

文章编号: 1002-1582(2025)04-0462-06

基于级联缺陷层 Bragg 光栅的多波长滤波器设计

李杨*, 郭静菁

(1. 中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽 合肥 230088)

(2. 雷达探测感知全国重点实验室, 安徽 合肥 230088)

(3. 孔径阵列与空间探测安徽省实验室, 安徽 合肥 230088)

摘 要: 建模分析了 Bragg 光栅引入级联缺陷层后的传输谱特性, 发现随着级联缺陷层数的增多, 滤波器谐振峰不断增多, 七级联缺陷层 Bragg 光栅可引入谐振峰数达到 7, 且级联缺陷层数对应谐振峰数量; 随着缺陷层间周期数和缺陷层长度增大, 谐振波长分别向中心偏移和红移, 单、二、三级联缺陷层 Bragg 光栅滤波器在不同缺陷层长度下最大谐振波长变化率分别为 0.0477、0.03021、0.03107; 且输入输出端周期数有助于控制滤波器的透射率。依据仿真分析结果, 可优化选择级联缺陷层 Bragg 光栅缺陷层的参数, 设计出实际需要的多波长滤波器。

关 键 词: Bragg 光栅; 缺陷层; 多波长滤波器

中图分类号: TN913.7

文献标识码: A

Design of multi-wavelength filter based on cascaded Bragg grating with defect layers

LI Yang*, GUO Jingjing

(1. The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, China)

(2. National Key Laboratory of Radar Detection and Sensing, Hefei 230088, China)

(3. Key Laboratory of Aperture Array and Space Application, Hefei 230088, China)

Abstract: The transmission characteristics of cascaded Bragg grating with defect layers have been studied by simulation. The results show that the resonance peak of the filter increased with increases of the number of cascaded defect layers. The number of cascaded defect layers was the same as the number of resonance peak. And the Bragg grating with seven defect layers have seven resonance peaks. As the number of cycles between defect layers and the length of defect layers increase, the resonant wavelength undergoes center shift and red shift, respectively. Under different defective layer lengths, the maximum resonance wavelength changes rate of the Bragg grating with single, double, and triple defect layers was 0.0477, 0.03021, and 0.03107, respectively. And the number of cycles at the input and output terminals can helps to control the transmittance of the filter. According to the simulation results, the applicable multi-wavelength filter can be obtained by optimally designed the related parameters of defect layers.

Keywords: bragg grating; defect layers; multi-wavelength filter

收稿日期: 2025-04-15; 收到修改稿日期: 2025-05-06

基金项目: 安徽省重点研究与开发计划 (2022b13020003), 西安电子科技大学杭州研究院院士开放基金 (XH-KY-202306-0290)

作者简介: 李杨 (1991—), 男, 高级工程师, 博士, 从事集成光学技术、新体制雷达技术研究。

* 通讯作者: 1843981854@qq.com

0 引言

多波长滤波器是实现多波长光选择和控制的关键技术,在光通信^[1]、激光^[2,3]、光谱分析^[4]、传感^[5,6]等领域有着广泛的应用。目前,多波长光学滤波器包括马赫曾德尔干涉仪、微环及组合干涉仪、Bragg光栅等。2019年,Munk D基于七级联马赫增德干涉仪提出了八通道多路复用器件^[7],但马赫曾德尔干涉仪光谱呈现为正弦型,有较大的应用局限;微环及组合干涉仪即多种干涉结构结合,如微环加载马赫曾德尔干涉仪。2021年,Kohli N基于2个级联马赫增德干涉仪和2个微环提出了一种可调谐波长滤波器^[8]。但此类型器件设计和制备难度很大^[9];Bragg光栅作为一种广泛使用的滤波器件,利用周期结构反射实现了良好的选频特性,且通过多种周期的组合可实现多波长滤波功能,但长、多周期的设计组合会增加加工的难度^[10-12]。随着集成技术的发展,Bragg光栅滤波器的设计和制造也在不断优化,以满足更高的性能要求,其中在光栅中引入特殊结构进行调控也是重要的手段之一^[13]。其中,2024年,Zhongyao Zhang基于Bragg反射镜的可级联法布里-珀罗腔提出了一种具有超宽光学带宽的波导MOEMS陀螺仪,具备较高的灵敏度^[14]。

