

基于超表面的多通道窄带滤光片研究

王敏 孙硕 李晟 吴佳 王康

Research on multi-channel narrow-band filter based on metasurface

WANG Min, SUN Shuo, LI Sheng, WU Jia, WANG Kang

引用本文:

王敏, 孙硕, 李晟, 等. 基于超表面的多通道窄带滤光片研究[J]. *应用光学*, 2024, 45(1): 184–191. DOI: 10.5768/JAO202445.0105002

WANG Min, SUN Shuo, LI Sheng, et al. Research on multi-channel narrow-band filter based on metasurface[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(1): 184–191. DOI: 10.5768/JAO202445.0105002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0105002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于双层金属光栅的中波红外多通道滤光片结构

Multi-channel mid-infrared filter structure based on bilayer metallic grating

应用光学. 2020, 41(1): 176–179 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0106001>

微结构窄带滤光片设计及制备工艺研究

Design and fabrication of microstructure narrowband filter

应用光学. 2017, 38(1): 78–82 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0105001>

基于超表面材料的光波相位精密操控新技术

Accurate controlling of optical phase based on metasurfaces

应用光学. 2017, 38(2): 153–158 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0201001>

基于阵列波导光栅的边缘滤波温度解调系统

Edge filter temperature demodulation system based on arrayed waveguide grating

应用光学. 2021, 42(5): 898–905 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0503004>

超表面图像显示技术研究

Study on metasurfaces image display technology

应用光学. 2019, 40(6): 1045–1049 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0602001>

弯曲光纤布拉格光栅靶式流量传感器的研究

Study on bending fiber Bragg grating target flow sensor

应用光学. 2017, 38(2): 336–340 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0208002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 01-0184-08

基于超表面的多通道窄带滤光片研究

王敏^{1,2}, 孙硕¹, 李晟¹, 吴佳¹, 王康¹

(1. 南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044; 2. 安徽建筑大学 电子与信息工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 针对传统多通道窄带滤光片存在尺寸大、通道选择性差的问题, 该文设计了由分布式布拉格反射镜 (DBR) 和超表面微纳阵列组成的多通道窄带滤光片。利用传输矩阵法分析单侧 DBR 介质周期以及缺陷层折射率对透射光谱的影响, 并优化了窄带滤光片结构。通过 Comsol Multiphysics 软件搭建窄带滤光片单元结构进行模拟仿真, 研究了超表面以及入射角对窄带滤光片滤波特性的影响。仿真结果表明: 通过调节超表面边长能够调控窄带滤光片的中心波长, 在 634 nm~714 nm 的红光波段均可以获得一个带宽窄、透射率高的透射峰; 每一个通道的中心波长都可以通过调节超表面边长来调控, 从而实现多个光谱通道的窄带滤光; 入射光线小角度范围 ($0^\circ\sim 10^\circ$) 内的变化对滤波性能的影响甚微。该结果为多通道窄带滤光片的设计提供了一条新的思路。

关键词: 多通道窄带滤光片; 分布式布拉格反射镜; 超表面; 缺陷模; 入射角

中图分类号: TN202; O484.1

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0105002

Research on multi-channel narrow-band filter based on metasurface

WANG Min^{1,2}, SUN Shuo¹, LI Sheng¹, WU Jia¹, WANG Kang¹

(1. Electronics and Information Engineering College, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Electronics and Information Engineering College, Anhui Jianzhu University, Anhui 230601, China)

Abstract: Aiming at the problems of large size and poor channel selectivity of traditional multi-channel narrow-band filters, a multi-channel narrow-band filter composed of distributed Bragg reflector (DBR) and metasurface micro-nano array was designed. The effects of the period of one sided DBR medium and the refractive index of the defect layer on the transmission spectrum were analyzed by using the transfer matrix method, and the structure of the narrow-band filter was optimized. The unit structure of the narrow-band filter was built by Comsol Multiphysics software for simulation, and the influence of the metasurface and the incident angle on the filtering characteristics of the narrow-band filter was studied. The simulation results show that the central wavelength of the narrow-band filter can be tuned by adjusting the edge length of the metasurface, and a transmission band with narrow bandwidth and high transmittance can be obtained in the red light band from 634 nm to 714 nm. The central wavelength of each channel can be adjusted. By adjusting the side length of the metasurface, the narrow-band filtering of multiple spectral channels can be achieved. The changes in the small angle range ($0^\circ\sim 10^\circ$) of the incident light have little effect on the filtering performance. The results provide a new idea for the design of multi-channel narrow-band filters.

