

DOI:10.16136/j.joel.2022.04.0495

2 种不同结构的 1 维光子晶体窄带滤波器

张 兰, 戚子昂, 马会中*

(郑州大学 力学与安全工程学院, 河南 郑州 450000)

摘要:随着光通信技术的发展,滤波器在光的波分复用技术中具有举足轻重的作用。但是,传统滤波器存在尺寸大、滤波性能差、制备较复杂的问题。对此本文设计了 2 种形如 $(AB)^N B^M$ $(AB)^N$ 、 $(AB)^N (BA)^N$ 结构的 1 维光子晶体窄带滤波器,并利用传输矩阵法对这两种光子晶体滤波器进行了计算,针对其光子禁带和滤波性能进行了分析,在优化结构设计的基础上探究了不同参数对于滤波性能的影响。结果表明:1 维叠层缺陷型光子晶体窄带滤波器和 1 维镜像型光子晶体窄带滤波器在一定的波长范围内,均可以获得一个较窄的透过带,叠层缺陷型光子晶体窄带透射率接近 99%,镜像型光子晶体窄带透射率为 96%,滤波性能优异,能够满足窄带滤波技术的要求,并有望在光波分复用技术中获得广泛的应用。

关键词:光子晶体; 光学薄膜; 光子禁带; 窄带滤波

中图分类号: TN2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)04-0356-08

Two types of one-dimensional photonic crystal narrow-band filters with different structures

ZHANG Lan, QI Ziang, MA Huizhong*

(Department of Mechanics and Safety Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450000, China)

Abstract: With the popularity of optical communication technology, there is a growing recognition that the filter plays a significant role in wavelength division multiplexing technology. However, traditional filters have some disadvantages which are supposed to be improved and optimized, such as large size, poor filtering performance and complicated preparation. In order to solve these problems effectively, this paper designed two types of one-dimensional photonic crystal narrow-band filters with $(AB)^N B^M$ $(AB)^N$ and $(AB)^N (BA)^N$ structures. At the same time, the transfer matrix method was used to calculate two photonic crystal filters. The photonic band gaps were analyzed and the effect of different parameters on the filtering performance was explored on the basis of the optimized design structure. The results show that: the one-dimensional laminated defect type photonic crystal narrow-band filter and the one-dimensional mirror image type photonic crystal narrow-band filter are able to obtain a narrow transmission band within a certain wavelength range, the transmittance at the narrow band of laminated defect type photonic crystal is close to 99% and the mirror image type photonic crystal's transmittance is 96%, as well as present excellent filtering performance, which can meet the narrowband filtering technical requirements. It is expected to be widely used in optical wavelength division multiplexing technology.

Key words: photonic crystal; optical film; photonic band gap; optical narrowband filters

1 引 言

近年来,光子晶体的相关研究备受关注。光子晶体是指一类具有光子禁带的人为制造的周期

性介质,具有高、低电介质的周期性排列结构^[1]。相比于传统半导体材料,光子拥有传输速度快、损耗小、响应快和信息容量大等优于电子的特点。因此,光子晶体的光电器件极有可能在未来器件

* E-mail: zjy1964291239@126.com

收稿日期: 2021-06-23 修订日期: 2021-08-17

基金项目: 中原院士基金(2019-12-01)资助项目

中占据主要地位。光子晶体具有光子禁带(也叫光子带隙),位于禁带区域内的光无法在光子晶体中传播^[2],这一性质使得光子晶体在光电子领域和通信发展中有着极其重要的研究价值。

目前涉及到光子晶体的应用主要有光子晶体光纤、滤波器、传感器、复用器和太阳能电池^[3-7]等。随着光通信技术的发展,波分复用(wavelength division multiplexing, WDM)技术能够将信息进行高速、大容量、多通道的传输。与此同时,WDM技术对窄带滤波产生了极大的需求。由于光子晶体具有易于集成和尺寸小的优势,光子晶体窄带滤波器的设计有着十分重要的科研意义^[8,9]。ZAGHDOUDI等^[10]设计了一种梯度折射率缺陷层1维光子晶体窄带滤波器,并证明通过选择缺陷层的参数,能够根据缺陷层几何厚度预定义透过峰的位置。WU等^[11]设计了一种基于含双曲超材料的1维缺陷光子晶体的全方位窄带紫外滤波器,通过在光子晶体中引入缺陷层并调整介电层厚度,实现了具有角度不敏感特性的全方位窄带紫外滤波,由此得出,缺陷层的引入可以优化光子晶体的滤波性能以及透过峰的位置。LI^[12]设计了一种光子晶体波导与微腔耦合的3通道波分复用器,此结构能够在光子晶体中取多个微腔输出多个波长的光波,且在波长 $1.763\text{ }\mu\text{m}$ 处的光波透射率达到将近90%。LI等^[13]基于2维三角晶格光子晶体设计了一种多通道窄带滤波器,实现了 $1.57157\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.58354\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.50854\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.5195\text{ }\mu\text{m}$ 的多波长输出,透射率达到95%,但透射率可以继续提升,且2维光子晶体制备难度较高。

大多数相关工作都集中于2维、3维光子晶体的制备研究。相比于其他维度的光子晶体,1维光子晶体构造简单且制备可行性高。1维光子晶体窄带滤波器的设计可以满足WDM技术对于窄带滤波的要求,并且后期较2维和3维易于制备^[14]。构造简单、易于制备、极窄的透过波段且透射率高是这种窄带滤波器最大的优点,这意味着能够实现更高效的通信传播和更低的信号损耗。本文将基于此设计2种不同结构的1维光子晶体窄带滤波器,通过对周期数与缺陷层数等参数进行调整,预期在WDM技术中的低损耗波段获得极窄的透过带和更高的透射率。本文采用传输矩阵法对光子晶体的反射谱图进行了模拟仿真,可以直观的观察滤波器的滤波性能。