本文基于级联缺陷层Bragg光栅的多波长滤波器利用光子晶体缺陷态独特的光子禁带和局域效应,从而实现了优异的滤波性能。光子晶体本身具备光子带隙的特性,即在特定频率范围内,光无法在晶体内部传播,这使得光子晶体天然具备带阻滤波器的功能,缺陷层的引入可以自由调节带隙特性。与传统滤波器相比,基于级联缺陷层Bragg光栅的多波长滤波器具有很低的插入损耗、更灵活的多波长设计范围,并且对光子禁带内的光具有显著的抑制效果,当光频接近光子禁带时,透射率会急剧下降,其陡峭度接近垂直,从而进一步提升了滤波器的选择性和性能。

文中使用传输矩阵法分析了基于级联缺陷层Bragg光栅的多波长滤波器设计原理,并基于FDTD(时域有限差分)仿真平台进行数值仿真,系统研究了其传输特性,此项研究通过灵活设计缺陷层参数来控制滤波器传输谱特性,包括谐振峰数量、位置、透过率等,对光开关、可调谐滤波器、光限幅器等器件设计具有显著的指导意义。

1 级联缺陷层Bragg光栅滤波器结构

级联缺陷层Bragg光栅滤波器分为输入输出端、光栅两个部分。输入输出端为窄波导部分,光栅部分为宽波导刻蚀出的栅齿结构,刻蚀部分宽度与窄波导宽度相同。通过在光栅中引入多个缺陷层结构破坏部分周期,实现级联缺陷层Bragg光栅滤波器设计。单、双、三级联缺陷层滤波器如图1(a)、(b)、(c)所示;缺陷层长度、缺陷间周期数、输入输出端周期数的结构标注如图1(d)所示,缺陷层数为级联缺陷层Bragg光栅所包含的缺陷层数量;硅波导(窄波导部分)的厚度为220nm,宽度为500nm,其输入输出端横截面折射率分布及传输模式分别如图1(e)、(f)所示。

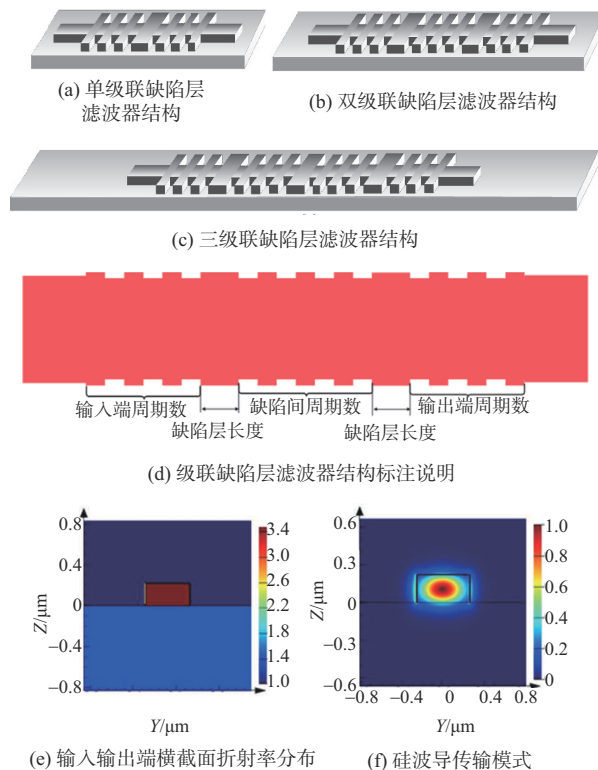


图1 级联缺陷层滤波器结构及硅波导

输入输出端横截面的折射率分布及传输模式

2 级联缺陷层Bragg光栅滤波器设计原理

为实现硅基波导上级联缺陷层Bragg光栅的多波长滤波,需利用宽窄波导及包层的参数来设计光栅,主要是对宽波导、窄波导及缺陷层波导的长度和光栅周期数分别进行设计。利用传输矩阵法可获得级联缺陷层Bragg光栅的响应光谱及中心波长。