Key words: multi-channel narrow-band filter; distributed Bragg reflector; metasurface; defect mode; incident angle

收稿日期: 2023-03-23; 修回日期: 2023-06-25

基金项目: 国家自然科学基金 (41775165, 41775039); 南京信息工程大学引进人才科研启动专项经费资助 (2021r034)

作者简介: 王敏 (1983—), 女, 博士, 教授, 主要从事信号与信息处理、光学薄膜等研究。E-mail: yu0801@163.com

通信作者: 孙硕 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学薄膜研究。E-mail: 1159143907@qq.com

引言

窄带滤光片能选择性透过目标波段的电磁波,反射或吸收非通带电磁波,在光学仪器、光谱测试、光学传感等方面具有非常广泛的应用^[1-3]。随着科学技术的进步,人们对于滤光片的便携性与高精度的需求越来越大,滤光片正朝着小型化、集成化、多通道方向发展^[4]。传统的多通道窄带滤光片模型主要基于法布里—珀罗腔(F-P)结构,通过改变间隔层的厚度调整滤光片中心波长的位置^[5]。其制备方法为掩膜分离法,该方法在沉积薄膜之前,在基片上制作出可分离掩膜,用可分离掩膜限定薄膜沉积区域,实现多个光谱通道的滤光^[6]。但是,在这种模型结构中,随着光谱通道数量的增加,掩膜套刻的次数也在增加,滤光片的体积也随之增大,不利于光学系统的微型集成化发展。

过去几年里,研究者对多个光谱通道的结构化滤光片做了大量研究。贺芝宇等人利用含缺陷一维光子晶体的带隙特性,设计了一种由金属和介质组成的反射式多通道滤光片,通道的个数由缺陷层的周期数决定,通道的位置利用等效相位厚度的方法确立^[7]。但是这种方法并不能设定任意通道位置,且通道数越多缺陷层厚度越大,并不利于仪器的小型化发展。上海科技大学方朝龙等人,采用交替 Ta_2O_5 、 SiO_2 薄膜和流体缺陷层设计了可调谐布拉格滤波器,其模型结构为 $(\text{BA})^N\text{BDB}(\text{AB})^N$,通过给缺陷层注射不同折射率的液体,从而达到改变窄带滤光片中心波长大小的目的^[8]。实验中缺陷层折射率从 1.33 变化到 1.51 时,中心波长向长波方向线性移动了 34.8 nm,但是这种方法对中心波长的调控范围有限。随着高精度纳米压印技术的发展,一种可以特定调制需要的人工“电磁超材料”随之诞生,这种超材料称之为“超表面”^[9-11]。超表面是一种微纳平面光学元件,与传统的光学器件有很大不同,通过表面精细的微纳结构,每个微纳结构都可以作为一个单独的调控单元,可以对电磁波响应特性进行精准调控^[12]。此外,超表面还具有体积小、加工简单、损耗小的优点^[13]。超表面的诞生为光学仪器的小型化和集成化提供了新思路。

为了获得滤波品质优良、中心波长可调谐、器件尺寸小的多通道窄带滤光片,本文提出基于法布里—珀罗腔(F-P腔)结构的超表面多通道窄带滤光片。不同于其他滤光片结构需要通过改变缺陷层厚度来调控中心波长,本方法通过在两个分布

式布拉格反射镜(DBR)中引入超表面阵列,利用不同占空比排列的超表面阵列所对应的等效折射率差异来控制滤光片的中心波长。超表面多通道窄带滤光片能有效满足集成化、轻小型化的需求,极大地缩小了系统体积,具有良好的滤波性能。