2 物理模型及理论基础

本文研究的光子晶体窄带滤波器模型图 $(AB)^N B^M (AB)^N$ 和 $(AB)^N (BA)^N$ 如图1所示,A为

高折射率层,B为低折射率层。其中图1(a)为1维叠层缺陷型光子晶体窄带滤波器,缺陷层与低折射率层使用同种材料。图1(b)为1维镜像型光子晶体窄带滤波器, N 、 M 分别为周期数和缺陷层数。

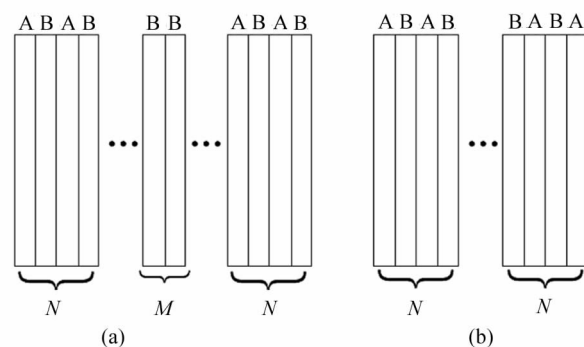


图1 光子晶体窄带滤波器模型图:

(a) 1维叠层缺陷型光子晶体窄带滤波器;

(b) 1维镜像型光子晶体窄带滤波器

Fig. 1 The model diagrams of photonic crystals

narrow-band filters: (a) One-dimensional laminated defect type photonic crystal narrow-band filter;

(b) One-dimensional mirror

image type photonic crystal narrow-band filter

本文使用的理论方法为传输矩阵法^[15]。在每层介质中,折射率为 n ,介电常数为 ϵ ,磁导率为 μ , i 代表入射波, θ 代表入射波方向和介质表面法线的夹角, d 代表介质的厚度, k 是真空中波矢,每个单层的特征矩阵可以表示为:

$$\mathbf{M}(z) = \begin{pmatrix} \cos(k_0 n d \cos \theta) & -\frac{i}{\eta} \sin(k_0 n d \cos \theta) \\ -i\eta \sin(k_0 n d \cos \theta) & \cos(k_0 n d \cos \theta) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中,光学导纳 $\eta = \sqrt{\epsilon/\mu} \cos \theta$, $k_0 = \omega/c$, ω 代表入射波的频率, c 代表真空中的光速。

因而多层膜的矩阵可以表示为:

$$\mathbf{M}(z_N) = \mathbf{M}_1(z_1) \mathbf{M}(z_2 z_1) \cdots \mathbf{M}_N(z_N - z_{N-1}) = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

本文将入射电磁场和透射电磁场的关系进行计算可以得到反射系数和透射系数的计算公式为:

$$r = \frac{m_{11} \eta_l + m_{12} \eta_l \eta_1 - m_{21} - m_{22} \eta_l}{m_{11} \eta_l + m_{12} \eta_l \eta_1 + m_{21} + m_{22} \eta_l}, \quad (3)$$

$$t = \frac{2\eta_l}{m_{11} \eta_l + m_{12} \eta_l \eta_1 + m_{21} + m_{22} \eta_l}, \quad (4)$$

式中, $\eta_l = \sqrt{\epsilon_l/\mu_l} \cos \theta$, $\eta_1 = \sqrt{\epsilon_1/\mu_1} \cos \theta$ 。

反射率和透射率分别表示为:

$$R = rr^* = |r|^2, \quad (5)$$

$$T = \frac{\eta_{2N+1}}{\eta_0} tt^* = (\eta_t/\eta_i) |t|^2. \quad (6)$$

3 数值分析

在本文计算中,所有的入射波均为 TE(transverse electric)波。在 WDM 技术中位于 1310 nm 处的光纤具有较低的损耗和色散,而 1550 nm 处是光纤的最低损耗点,因此本研究的波段设置为 1350—1800 nm^[16],中心波长 λ_0 设置为 1550 nm。根据光学薄膜理论,每层介质厚度按照四分之一波长($d = \lambda_0/4$)进行设置^[17]。为了更直观地表现光子晶体的滤波性能,本文用半带宽(full width at half maximum, FWHM)描述窄带宽度。半带宽 $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$, 其中 λ_1, λ_2 为窄带透射率值为最高透射率一半时对应的两个波长,半带宽数值越小表示带宽越窄,相对

带宽 $\Delta\lambda/\lambda_0$ 即半带宽与窄带中心波长的比值,相对带宽越小表示光子晶体的滤波性能越优异。

3.1 1 维叠层缺陷型光子晶体的滤波性能研究

首先,本文对 1 维叠层缺陷型光子晶体的窄带滤波器 $(AB)^N B^M (AB)^N$ 的滤波性能进行研究。高折射率介质选取 TiO_2 (n 取 2.49),低折射率介质与缺陷层介质均选取 Ni (n 取 1.08)。基底材料为玻璃, TiO_2 层厚度为 155.6 nm, Ni 层厚度为 358.8 nm。取周期数 N 为 4,缺陷层数 M 为 3。1 维叠层缺陷型光子晶体的滤波性能如图 2 所示。由图 2(a)可知,整个介质系统在 1350—1800 nm(除 1550 nm 附近)的反射率接近 100%,即透射率接近 0。由图 2(b)可知在 1550 nm 处的反射率为 1.565 31%,即透射率接近 99%,半带宽 $\Delta\lambda$ 为 1.132 24 nm,相对带宽 $\Delta\lambda/\lambda_0$ 为 0.000 73,符合窄带滤波器性能要求。

