

$$\epsilon_p = h\epsilon_a + (1-h)\epsilon_b \quad (2)$$

$$\epsilon_v = \frac{1}{h\epsilon_a^{-1} + (1-h)\epsilon_b^{-1}} \quad (3)$$

公式(2)、(3)中的  $h$  为掺铝氧化锌的填充因子,由 AZO 和 ZnO 层的厚度  $d_m$ 、 $d_n$  决定:

$$h = \frac{d_m}{d_m + d_n} \quad (4)$$

式中: $\epsilon_b$  为 ZnO 材料的介电函数,可表示为 Lorentz 模型; $\epsilon_a$  为 AZO 材料的介电函数,由 Lorentz 模型  $\epsilon_{aL}(f)$  和 Drude 模型  $\epsilon_{aD}(f)$  构成<sup>[6]</sup>,即:

$$\epsilon_a(f) = \epsilon_{aL}(f) + \epsilon_{aD}(f) \quad (5)$$

$$\epsilon_{aL}(f) = 1 - \frac{f_{ap1}^2 - f_{ao1}^2}{f^2 - f_{ao1}^2} \quad (6)$$

$$\epsilon_{aD}(f) = 1 - \frac{f_{ap2}^2}{f^2} \quad (7)$$

采用传输矩阵理论<sup>[8]</sup>,对图 1 所示的光子晶体,进行 1.55 μm 波段光波透射特性的研究。光子晶体

总的传输矩阵为:

$$M = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} = (M_A M_B)^N \quad (8)$$

$M_i (i=A, B)$  是每层的传输矩阵:

$$M_i = \begin{pmatrix} \cos(k_i d_i) & jq_i^{-1} \sin(k_i d_i) \\ jq_i \sin(k_i d_i) & \cos(k_i d_i) \end{pmatrix} \quad (9)$$

对于 TM 模, 公式(9)中:

$$\begin{aligned} k_{A_z} &= \sqrt{\varepsilon_A k_0^2 - k_x^2} \\ k_{B_z} &= \sqrt{\varepsilon_p k_0^2 - \frac{\varepsilon_p k_x^2}{\varepsilon_v}} \\ q_A &= \frac{\sqrt{\varepsilon_p - \sin^2 \theta}}{\varepsilon_A} = \frac{k_{A_z}}{\varepsilon_A k_0} \\ q_B &= \frac{k_{B_z}}{\varepsilon_p k_0} \end{aligned} \quad (10)$$

式中:  $k_x = k_0 \sin \theta$ ,  $k_0 = 2\pi/\lambda$  真空中的波数;  $\theta$  为光波的入射角。

光子晶体的透射率为:

$$T = \left| \frac{2p}{(M_{11} + M_{12}p)p + M_{21} + M_{22}p} \right|^2 \quad (11)$$

式中:  $p = \sqrt{k_0^2 - k_x^2} / k_0 = \cos \theta$ 。

根据参考文献[6], 光子能带结构方程为:

$\cos(\beta\Lambda) =$

$$\cos(k_{A_z} d_A) \cos(k_{B_z} d_B) - \frac{1}{2} \left( \frac{q_B}{q_A} + \frac{q_A}{q_B} \right) \sin(k_{A_z} d_A) \sin(k_{B_z} d_B) \quad (12)$$

式中:  $\beta$  为 Bloch 波数, 决定光子晶体的通带结构;  $\Lambda = d_A + d_B$  为光子晶体的空间周期。

## 2 数值分析与模拟

一真空中波矢为  $k_0$  的 TM 平面电磁波, 入射到光子晶体表面, 各参数为  $\varepsilon_A = 11.36$ ,  $\varepsilon_b = 4$ ,  $f_{ap1} = 180$  THz,  $f_{ap2} = 150$  THz,  $f_{ao1} = 80$  THz。

### 2.1 光子晶体带隙特征

根据公式(12), 数值模拟了 1~2  $\mu\text{m}$  波长范围光子晶体能带结构, 如图 2(a)所示, 参数  $\theta = 0^\circ$ ,  $d_A = 0.33 \mu\text{m}$ ,  $d_B = 0.755 \mu\text{m}$ ,  $h = 5/6$ 。实线表示归一化相移的实部, 虚线表示归一化相移的虚部。图 2(a)表明在 1~2  $\mu\text{m}$  波长范围内, 光子晶体的通带对应 1.09~1.26  $\mu\text{m}$  和 1.45~1.65  $\mu\text{m}$  两个波长窗口。图 2(b1)、(b2)为光子晶

体在 1.45~1.65  $\mu\text{m}$  窗口的透射率和光子通带对照图, 其中透射率曲线对应于光子晶体周期  $N=6$ 。图 2(b1)、(b2)表明光子晶体透射的中心波长是 1.55  $\mu\text{m}$ , 透射的波长范围和光子通带结构相一致。