1 模型设计

利用超表面对电磁波响应的操控能力,可以设计高透射、中心波长可调谐的多通道窄带滤光片,其结构可表示为 $\text{S}(\text{L}/\text{H})^N\text{A}(\text{L}/\text{H})^N\text{G}$ 。其中 S 为入射介质, G 为基底介质,在这里都表示为空气; H 代表高折射率材料, L 代表低折射率材料; A 代表缺陷层和超表面阵列; N 表示单侧 DBR 介质周期。多通道窄带滤光片结构模型如图 1 所示。图 1(b)是单通道结构模型图,该结构分为两个部分,即波导层和缺陷层。波导层为上下两层 DBR,使用富硅氮化硅(Silicon-Rich Nitride, SRN)和二氧化硅(SiO_2)分别作为 DBR 中的高低折射率材料。SRN 是氮

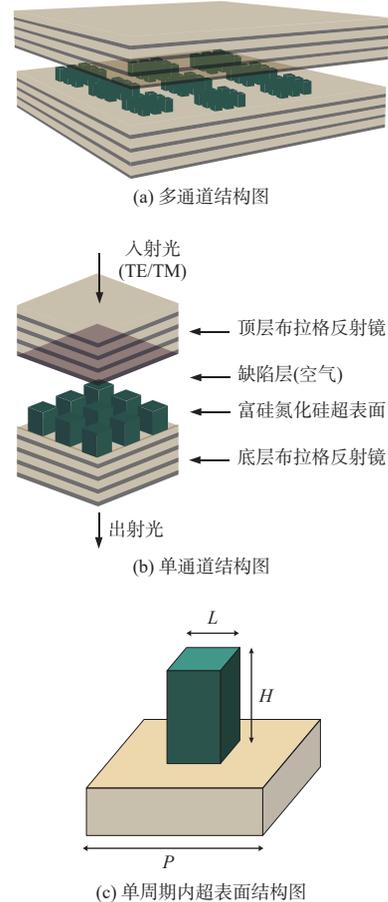


图 1 多通道窄带滤光片结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of multi-channel narrow-band filter

化硅材料的一种,通过调节氮化硅制作过程中的生长工艺参数可以对氮化硅的折射率进行调控,形成比普通氮化硅折射率要高的SRN薄膜,SRN折射率的可控范围一般在1.9~3.2之间^[14-15]。SRN和SiO₂厚度分别为 d_h 、 d_l ,通过调整 d_h 、 d_l 可以控制DBR光子带隙的中心波长与范围,它们之间满足关系:

$$\lambda_0 = 4n_h d_h = 4n_l d_l \quad (1)$$

$$\Delta\omega = \frac{4\lambda_0}{\pi} \arcsin\left(\frac{n_h - n_l}{n_h + n_l}\right) \quad (2)$$

式中: λ_0 是DBR禁带的中心波长; $\Delta\omega$ 是DBR禁带宽度。结构中的缺陷层为空气层和超表面层。超表面层由不同边长SRN纳米柱^[16]阵列组成,每种边长的超表面阵列对应不同通道的窄带滤光片。实验采用阵列结构可以增加超表面的个数,扩大透过光的光通量,增强滤光片的滤波效果。图1(c)是单周期内超表面结构图。当超表面周期 P 小于入射波长时,介质超表面相当于一个等效均匀介质,根据等效折射率理论应具有一个等效的折射率,其一阶等效折射率为

$$n = \sqrt{(1-f)n_i^2 + fn_s^2} \quad (3)$$

式中: n 为超表面的等效折射率; n_i 为包覆材料折射率(本文中为空气); n_s 为超表面折射率; $f = L/P$ 表示填充因子(其中 L 代表超表面边长)。由公式(3)可知,当超表面的周期 P 固定时,等效折射率 n 只与超表面边长 L 有关,具体表现为有效折射率随着超表面边长的增大而增大,所以只需要调控超表面边长,便可以直接对超表面的等效折射率进行调控。结构中的超表面层与空气层通过联合上下DBR高反射层,可以构成一个法布里-珀罗腔(F-P腔),当电磁波入射到所设计的超表面结构时,大部分处于DBR反射谱范围内的入射电磁波将被反射,只有满足F-P腔共振条件的特定波长电磁波才能够顺利通过设计的结构。超表面窄带滤光片的共振波长可以通过Airy公式^[17]计算得到,即:

$$\lambda = \frac{2n_{\text{eff}}H}{m + [(\varphi_1 + \varphi_2)/2\pi]} \quad (4)$$