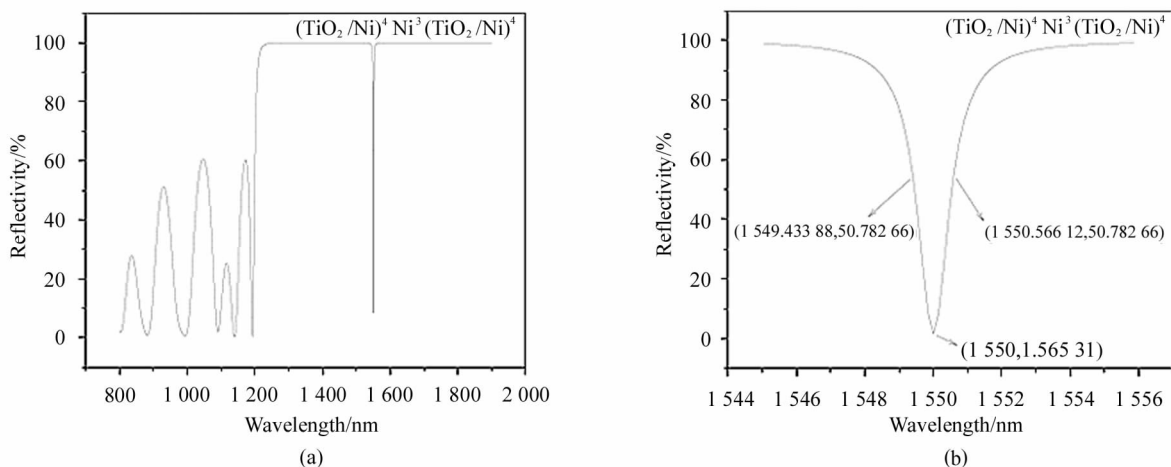


图 2 1 维叠层缺陷型光子晶体的滤波性能:(a) 800—2000 nm 图像;(b) 1550 nm 处图像

Fig. 2 Filtering performance of one-dimensional laminated defect type photonic crystal:

(a) The image of 800—2000 nm; (b) The image at 1550 nm

3.2 周期数、缺陷层数对 1 维叠层缺陷型光子晶体的滤波性能的影响

其次,为了探讨周期数 N 和缺陷层数 M 对 1 维叠层缺陷型光子晶体的滤波性能的影响,本文设置周期数 N 为 4,增加缺陷层数,其他参数不变。研究发现当缺陷层数为偶数时,没有窄带透过峰的出现。因此,缺陷层数依次取 3、5、7、9、11、15、19、29 进行计算。周期数和缺陷层数对 1 维叠层缺陷型光子晶体的滤波性能的影响,如图 3 所示。由图 3(a)和 3(b)可知,随着缺陷层数 M 的增加,光子晶体的窄带逐渐变窄,半带宽由 1.132 24 nm 减少至 0.186 45

nm,相对带宽 $\Delta\lambda/\lambda_0$ 由 0.000 73 减少至 0.000 12,窄带位置不变且反射率均为 1.565 31%。取缺陷层数 M 为 3,周期数 N 取 4、5、6、7、8,其他参数不变并进行计算。由图 3(c)和 3(d)可知,随着周期数 N 的增加,光子晶体的窄带逐渐变窄,半带宽由 1.132 24 nm 减少至 0.077 06 nm,相对带宽 $\Delta\lambda/\lambda_0$ 由 0.000 73 减少至 0.000 05,窄带位置依旧不变且反射率均为 1.565 31%。

这表明增加缺陷层数和周期数都可以减小带宽,提升 1 维叠层缺陷型光子晶体的滤波性能,但对窄带透射率没有影响。其中,缺陷层数由 3 增加到

29, 滤波器半带宽 $\Delta\lambda$ 由 1.132 24 nm 减少至 0.186 45 nm, 周期数由 4 增加到 8, 滤波器半带宽 $\Delta\lambda$