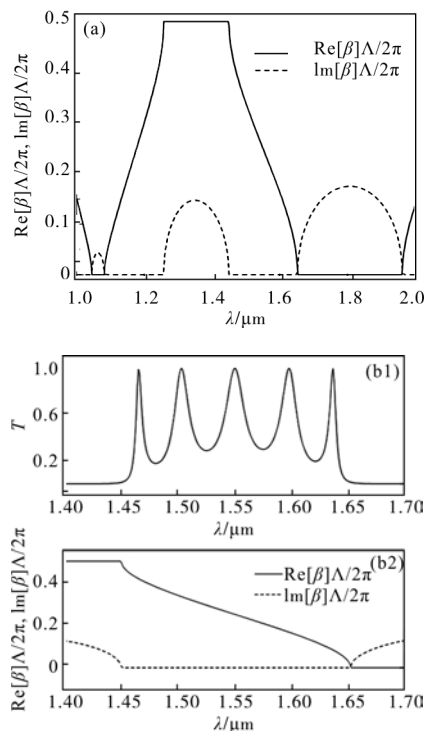
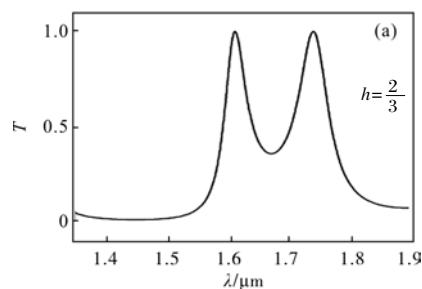


图 2 光子能带结构及光子晶体透射率图

Fig.2 Photonic band structure and transmittance of photonic crystals

### 2.2 填充比 $h$ 对透射率的影响

掺铝氧化锌层厚度对滤波器透射率的影响如图 3 所示, 周期  $N=3$ , 图 3(a)、(b)、(c)、(d) 分别对应于  $h = \frac{2}{3}$ 、 $\frac{3}{4}$ 、 $\frac{5}{6}$ 、 $\frac{11}{12}$ , 其他参数和图 2(a) 相同。图 3 表明随着填充因子  $h$  的增加, 透射率的峰值大小没有明显变化, 半峰全宽变窄, 峰值波长发生蓝移, 蓝移范围超过 200 nm。因此, 通过调节填充比例可对透射的峰值波长进行较大范围的调控。



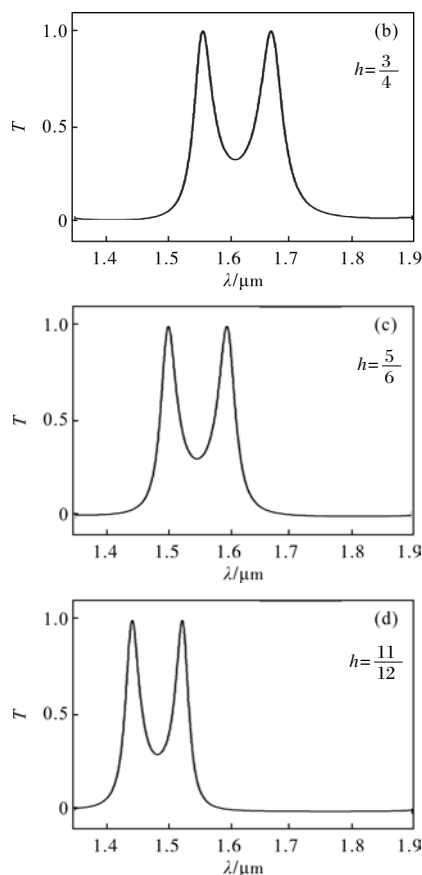


图 3 掺杂因子  $h$  不同时的透射率

Fig.3 Transmittance spectra for different filling factor  $h$

### 2.3 A、B 层厚度对透射峰的影响

光子晶体 A 层厚度分别为 0.30、0.33、0.36  $\mu\text{m}$  时, TM 光波的透射率如图 4 所示, 其中  $N=2, h=5/6$ 。从图 4 可知, 当 A 层厚度增加时, 透射率保持不变, 半峰全宽变窄, 透射峰中心位置发生红移。A 层厚度变化 60 nm, 峰值中心波长移动近 80 nm。图 5 为 B 层厚度分别为 0.725、0.755 和 0.785  $\mu\text{m}$  时, TM 光波的透射率。随着 B 层厚度的增加, 透射峰中心位置同样发生了红移, B 层厚度变化 60 nm, 峰值中心波长移动