式中: n_{eff} 和 H 分别是缺陷层的有效折射率和高度; φ_1 和 φ_2 分别为上下DBR所产生的反射相移; m 表示共振级次。根据公式(3)和公式(4)可知,通过调控中间超表面层的边长 L ,可以实现有效折射率的调控,从而人为调控窄带滤光片的共振波长。因此,需要在上下DBR中设计不同边长的超表面阵列,便可以实现不同波段的窄带滤光。

本文采用传输矩阵法^[18]分析单侧DBR介质周期和缺陷层折射率对透射光谱的影响,并在Comsol Multiphysics中搭建窄带滤光片单元结构,研究超表面边长以及入射角对窄带滤光片滤波特性的影响。

传输矩阵法将麦克斯韦方程组进行离散化,用矩阵表示相邻介质材料间的电磁场关系,若用 M_j 表示光在第 j 层介质中的传输矩阵,则其传输矩阵为

$$M_j = \begin{pmatrix} \cos\delta_j & -\frac{i}{\eta_j} \sin\delta_j \\ -\frac{i}{\eta_j} \sin\delta_j & \cos\delta_j \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中, δ_j 表示相位厚度,可以表示为

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \cos\theta_j \quad (6)$$

式中, η_j 表示第 j 层介质的光学导纳,当TE波入射时可表示为

$$\eta_j = \sqrt{\varepsilon_j/\mu_j} \cos\theta_j \quad (7)$$

当TM波入射时可表示为

$$\eta_j = \sqrt{\mu_j/\varepsilon_j} \cos\theta_j \quad (8)$$

若单侧DBR周期为 N^* ,则本结构的总层数为 $N = (2N^* + 1)$ 。光在 N 层介质中的传输矩阵为

$$M = \prod_{j=1}^N M_j = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \quad (9)$$

入射电磁场和出射电磁场关系为

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ H_1 \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} E_{N+1} \\ H_{N+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{N+1} \\ H_{N+1} \end{pmatrix} \quad (10)$$

反射系数 r 为

$$r = \frac{E_{r1}}{E_{i1}} = \frac{(A + Bn_{N+1})\eta_0 - (C + Dn_{N+1})}{(A + Bn_{N+1})\eta_0 + (C + Dn_{N+1})} \quad (11)$$

透射系数 t 为

$$t = \frac{E_{tN+1}}{E_{i1}} = \frac{2\eta_0}{(A + Bn_{N+1})\eta_0 + (C + Dn_{N+1})} \quad (12)$$

反射率 R 和透射率 T 为

$$R = rr^* \quad (13)$$

$$T = tt^* \quad (14)$$

2 仿真结果和分析

2.1 单侧DBR介质周期以及缺陷层折射率对透射谱的影响

根据推导的传输矩阵模型,分析不含超表面阵列的窄带滤光片的透射光谱,并研究单侧DBR介质周期 M 以及缺陷层折射率对透射光谱的影响。

在入射角为 0° , 光线垂直入射条件下, 高折射率介质 SRN(折射率 $n_h=2.9$) 和低折射率介质 SiO_2 (折射率 $n_l=1.47$) 的厚度分别为 $d_h=60.3$ nm, $d_l=119$ nm, 缺陷层空气(折射率 $n_{\text{Air}}=1$) 的厚度为 $d_{\text{Air}}=100$ nm, 当单侧 DBR 周期 M 的值为 2, 3, 4, 5 时, 利用传输矩阵法计算所得的透射光谱如图 2 所示, 透射谱数据如表 1 所示。