光在不同介质传播涉及到相位的改变,光从介质1跃变到介质2的传输矩阵可表示为^[15]

$$T_{1-2} = \begin{bmatrix} \frac{1}{t} & \frac{r}{t} \\ \frac{r}{t} & \frac{1}{t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{n_1 + n_2}{2\sqrt{n_1 n_2}} & \frac{n_1 - n_2}{2\sqrt{n_1 n_2}} \\ \frac{n_1 - n_2}{2\sqrt{n_1 n_2}} & \frac{n_1 + n_2}{2\sqrt{n_1 n_2}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, t 和 r 分别为折射率跃变界面的透射系数和反射系数; n_1 和 n_2 分别为介质 1 和介质 2 的有效折射率。如图 1 (d) 所示, 光栅的折射率跃变过程包含: 宽波导-窄波导跃变、窄波导-宽波导跃变, 对应传输矩阵可表示为 T_{w-n} 和 T_{n-w} 。波导的传输矩阵表示为^[16]

$$\begin{cases} T_{wg} = \begin{bmatrix} e^{i\beta L} & 0 \\ 0 & -e^{i\beta L} \end{bmatrix} \\ \beta = \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda} - \frac{\alpha}{2} j \end{cases} \quad (2)$$

式中, L 为波导的长度; α 和 β 分别为波导损耗系数和传播常数; n_{eff} 为对应波长 λ 的波导有效折射率。则宽波导、窄波导和缺陷层波导分别为 T_w 、 T_n 和 T_d 。级联缺陷层 Bragg 光栅的传输矩阵可分为输入端传输矩阵 A 、缺陷层传输矩阵 B 、缺陷间传输矩阵 C 及输出端传输矩阵 D , 分别表示为

$$\begin{cases} A = (T_w T_{w-n} T_n T_{n-w})^{N_1} \\ B = T_d T_{w-n} \\ C = (T_n T_{n-w} T_w T_{w-n})^{N_2} T_n T_{w-n} \\ D = (T_n T_{n-w} T_w T_{w-n})^{N_1} \end{cases} \quad (3)$$

式中, N_1 为收敛端 (包括输入和输出端) 周期数; N_2 为缺陷层间周期数。则级联缺陷层 Bragg 光栅的传输矩阵为 $T_m = A[BC]_{m-1}BA$, 其中 m 为缺陷层数。同时, 级联缺陷层 Bragg 光栅的设计满足布拉格相位匹配条件^[16]

$$n_{\text{eff}-\text{Bragg}} = \frac{(n_{\text{eff}-w} + n_{\text{eff}-n})}{2} = \frac{\lambda_c}{2(L_w + L_n)} \quad (4)$$

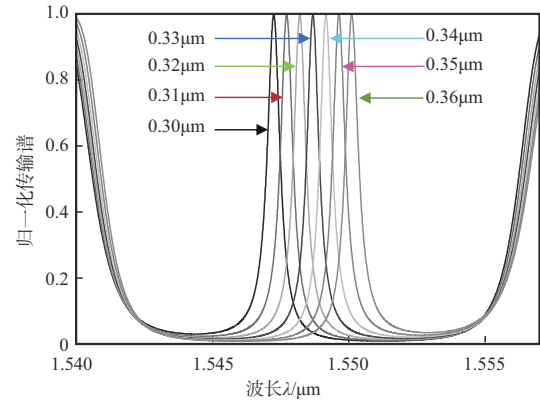
式中, λ_c 为布拉格反射区域中心波长; L_w 和 L_n 为波导光栅宽窄单元的长度, 两者的和 Δ 为布拉格光栅的周期; $n_{\text{eff}-w}$ 和 $n_{\text{eff}-n}$ 分别为波导光栅宽窄处在布拉格反射中心波长处有效折射率。通过计算可粗略设计滤波器的中心波长, 具体设计仿真可利用 FDTD (时域有限差分) 仿真平台实现。

3 级联缺陷层 Bragg 光栅滤波器仿真分析

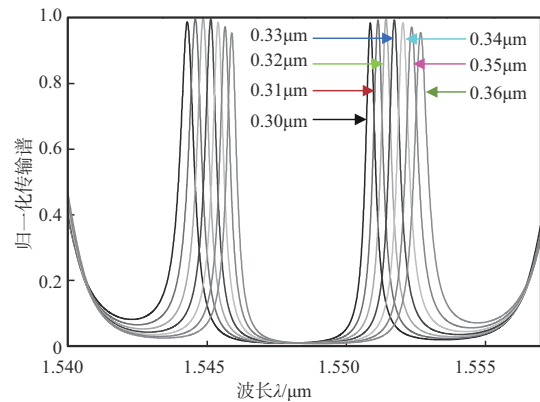
级联缺陷层 Bragg 光栅的传输光谱与缺陷层长度、缺陷层间周期数输入输出端周期数及缺陷层数相关, 下面将基于 FDTD (时域有限差分) 仿真平台, 开展相关参数对器件性能影响的仿真分析。