由 1.132 24 nm 减少至 0.077 06 nm, 可以得出, 增加周期数对带宽减小的影响比缺陷层数更为显著。

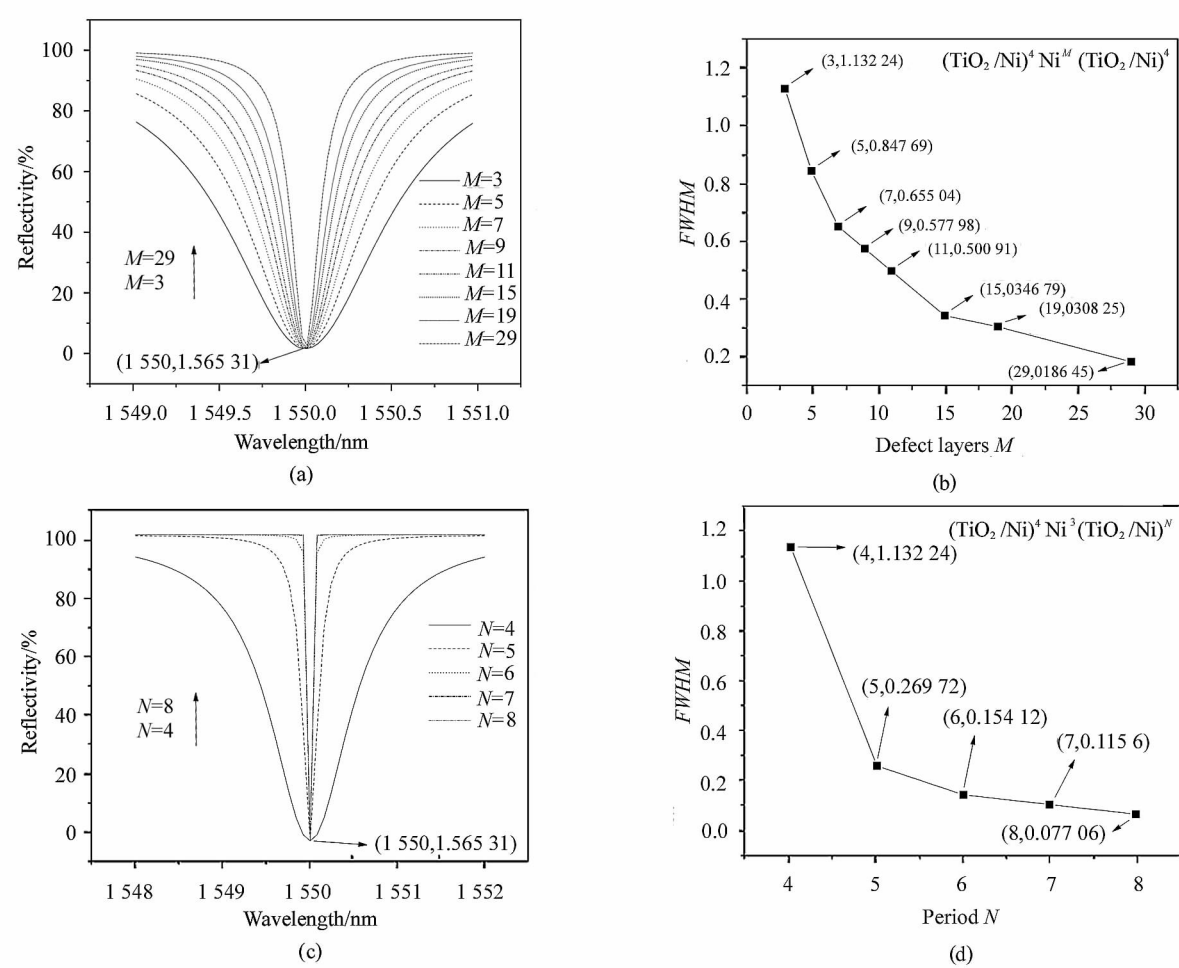


图 3 周期数和缺陷层数对 1 维叠层缺陷型光子晶体滤波性能的影响:(a)(b) 缺陷层数的影响;(c)(d) 周期数的影响
Fig. 3 The effect of periods and defect layers on filtering performance of one-dimensional laminated defect type photonic crystal:
(a)(b) The effect of defect layer; (c)(d) The effect of period

3.3 材料折射率对 1 维叠层缺陷型光子晶体的滤波性能的影响

再次,为了探讨材料折射率对 1 维叠层缺陷型光子晶体的滤波性能的影响,本文取周期数 N 为 4, 缺陷数 M 为 3, 低折射率材料选取 Ni, 高折射率材料分别选取 GaAs(n 取 3.37)、Si(n 取 3.42)、 Ta_2O_5 (n 取 2.1)、 TiO_2 (n 取 2.49)、 ZnS (n 取 2.23) 和 ZnSe (n 取 2.58), 其他参数不变并进行计算。材料折射率对 1 维叠层缺陷型光子晶体的滤波性能的影响,如图 4 所示。由图 4(a)和 4(b)可知,对于具有同周期数、同缺陷层数的 1 维叠层缺陷型光子晶体,窄带均位于 1550 nm 处,且窄带处反射率相同,均为 1.565 31%。随着折射率的增大窄带逐渐变窄,半带宽 $\Delta\lambda$ 由 3.932 03 nm 减少至 0.154 12 nm, 相对带宽 $\Delta\lambda/\lambda_0$ 由

0.002 53 减少至 0.000 10。

在 1 维叠层缺陷型光子晶体中,本文采用同一种材料设置低折射率层与缺陷层。改变低折射率材料时,低折射率层与缺陷层的设置随之改变。高折射率材料选取 TiO_2 , 低折射率材料分别选取 Al_2O_3 (n 取 1.65)、 MgF_2 (n 取 1.38)、 Na_3AlF_6 (n 取 1.34)、 Ni (n 取 1.08)、 NaCl (n 取 1.54) 和 SiO_2 (n 取 1.44), 其他参数不变并进行计算。由图 4(c)、4(d) 及 4(e) 可知,光子晶体的窄带位置不变,随着折射率的增大窄带逐渐变宽,半带宽 $\Delta\lambda$ 由 1.132 24 nm 增加至 23.089 38 nm, 相对带宽 $\Delta\lambda/\lambda_0$ 由 0.000 73 减少至 0.014 90。不同材料对应的窄带处反射率不同,折射率越大,反射率越大,由 0.804 53% 增加到 8.382 21%。这表明不同材料对 1 维叠层缺陷型光子晶体