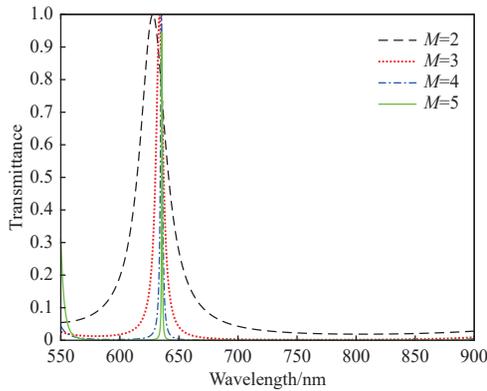


图 2 单侧 DBR 介质周期对透射谱的影响

Fig. 2 Influence of period of unilateral DBR medium on transmission spectrum

表 1 单侧 DBR 介质周期对滤光片性能参数的影响

Table 1 Influence of period of unilateral DBR medium on filter performance parameters

M	中心波长/nm	通带宽度/nm	透射率/%
2	628	26.8	78.4
3	633	6.8	78.1
4	635	1.8	78.7
5	635	0.5	78.4

由图 2 和表 1 可知, 单侧 DBR 介质周期 M 对窄带滤光片中心波长的大小并没有显著的影响, 在 633 nm 左右波段均会产生一个带宽窄、透射率高的透射峰。另外, 随着介质周期 M 的增大, 窄带滤光片通带宽度 (FWHM) 逐渐减小, 通带宽度从 26.8 nm 减小至 0.5 nm, 且通带平均透射率基本保持不变, 都在 78% 左右, 阻带的透射率减小, 阻带波段的抑制力增加。通带带宽减小是因为随着缺陷层两侧介质周期的增加, 缺陷对周期性介质的破坏作用减弱, 使得光子局域作用增强, 进而导致通带带宽减小。当 $M=3$ 时, 窄带滤光片在通带波段可以实现高透射, 在阻带波段可以实现高抑制, 且通带宽度更适合实际应用的需要, 因此, 实验选用单侧 DBR 周期为 3 的结构体。

固定单边介质周期 $M=3$, 其他参数与前文一

致, 仿真分析缺陷层折射率对透射光谱的影响。当缺陷层折射率 n_c 从 1 增大至 2.5 时, 利用传输矩阵法计算所得的透射光谱如图 3 所示, 透射谱数据如表 2 所示。

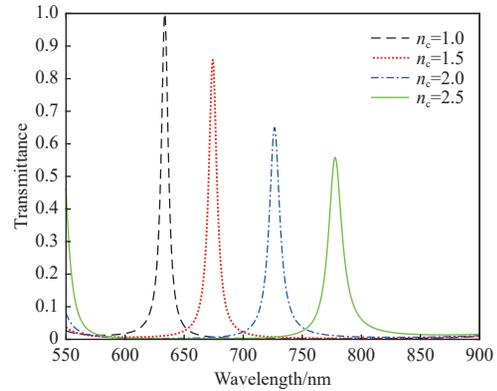


图 3 缺陷层折射率对透射谱的影响

Fig. 3 Influence of refractive index of defect layer on transmission spectrum

表 2 缺陷层折射率对滤光片性能参数的影响

Table 2 Influence of refractive index of defect layer on filter performance parameters

n_c	中心波长/nm	通带宽度/nm	透射率/%
1.0	633	6.8	78.1
1.5	674	8.2	67.4
2.0	726	10.6	51.1
2.5	778	16.6	42.6

由图 3 及表 2 中的数据可以看出, 随着缺陷层折射率的增大, 滤光片的透射峰出现了明显的红移现象, 中心波长从 633 nm 红移至 778 nm。根据公式(4)可知, 缺陷层折射率越大, 中心波长越大, 因此通过调控缺陷层的折射率, 可以实现中心波长的有效调节。此外, 还可以发现, 随着缺陷层折射率的增大, 透射峰的通带宽度增加, 通带内的平均透射率明显下降。为了使滤光片的滤波效果好, 通带内透射率高, 实验选择折射率低的空气作为缺陷层材料。