3.1 缺陷层长度对滤波器性能影响

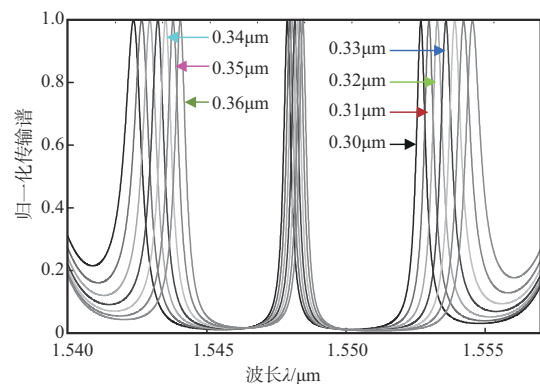
设定仿真参数如下: 宽、窄波导长度分别为 $0.52\mu\text{m}$ 、 $0.48\mu\text{m}$, 折射率分别为 2.421、2.345; Bragg 光栅的周期为 $0.325\mu\text{m}$ 。单缺陷层 Bragg 光栅滤波器设定输入端与输出端周期数皆为 100, 缺陷层取中间位置, 缺陷层宽度为 $0.5\mu\text{m}$, 缺陷层长度分别取 $0.30\mu\text{m}$ 、 $0.31\mu\text{m}$ 、 $0.32\mu\text{m}$ 、 $0.33\mu\text{m}$ 、 $0.34\mu\text{m}$ 、 $0.35\mu\text{m}$ 、 $0.36\mu\text{m}$ 。不同缺陷层长度下单缺陷层 Bragg 光栅滤波器传输谱如图 2 (a) 所示。



(a) 单缺陷层 Bragg 光栅滤波器传输谱



(b) 双级联缺陷层 Bragg 光栅滤波器传输谱



(c) 三级联缺陷层 Bragg 光栅滤波器传输谱

图 2 不同缺陷层长度下单、双级联、三级联缺陷层 Bragg 光栅滤波器传输谱

双级联缺陷层 Bragg 光栅滤波器设定两层缺陷层间周期数为 30, 器件输入端与输出端皆为 100, 缺陷层宽度为 $0.5\mu\text{m}$, 从左至右排列, 第一个缺陷

层长度为 $0.32\mu\text{m}$, 第二个缺陷层长度分别取 $0.30\mu\text{m}$ 、 $0.31\mu\text{m}$ 、 $0.32\mu\text{m}$ 、 $0.33\mu\text{m}$ 、 $0.34\mu\text{m}$ 、 $0.35\mu\text{m}$ 、 $0.36\mu\text{m}$ 。不同缺陷层长度下, 双级联缺陷层 Bragg 光栅滤波器传输谱如图 2 (b) 所示。

三级联缺陷层 Bragg 光栅滤波器设定三层缺陷层间周期数都为 30, 输入端与输出端周期数分别为 100, 缺陷层宽度为 $0.5\mu\text{m}$, 从左至右排列, 第一与第二缺陷层长度为 $0.32\mu\text{m}$, 第三缺陷层长度分别取 $0.30\mu\text{m}$ 、 $0.31\mu\text{m}$ 、 $0.32\mu\text{m}$ 、 $0.33\mu\text{m}$ 、 $0.34\mu\text{m}$ 、 $0.35\mu\text{m}$ 、 $0.36\mu\text{m}$, 不同缺陷层长度下三级联缺陷层 Bragg 光栅滤波器传输谱如图 2 (c) 所示。

如图 2 所示, 随着缺陷层数量的增多, 谐振峰数量也随之增多, 且随着缺陷层长度的增加, 谐振峰波长发生红移, 根据滤波需求可通过控制缺陷层级联数量来灵活控制谐振峰数量及位置。