的滤波性能的影响有所差异,改变高折射率材料,随着折射率的增大,光子晶体的带宽逐渐变窄,窄带反

射率不受影响,滤波性能逐渐提升。而改变低折射率材料,随着折射率的增大,光子晶体的带宽逐渐

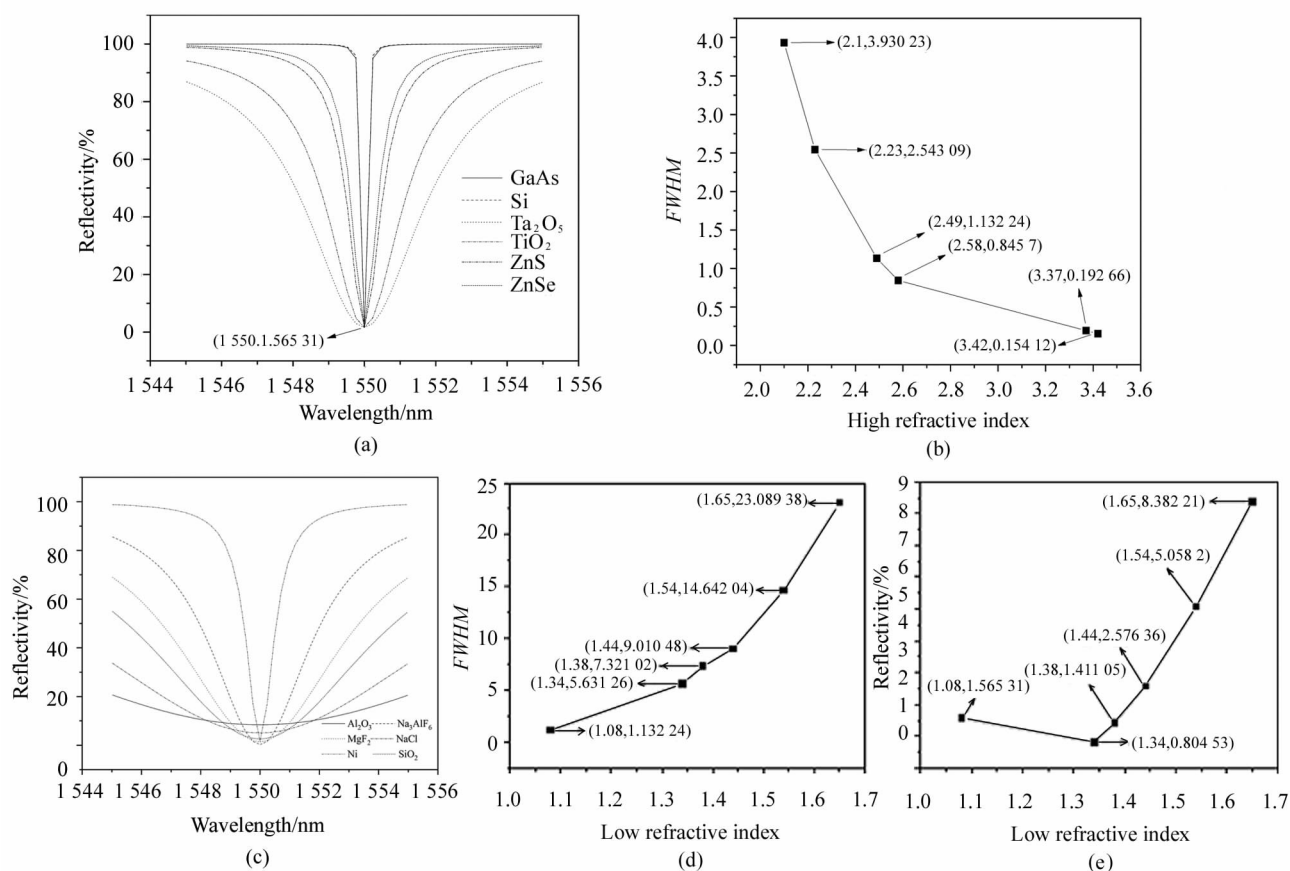


图4 材料折射率对一维叠层缺陷型光子晶体的滤波性能的影响:

(a)(b) 不同高折射率材料的影响; (c)(d)(e) 不同低折射率材料的影响

Fig. 4 The effect of materials' refractive index on filtering performance of one-dimensional laminated defect type photonic crystal: (a)(b) The effect of different high refractive index materials; (c)(d)(e) The effect of different low refractive index materials

变宽,且窄带反射率逐渐增大,滤波性能逐渐下降。

3.4 周期数、材料折射率对1维镜像型光子晶体的滤波性能的影响

之后,本文对1维镜像型光子晶体的窄带滤波器 $(AB)^N(BA)^N$ 的滤波性能进行研究。高折射率介质选取 TiO_2 (n 取2.49),低折射率介质选取 Ni (n 取1.08), TiO_2 层厚度为155.6 nm, Ni 层厚度为358.8 nm。1维镜像型光子晶体的滤波性能,如图5所示。由图5(a)可知,在周期数为4时,1维镜像型光子晶体的窄带处反射率为4%,即透射率为96%,半带宽 $\Delta\lambda$ 为1.5015 nm,相对带宽 $\Delta\lambda/\lambda_0$ 为0.00097,符合窄带滤波器性能要求。结合图2可知,当材料相同、周期数相同时,1维叠层缺陷型光子晶体的窄带处反射率更低,透射率更高,且带宽更小,这表明1维叠层缺陷型光子晶体的滤波性能优

于1维镜像型,引入缺陷层对光子晶体的滤波性能有所提升。

其他参数不变,周期数 N 分别取4、5、6、7、8、9进行计算,由图5(b)和5(c)可知,光子晶体的窄带位置不变且反射率均为4%。随着周期数的增加窄带逐渐变窄,半带宽 $\Delta\lambda$ 由1.5015 nm减少到0.04853 nm,相对带宽 $\Delta\lambda/\lambda_0$ 由0.00097减少至0.00003。增加周期数,1维镜像型光子晶体的带宽逐渐减小,窄带反射率不变,滤波性能逐渐提升。

低折射率材料选取 Ni ,高折射率材料分别选取 GaAs (n 取3.37)、 Si (取3.42)、 Ta_2O_5 (n 取2.1)、 TiO_2 (n 取2.49)、 ZnS (n 取2.23)和 ZnSe (n 取2.58),其他参数不变并进行计算。材料折射率对1维镜像型光子晶体的滤波性能的影响如图6所示。由图6(a)和6(b)可知,光子晶体的窄带位置不变且

窄带处反射率均为 4%，随着高折射率材料折射率的增加窄带逐渐变窄，半带宽由 5.00912 nm 减少至 0.15412 nm，相对带宽由 0.00323 减少至 0.00010。

高折射率材料选取 TiO_2 ，低折射率材料分别选

取 Al_2O_3 (取 1.65)、 MgF_2 (取 1.38)、 Na_3AlF_6 (取 1.34)、 Ni (取 1.08)、 NaCl (取 1.54) 和 SiO_2 (取 1.44)，其他参数不变并计算。由图 6(c) 和 (d) 可知，光子晶体的窄带位置不变且窄带处反射率均为