2.2 超表面边长对透射谱的影响

本次设计的超表面多通道窄带滤光片是周期性结构, 因此, 只需要对其最小结构单元进行仿真。在 Comsol Multiphysics 软件中搭建窄带滤光片单元结构, 并对其滤波特性进行分析。窄带滤光片几何结构如图 4 所示。图 4 中从下往上依次为基底/DBR/缺陷层(含空气层和单周期超表面结构)/DBR/入射介质, 入射介质和基底介质都设定

为空气,超表面周期 $P=200\text{ nm}$,超表面边长 $L=20\text{ nm}$,高度 $H=50\text{ nm}$,其他参数与前文一致。在 x 、 y 方向设置周期性边界条件,在空气层的上表面设置电磁波入射端口,在基底下方设置透射端口,沿 y 轴方向的电磁波从入射端口输入,从基底下方透射。图5是仿真计算得到的窄带滤光片中心波长的光场分布。从图5可以看出,缺陷层和超表面处的光强明显高于入射口处的光强,这是因为当外来的入射电磁频率与该本征模式(由超表面和空气层所构成的谐振腔决定)频率相吻合时,就会产生谐振,增强自身的光强。当超表面边长 $L=20\text{ nm}$,光线正入射时,窄带滤光片的透射光谱如图6所示。从图6可以看出,在波长为 634 nm 处有一条通带宽度 7.2 nm 的透射峰,透射峰峰值透射率高达 99% ,通带内的平均透射率为 78.1% ,滤波效果比较理想。

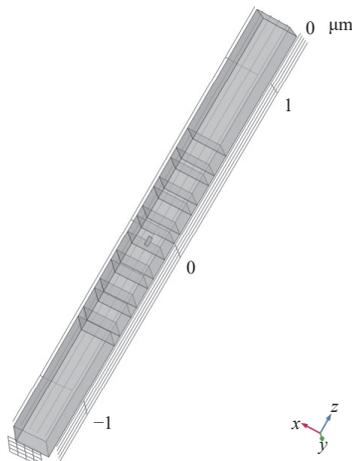


图4 窄带滤光片单元结构

Fig. 4 Unit structure of narrow-band filter

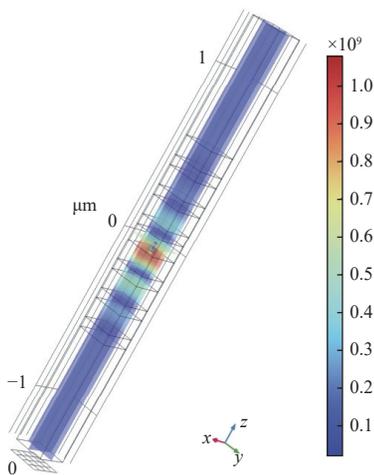


图5 窄带滤光片中心波长的光场分布

Fig. 5 Optical field distribution of central wavelength of narrow-band filter

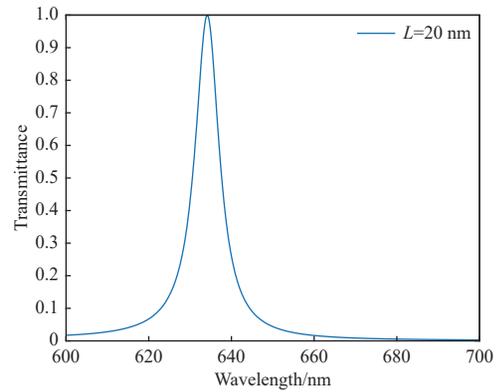


图6 窄带滤光片透射光谱

Fig. 6 Transmission spectrum of narrow-band filter

为了探究超表面边长对窄带滤光片透射谱的影响,仿真分析当超表面边长变化时,窄带滤光片透射谱的变化情况。固定其他参数不变,改变超表面 L 的大小,当 L 为 20 nm 、 65 nm 、 85 nm 、 100 nm 时透射谱如图7所示,透射谱数据如表3所示。