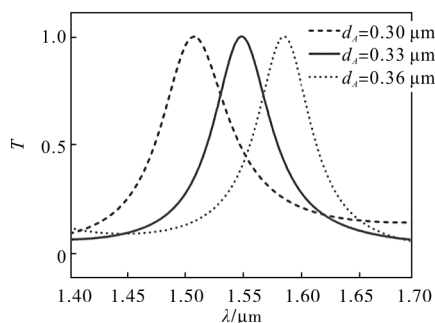


图 4 A 层厚度不同时的透射率

Fig.4 Transmittance for different thickness of layer A

约 40nm。图 4 和图 5 表明通过改变光子晶体 A 层和 B 层的厚度, 能够实现透射峰值波长的连续调控。

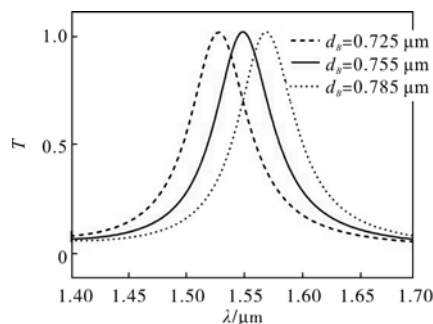


图 5 B 层厚度不同时的透射率

Fig.5 Transmittance for different thickness of layer B

### 2.4 入射角度对透射峰的影响

为了讨论光波入射角度对光子晶体滤波器透射峰的影响, 模拟计算了入射角  $\theta=0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$  时对应的透射率, 如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 随着入射角度的增加, 透射率大小保持不变, 但透射峰值的中心波长发生了蓝移。入射角度  $\theta < 5^\circ$  时, 中心波长随入射角的移动变化率较小;  $\theta > 5^\circ$  时, 移动变化率较大, 入射角越大, 移动也越大。透射峰值波长随入射角度的变化特性一方面表明可以通过改变角度实现对透射峰值波长的调控; 另一方面表明此滤波器的角度宽容性较差, 在光通信中作为滤波器使用时, 尽可能在入射角  $\theta < 5^\circ$  的范围内使用, 否则入射角度与预期规定的角度不能有较大误差。

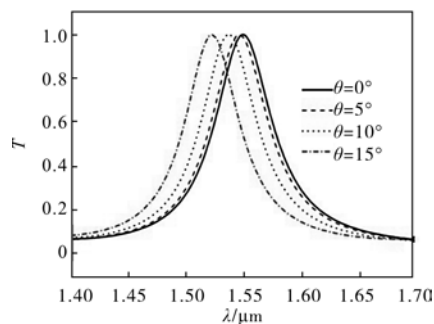


图 6 入射角度不同时的透射率

Fig.6 Transmittance for different degree of incidence

## 3 结论

用 A 和 B 两种介质组成了一维光子晶体滤波器, 数值计算表明, 此光子晶体滤波器在 1.55  $\mu\text{m}$  波段附近, 改变光子晶体周期, 可实现不同数量的透射

峰通道,此多个透射峰的波长范围和光子晶体的通带范围相一致。多通道光子晶体滤波器具有可调谐特性:(1)增加填充比  $h$ ,透射率保持不变,半峰全宽变窄,透射峰峰值波长发生蓝移,移动范围可超过 200 nm;(2)增加 A、B 层厚度,透射率保持不变,峰值波长均发生红移,A 层厚度变化 60 nm,峰值中心波长移动近 80 nm;B 层厚度变化 60 nm,峰值中心波长移动约 40 nm。(3)增加光波的入射角度,其中心位置发生了蓝移。以上结论为设计和研究光通信波段具有微型化、易集成的滤波器提供了有益的参考和理论指导。

#### 参考文献:

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(20): 2059–2062.
- [2] Li Wensheng, Zhang Qin, Huang Haiming, et al. Comb filtering in terahertz frequency based on photonic crystal containing doped semiconductor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1869–1872. (in Chinese)  
李文胜, 张琴, 黄海铭, 等. 采用含掺杂半导体光子晶体的太赫兹梳状滤波器 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1869–1872.
- [3] Liu Yanhong, Dong Lijuan, Liu Lixiang, et al. Narrow bandpass angular filter based on anisotropic photonic band gap[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0823001. (in Chinese)  
刘艳红, 董丽娟, 刘丽想, 等. 基于各向异性光子晶体带隙的窄带带通角度滤波器[J]. 光学学报, 2013, 33(8):0823001.
- [4] Pan Jihuan, Su An, Meng Chengju. Modulation of medium refractive index on filter performance of photonic crystal quantum well [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 833–837. (in Chinese)  
潘继环, 苏安, 蒙成举. 介质折射率对光子晶体量子阱滤波性能的调制[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 833–837.
- [5] Li Ping, Yang Jingbo, Liang Gaofeng. Design of photonic crystal filter with a complicated periodic structure applied in wavelength division multiplexing [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2015, 52(11): 110601. (in Chinese)  
李萍, 杨静波, 梁高峰. 应用于波分复用的复周期结构光子晶体滤波器的设计 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 110601.
- [6] Gururaj V Naik, Liu Jingjing, Alexander V Kildishev, et al. Demonstration of Al:ZnO as a plasmonic component for near-infrared metamaterials [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2012, 109(5): 8834–8838.
- [7] Wu Mengru, Jia Ren Chang Chien, Wu Chienjang, et al. Near-infrared multichannel filter in a finite semiconductor metamaterial photonic crystal [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(1): 2700309.
- [8] Tang Jun, Yang Huajun, Xu Quan, et al. Analysis of the transfer characteristics of one dimensional photonic crystal and its application with transfer matrix methods [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(1): 76–80. (in Chinese)  
唐军, 杨华军, 徐权, 等. 传输矩阵法分析一维光子晶体传输特性及其应用[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(1): 76–80.