不同缺陷层长度下单、双级联、三级联缺陷层 Bragg 光栅滤波器谐振峰的变化如图 3 所示, 由于器件的对称性, 在双级联缺陷层 Bragg 光栅滤波器仿真中, 固定第一缺陷层长度, 并改变第二缺陷层长度条件下, 与固定第二缺陷层长度, 并改变第一缺陷层长度条件下的传输光谱相同; 在三级联缺陷层 Bragg 光栅滤波器仿真中, 主要包括两种情况: (1) 中间缺陷层长度取固定, 分别改变左侧、右侧缺陷层长度, 两者光谱是重叠的, 光谱变化如图 3 中菱形点线所示; (2) 左侧、右侧缺陷层长度取相同的固定值, 改变中间缺陷层长度, 光谱变化如图 3 中三角点线所示。

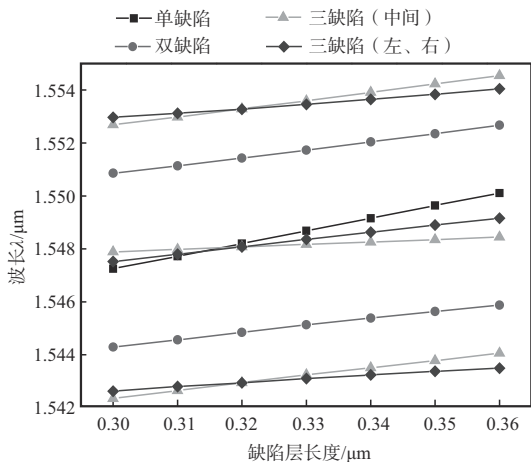


图3 不同缺陷层长度下单、双级联、三级联缺陷层 Bragg 光栅滤波器谐振波长变化拟合曲线

不同缺陷层长度下单、双级联、三级联缺陷层 Bragg 光栅滤波器谐振波长变化拟合结果如表 1 所示, 单缺陷层 Bragg 光栅滤波器谐振波长随缺

陷层的变化率为 0.0477; 双级联缺陷层 Bragg 光栅滤波器第一、第二谐振波长随缺陷层的变化率分别为 0.03021、0.02668; 三级联缺陷层 Bragg 光栅滤波器 (改变第二 (中间) 缺陷层长度) 第一、第二、第三谐振波长随缺陷层的变化率分别为 0.03107、0.00929、0.0283; 三级联缺陷层 Bragg 光栅滤波器 (改变第一 (左) 或第三 (右) 缺陷层长度) 第一、第二、第三谐振波长随缺陷层的变化率分别为 0.0179、0.02739、0.01454。基于章节 2 原理分析, 增加了多层缺陷层的厚度等效增加了整体平均折射率, 从式 (4) 可知谐振波长亦会增大, 所以谐振均向长波长漂移。

表1 不同缺陷层长度下单、双级联、三级联缺陷层 Bragg 光栅滤波器谐振波长变化拟合结果

类型	拟合结果
单缺陷层 Bragg 光栅滤波器	$y_1=1.5329+0.0477x_1$
双级联缺陷层 Bragg 光栅滤波器 (按图 3 从上至下排序)	$y_1=1.54177+0.0302x_1$ $y_2=1.5363+0.02668x_2$
三级联缺陷层 Bragg 光栅滤波器— 中间 (按图 3 从上至下排序)	$y_1=1.54335+0.03107x_1$ $y_2=1.5451+0.00929x_2$ $y_3=1.5338+0.0283x_3$
三级联缺陷层 Bragg 光栅滤波器— 左、右 (按图 3 从上至下排序)	$y_1=1.5475+0.0179x_1$ $y_2=1.53931+0.02739x_2$ $y_3=1.53829+0.01454x_3$

3.2 缺陷层间周期数对滤波器性能影响

仿真双级联缺陷层 Bragg 光栅滤波器缺陷层间周期数对滤波器性能的影响, 仿真参数设置与 3.1 节相同, 缺陷层长度为 $0.32\mu\text{m}$, 器件输入端与输出端皆为 100, 从左至右排列, 第一与第二缺陷层间周期数分别取 10、30、50、70、90、110。则不同缺陷层间周期数下滤波器传输谱如图 4 (a) 所示, 随着缺陷层间周期数增多, 谐振波长向中心偏移。不同缺陷层间周期数下双、三级联缺陷层 Bragg 光栅滤波器谐振波长的变化曲线如图 4 (b) 所示。三缺陷 (1) 为同时改变第一与第二缺陷层间、第二与第三缺陷层间周期数, 取 10、30、50、70、90、110; 三缺陷层 (2) 和 (3) 分别为固定第一与第二缺陷层间和第二与第三缺陷层间周期数为 30, 其它取 10、30、50、70、90、110。从图 4 (b) 中可看出, 随着缺陷层间周期数增多, 谐振波长向中心偏移。即随着缺陷层周期数的增加, 光子晶体带隙的约束性增强, 谐振中心开始逼近中心波长^[17]。