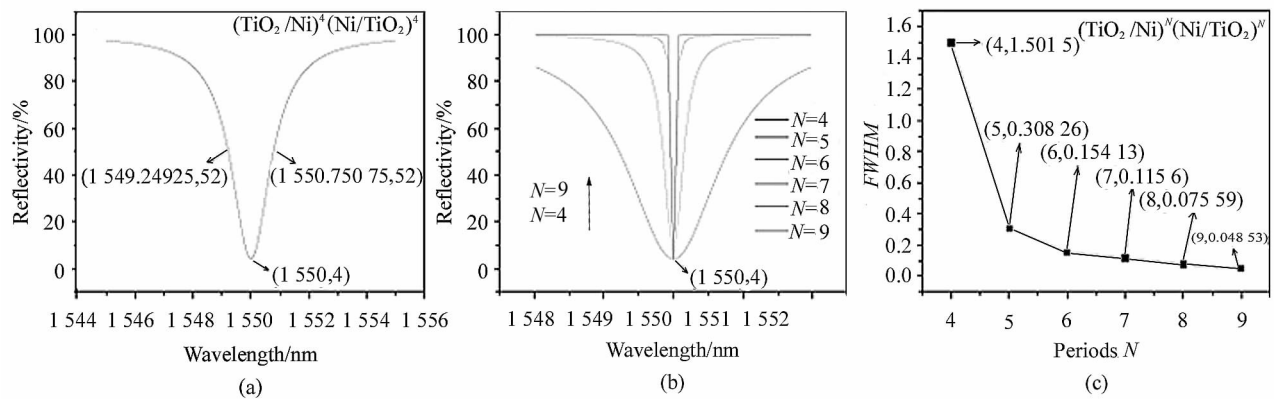


图 5 1 维镜像型光子晶体的滤波性能:(a) 周期数为 4; (b)(c) 周期数的影响
Fig. 5 Filtering performance of one-dimensional mirror image type photonic crystal:
(a) The number of periods of 4; (b)(c) The effect of periods

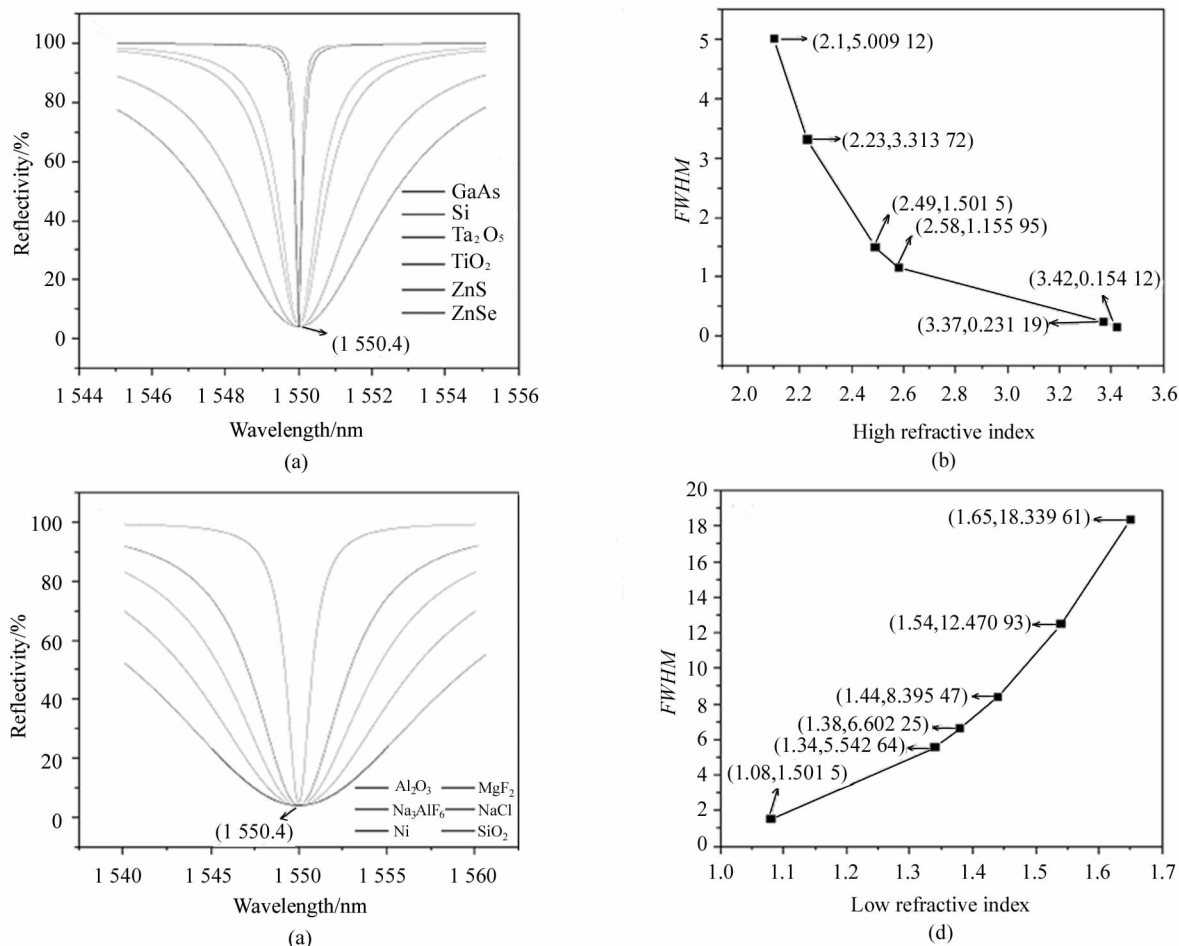


图 6 材料折射率对一维镜像型光子晶体的滤波性能的影响:(a)(b) 不同高折射率材料的影响; (c)(d) 不同低折射率材料的影响
Fig. 6 The effect of materials' refractive index on filtering performance of one-dimensional mirror image type photonic crystal:
(a)(b) The effect of different high refractive index materials; (c)(d) The effect of different low refractive index materials