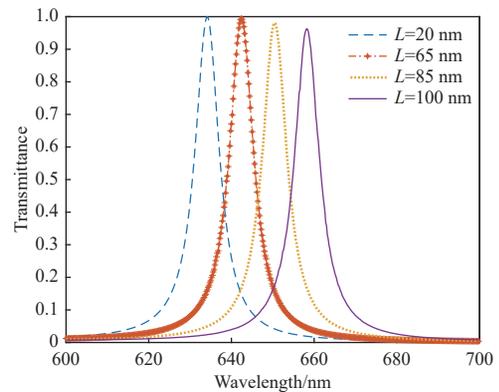


图7 L 为 20 nm 、 65 nm 、 85 nm 、 100 nm 时窄带滤光片透射光谱

Fig. 7 Transmission spectrum of narrow-band filter when L is 20 nm , 65 nm , 85 nm and 100 nm

表3 L 为 20 nm 、 65 nm 、 85 nm 、 100 nm 时窄带滤光片性能参数

Table 3 Performance parameters of narrow-band filter when L is 20 nm , 65 nm , 85 nm and 100 nm

L/nm	中心波长/ nm	通带宽度/ nm	透射率/%
20	634	7.2	78.0
65	642	7.2	78.3
85	650	7.2	76.8
100	658	7.2	75.8

由图7和表3可知,随着超表面边长 L 的增加,透射峰红移,由 634 nm 处移动至 658 nm 处,整体移动了 24 nm 。透射峰的红移是因为超表面边长的增大,导致了等效折射率的增大,根据公式

(4)可知,等效折射率越大,中心波长越大,所以产生红移现象。此外,超表面边长的增加会降低通带内的平均透射率和透射峰峰值,但始终保持高透射率。同时也可以发现,超表面边长变化时,并没有影响通带的宽度,通带宽度始终保持在7.2 nm。

为了进一步研究超表面边长对窄带滤光片中心波长的调谐范围与滤波效果的影响,本文研究了当 L 从20 nm增加至160 nm时,中心波长、峰值透射率、通带宽度以及通带内平均透射率的变化。仿真结果如图8所示。从图8可以看出,随着超表面边长的增加,中心波长也在逐渐增大,从634 nm增大至714 nm。此外,超表面对通带带宽的影响较小,峰值透射率和通带内平均透射率随着超表面边长 L 的增加都有所降低,但峰值透射率始终在80%以上,通带内平均透射率始终在64%以上。仿真结果表明,通过改变超表面边长可以调谐窄带滤光片的中心波长,进而实现多通道滤光,且滤光效果比较理想。