3.3 输入输出端周期数对滤波器性能影响

仿真单、双、三级联缺陷层 Bragg 光栅滤波器输入输出端周期数对滤波器性能的影响, 分别

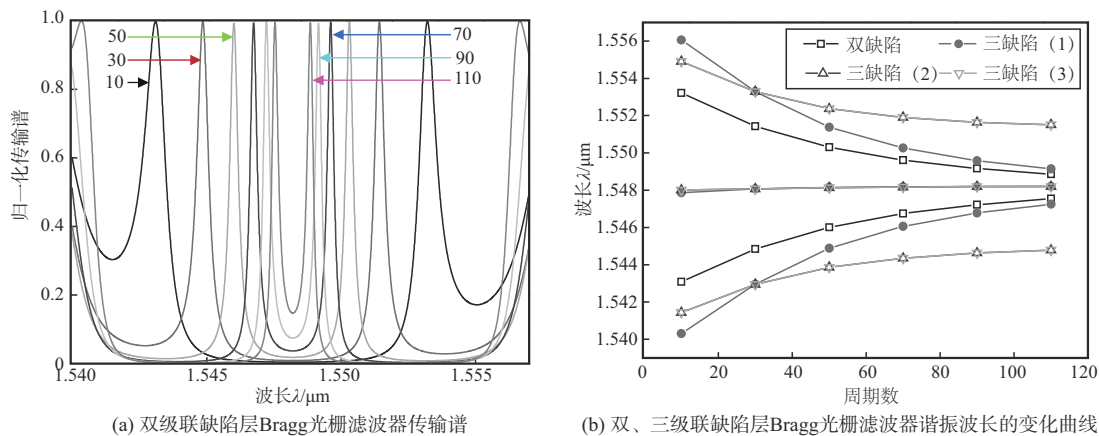


图4 不同缺陷层间周期数下双级联缺陷层Bragg光栅滤波器传输谱及双、三级联缺陷层Bragg光栅滤波器谐振波长的变化曲线

如图5(a)、(b)和(c)所示。缺陷层周期数为30, 输入输出端周期数相同, 分别取10, 30, 50, 70, 90, 110。如图5所示, 随着输入输出端周期

数增多, 滤波器的滤波性能就越好。即随着输入输出端周期数的增加, 光子晶体带隙的约束性增强, 谐振波长线宽开始收敛^[17]。

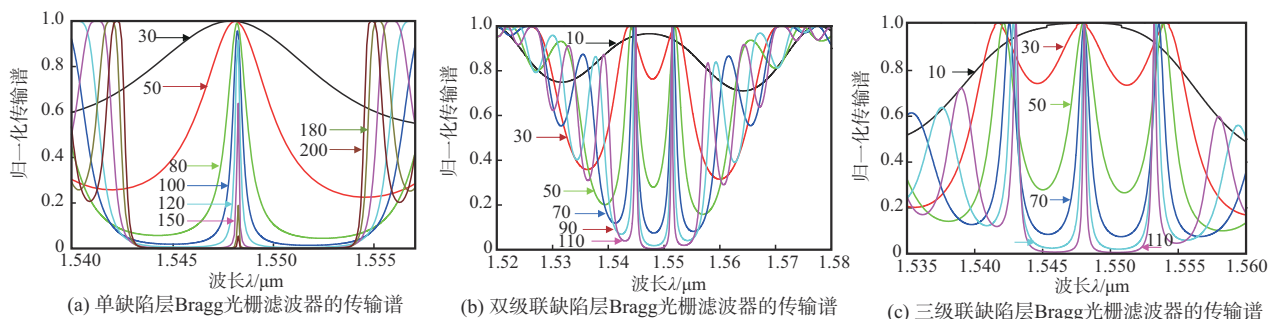


图5 不同输入输出端周期数下单、双、三级联缺陷层Bragg光栅滤波器的传输谱

3.4 级联数对滤波器性能影响

仿真七级联下缺陷层Bragg光栅滤波器的传输谱特性如图6(a)所示, 谐振波长数量达到了7个。仿真不同数量级联下缺陷层Bragg光栅滤波器的谐振峰的数量变化如图6(b)所示, 随着级联数的增多, 滤波器谐振峰不断增多, 同时级联数对应谐振峰数量。