4%,随着低折射率材料折射率的增加窄带逐渐变宽,半带宽由1.5015 nm增加至18.339 61 nm,相对带宽由0.000 97增加至0.011 83。这表明高折射率材料的折射率越大,1维镜像型光子晶体的带宽越小,滤波性能越优异。而低折射率材料的折射率越大,1维镜像型光子晶体的带宽越大,滤波性能越差。

3.5 膜厚对1维镜像型光子晶体的滤波性能的影响

最后,为了探究膜厚对1维镜像型光子晶体的滤波性能的影响,本文改变高折射率层的膜厚,依次设置为125.6 nm、135.6 nm、145.6 nm、155.6 nm和165.6 nm,其他参数不变并进行计算。膜厚对1维镜像型光子晶体的滤波性能的影响,如图7所示。

由图7(a)和7(b)可知,窄带的位置发生改变,膜厚每增加10 nm,窄带向右平移30 nm,膜厚每减少10 nm,窄带向左平移30 nm。过程中光子晶体的带宽不变,不同膜厚对应的窄带反射率相同。改变低折射率层的厚度,依次设置为328.8 nm、338.8 nm、348.8 nm、358.8 nm和368.8 nm,其他参数不变并进行计算。由图7(c)和7(d)可知,过程中光子晶体的带宽与窄带处反射率不变,膜厚每增加10 nm,窄带向右平移30 nm,膜厚每减少10 nm,窄带向左平移30 nm。这表明膜厚的改变仅导致1维镜像型光子晶体的窄带位置发生改变,不会对其滤波性能造成影响。同时,本文可以通过改变高、低折射率层的膜厚来移动窄带透过峰的位置,从而满足更多场景的滤波需要。

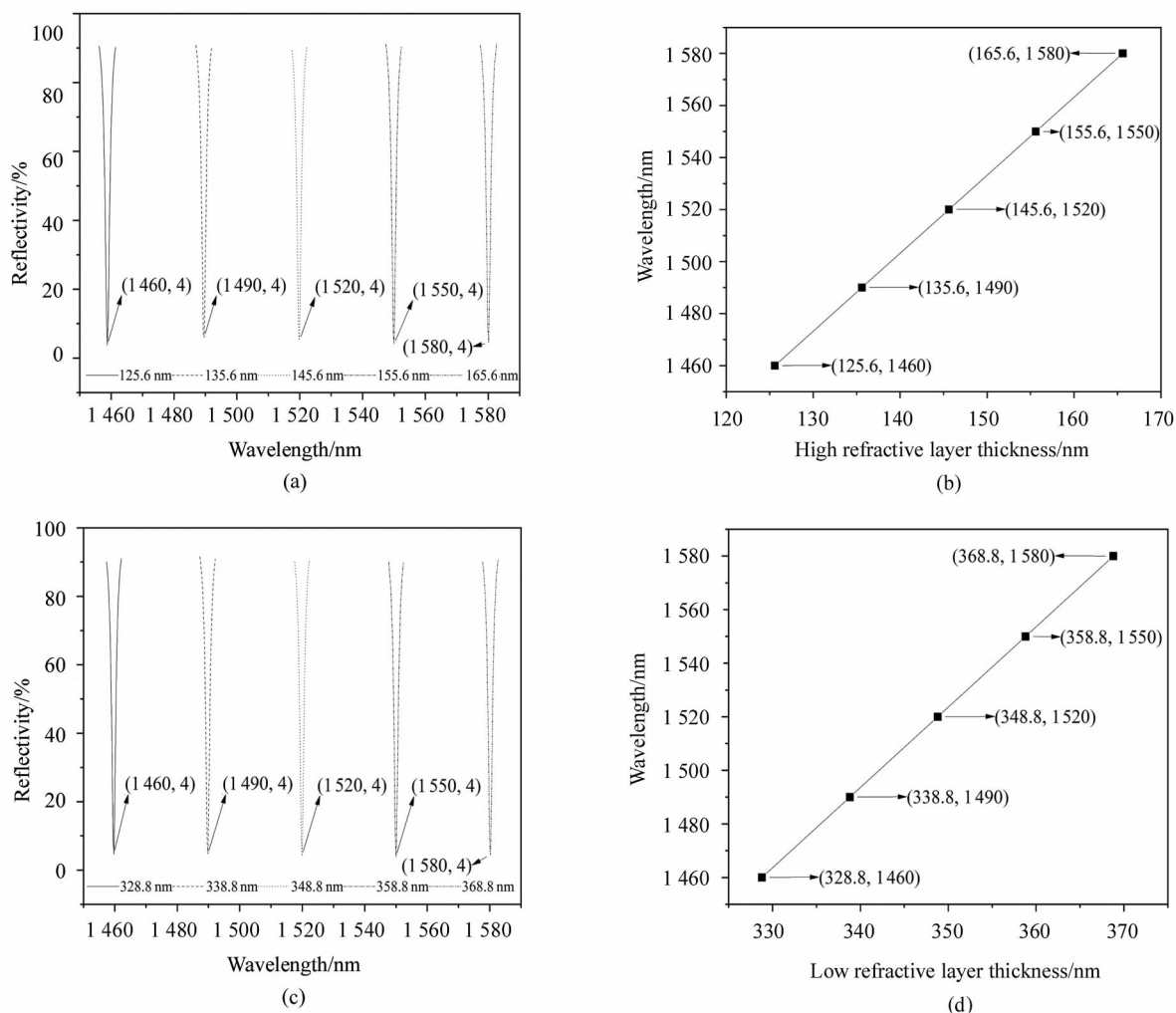


图7 膜厚对1维镜像型光子晶体的滤波性能的影响:

(a)(b) 高折射率层膜厚的影响;(c)(d) 低折射率层膜厚的影响

Fig. 7 The effect of film thickness on filtering performance of one-dimensional mirror image type photonic crystal:

(a)(b) The effect of high refractive index layer film thickness; (c)(d) The effect of low refractive index layer film thickness

4 结 论

本文设计了2种不同结构的1维光子晶体的窄带滤波器,分别为叠层缺陷型和镜像型,由高折射率层、低折射率层和缺陷层构成。高折射率层厚度为155.6 nm,低折射率层厚度为358.8 nm,缺陷层厚度为358.8 nm。经过数值模拟后发现,2种窄带滤波器均可在1550 nm处得到较窄的透过带。叠层缺陷型窄带透射率接近99%,镜像型窄带透射率为96%,带宽与滤波性能达到了窄带滤波技术的要求。随着周期数的增加、缺陷层数的增加、高折射率材料折射率的增大和低折射率材料折射率的减小,光子晶体的窄带逐渐变窄,滤波性能逐渐提升。当改变高、低折射率层的膜厚时,镜像型光子晶体的窄带位置随之改变。结果表明:本文设计的2种窄带滤波器具有优异的滤波性能,能够实现窄带滤波,其中1维叠层缺陷型光子晶体可以将透射率提高至接近99%,证明缺陷层的引入提升了光子晶体的滤波性能。本文对1维光子晶体的窄带滤波器的设计及优化,有望在光波分复用技术和光通信技术中获得广泛的应用。

参考文献:

- [1] AHMED F, AHMED K. Novel design of dual guided photonic crystal fiber for large capacity transmission in high-speed optics communications with supporting good quality OAM and LP modes[J]. Alexandria Engineering Journal, 2020, 59(6): 4889-4899.
- [2] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [3] ABDELAADL S, YOUNIS B, OBAYYA S, et al. Highly negative dispersion dual-core liquid crystal photonic crystal fiber[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 60: 102330-102337.
- [4] YANG L, WANG L Y, JIN X, et al. Design of bimetal-coated photonic crystal fiber filter based on surface plasmon resonance[J]. Results in Optics, 2020, 1: 100027-100034.
- [5] ISTI M, TALUKDER H, ISLAM S, et al. Asymmetrical D-channel photonic crystal fiber-based plasmonic sensor using the wavelength interrogation and lower birefringence peak method[J]. Results in Physics, 2020, 19: 103372-103381.
- [6] FASIHI K, BASHIRI S. A new 2×1 photonic crystal multiplexer assisted by Fano resonances and Kerr nonlinear effect[J]. Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 2020, 42: 100837-100843.
- [7] SOMAN A, ANTONY A. Colored solar cells with spectrally selective photonic crystal reflectors for application in building integrated photovoltaics[J]. Solar Energy, 2019, 181: 1-8.
- [8] ZHANG Y P, ZHANG H Y, ZHENG Y, et al. Super narrow and multi-channel narrow photonic crystal optical filters[J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2004, 10(4): 173-175.
张玉萍, 张会云, 郑义, 等. 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.
- [9] LIU H S, OUYANG Y B, LI J Z, et al. Photonic crystal WDM filters[J]. Journal of Optoelectronics • Lasers, 2002, 13(2): 145-149.
刘海山, 欧阳征标, 李景镇, 等. 用于波分复用的光子晶体滤波器[J]. 光电子 • 激光, 2002, 13(2): 145-149.
- [10] ZAGHDOUDI J, KANZARI M. One-dimensional photonic crystal filter using a gradient-index layer[J]. Optik, 2018, 160: 189-196.
- [11] WU F, ZHANG Z Q, YIN C P, et al. Omnidirectional narrow-band ultraviolet filtering based on one-dimensional defective photonic crystal containing hyperbolic metamaterial[J]. Physica B: Condensed Matter, 2021, 608: 412872-412877.
- [12] LI W. A three-channel WDM based on photonic crystal wave-guide and micro-cavity coupled[J]. LASERNA, 2014, 35(5): 5-7.
李未. 光子晶体波导与微腔耦合的三通道波分复用器[J]. 激光杂志, 2014, 35(5): 5-7.
- [13] LI Y J, LI J, WEN H F, et al. Multi-channel photonic crystal filter based on coupling of waveguide and ring cavity[J]. Journal of Optoelectronics • Lasers, 2021, 32(5): 443-450.
李韵嘉, 李军, 文化锋, 等. 基于波导与环形腔耦合的多通道光子晶体滤波器[J]. 光电子 • 激光, 2021, 32(5): 443-450.
- [14] PIRVARAM A, TALEBZADEH N, ROSTAMI M, et al. Evaluation of a $\text{ZrO}_2/\text{ZrO}_2$ -aerogel one-dimensional photonic crystal as an optical filter for thermophotovoltaic applications[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2021, 25: 100968-100977.
- [15] BORN M, WOLF E. Principles of optics[M]. YANG J S, Transl. 2nd ed. Beijing: Science Press, 1978: 189-201.
玻恩, 沃耳夫. 光学原理[M]. 杨葭荪译. 2版. 北京: 科学出版社, 1978: 189-201.
- [16] MAO Y J, DANG M R. Optical wavelength division multiplexing communication technology[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 1996: 20-35.
毛幼菊, 党明瑞. 光波分复用通信技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996: 20-35.
- [17] LU J J, LIU W G, PAN Y Q. Optical thin film technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 33-46.
卢进军, 刘卫国, 潘永强. 光学薄膜技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 33-46.

作者简介:

马会中 (1967—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事先进材料的结构及特性方面的研究。