其它同类滤波技术的对比: 基于求和差分微环滤波架构的通用可调谐滤波器方案, 实现

了1543~1546nm宽谱的单波长可调谐^[18]; 基于三级联马赫曾德尔干涉仪结合两串联微环方案, 实现了1545~1549nm宽谱的双波长可调谐^[19]; 基于啁啾相移光纤光栅的多波长滤波器的方案, 实现了1547~1553nm宽谱的三波长可调谐^[20]。本方案基于多级联缺陷层Bragg光栅方案, 七级联下实现了1540~1555nm宽谱的七波长可调谐, 具备优异的多波长滤波性能。同时本方案可通过灵活设计缺陷层参数来控制滤波器传输谱特

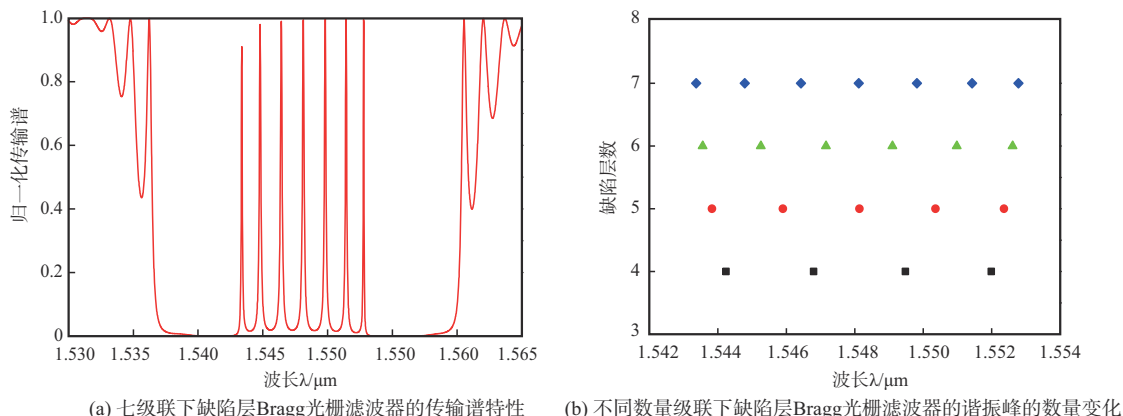


图6 七级联下及不同数量级联下缺陷层Bragg光栅滤波器的特性

性,包括谐振峰数量、位置等,具备较高的调谐自由度。

4 结 论

利用传输矩阵法分析设计了基于级联缺陷层 Bragg 光栅的多波长滤波器,用 FDTD 仿真平台建模分析了缺陷层长度、缺陷层周期数、输入输出端周期数、级联数对级联缺陷层滤波器透射特性的影响。随着缺陷层长度的增加,谐振峰波长发生红移;随着缺陷层间周期数增多,谐振波长向中心偏移;随着输入输出端周期数增多,器件的滤波性能就越好;随着级联数的增多,滤波器谐振峰不断增多,且级联数对应谐振峰数量。研究表明,本器件可通过灵活设计缺陷层来控制传输谱特性,包括谐振峰数量、位置、透过率等,在传感、可调谐滤波等领域有着广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] Jianshuai Wang, Li Pei, Zhiqi Li, et al. Wavelength-Switchable polarization filter based on graphene-coated D-shaped photonic crystal fiber[J]. *Plasmonics*, 2024, 19(5): 2363—2370.
- [2] Wang Chaoran, Li Xingliang, Zhang Shumin, et al. Wavelength and bandwidth tunable filter and its application in a dissipative soliton fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(11): 2698—2701.
- [3] Chang Yanbiao, Li Pei, Wang Jianshuai, et al. Highly stable multi-wavelength fiber laser based on hybrid enclosed two-armed fiber filter[J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 71: 102894.1—7.
- [4] Li Xiang, Fan Zhiqiang, et al. Photonic-assisted wideband microwave frequency measurement based on optical heterodyne detection[J]. *Optics Express*, 2024, 32(10): 18127—18138.
- [5] Lichao Shi. Multi-wavelength transmission of hollow-core Bragg fiber with modified binary one-dimensional photonic crystal cladding[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(10): 1492—1498.
- [6] Hideki Fukano, Takahito Mukai. High-sensitivity multipoint refractive index measurement system composed of multimode interference sensors and arrayed waveguide wavelength filters[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2022, 61(sk): SK1004.1—6.
- [7] Munk D, Katzman M, Kaganovskii Y, et al. Eight-channel silicon-photonic wavelength division multiplexer with 17 GHz spacing[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(5): 8300310.
- [8] Kohli N, Sang B L, Nabki F, et al. Tunable bandpass filter with serially coupled ring resonators assisted MZI[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(4): 6600608.
- [9] 蒋佳, 耿敏明, 刘婧, 等. 基于三环辅助 Mach-Zehnder 干涉仪的带宽可调滤波器设计[J]. *光子学报*, 2021, 50(7): 0713002.
- [10] Jiang Jia, Geng Mingming, Liu Qiang, et al. Design of a reconfigurable optical filter based on triple-ring-assisted Mach-Zehnder interferometer with large bandwidth tuning capability[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(7): 0713002.
- [11] Luo Pengtao, Chen Fengyi, Li Xingyong, et al. Femtosecond laser plane-by-plane inscribed ultrahigh-order fiber Bragg grating and its application in multi-wavelength fiber lasers[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(12): 3127—3130.
- [12] Sun Boshu, Wei Maoliang, et al. Integrated Bragg grating filters based on silicon-Sb₂Se₃ with non-volatile bandgap engineering capability[J]. *Optics Express*, 2023, 31(17): 27905—27913.
- [13] Pereira, Luís, Min R, Woyessa G, et al. Interrogation method with temperature compensation using ultra-short fiber bragg gratings in silica and polymer optical fibers as edge filters[J]. *Sensors* (14248220), 2023, 23(1): 23—30.
- [14] C. Xin, Y. Xu, Z. Zhang, et al. Micro-opto-electro-mechanical systems for high-precision displacement sensing: A review[J]. *Micromachines*, 2024, 15(8): 1—24.
- [15] Z. Zhang, X. Wang, C. Fan, et al. Design and simulation of a waveguiding MOEMS gyroscope with ultrawide optical bandwidth based on tunable cascaded Fabry - Perot cavities[J]. *Optics Communications*, 2024, 556(1): 130268.
- [16] Chao Ying Zhao, Lei Zhang and Cheng Mei Zhang. Compact SOI optimized slot micro-ring coupled phase-shifted Bragg grating resonator for sensing[J]. *Optics Communications*, 2018, 414: 212—216.
- [17] 刘春娟, 桑常林, 吴小所, 等. 一维光子晶体槽型微环谐振器及其传感特性[J]. *光学学报*, 2021, 40(24): 2413002.
- [18] Liu Chunjuan, Sang Changlin, Wu Xiaosuo, et al. One-dimensional photonic crystal groove microring resonators and its sensing characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 40(24): 2413002.
- [19] 承军, 王玮钰, 熊耀兵, 等. TiO₂/SiO₂ 多层膜系一维光子晶体缺陷态特性研究[J]. *光电技术应用*, 2012, 27(4): 34-38.
- [20] Cheng Jun, Wang Weiyu, Xiong Yaobing, et al. Defect state properties of one-dimensional TiO₂/SiO₂ multilayer photonic crystal[J]. *Electro-optic Technology Application*, 2012, 27(4): 34—38.
- [21] Ren Y, Jiang Z P, Van V. A general variable bandwidth microring filter for lossless bandwidth tuning[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(14): 4745—4751.
- [22] Pouloupoulos G, Giannoulis G, Iliadis N, et al. Flexible filtering element on SOI with wide bandwidth tunability and full FSR tuning[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(2): 300—306.
- [23] 熊海, 裴丽, 刘超, 等. 基于啁啾相移光纤光栅的多波长滤波器的研究[J]. *光电技术应用*, 2014, 29(6): 32—35.
- [24] Xiong Hai, Pei Li, Liu Chao, et al. Research on multi-wavelength filter based on chirped phase-shifted fiber Bragg grating[J]. *Electro-optic Technology Application*, 2014, 29(6): 32—35.