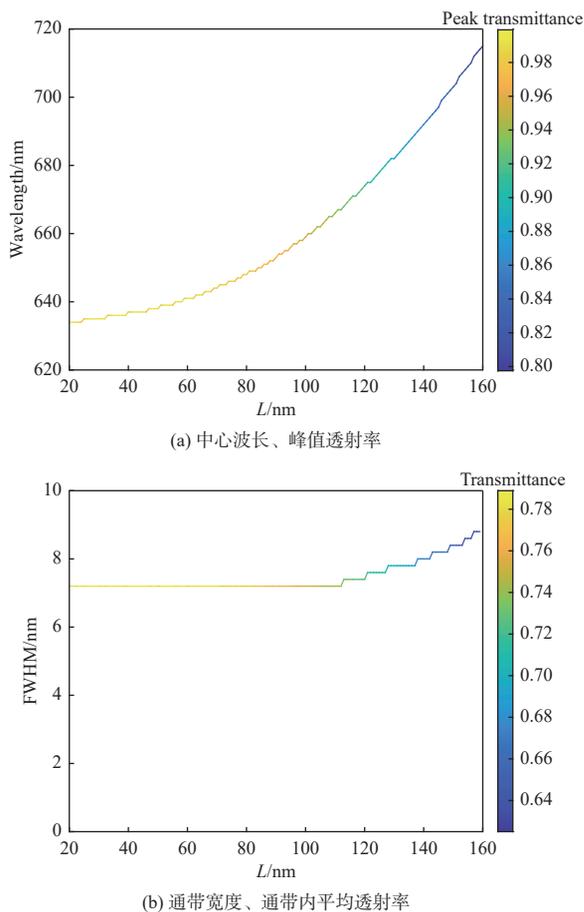


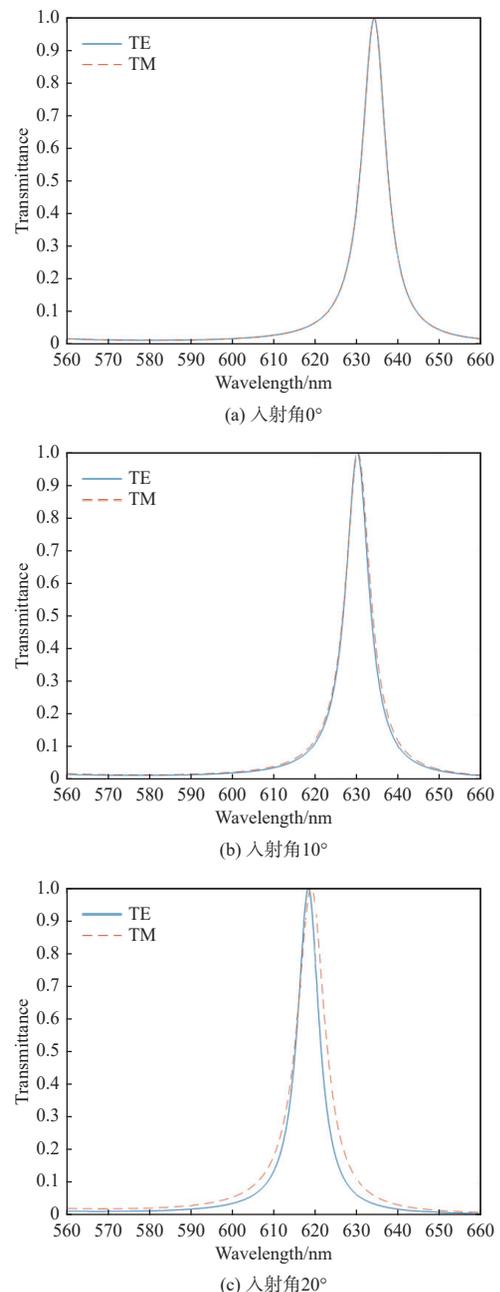
图8 超表面边长对透射谱的影响

Fig. 8 Effect of metasurface edge length on transmission spectrum

2.3 入射角对透射谱的影响

以上讨论均是针对光线正入射的情况,下面对不同偏振光下斜入射的情况进行分析。固定其他参数不变,超表面边长 $L=20$ nm,当入射角分别为 0° 、 10° 、 20° 、 30° 时,TE和TM偏振态下窄带滤光片的透射光谱如图9所示,其通带数据统计如表4所示。本文同时分析了入射角从 0° 变化到 30° 时,窄带滤光片中心波长以及峰值透射率的变化情况,如图10所示。

从图9和图10可以看出,在TE和TM偏振态下,随着入射角的增加,窄带滤光片的整体透



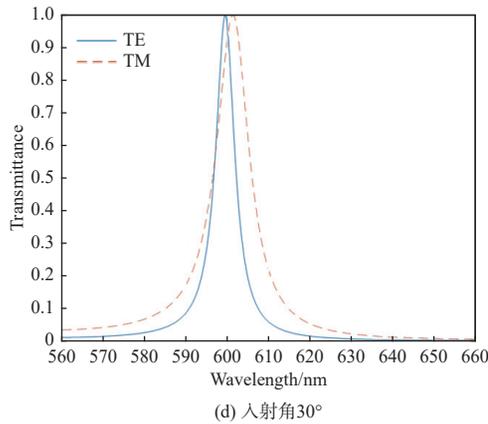


图9 入射角为0°、10°、20°、30°时窄带滤光片透射光谱

Fig.9 Transmission spectra of narrow-band filters when incident angle is 0°, 10°, 20°, and 30°

表4 TE、TM偏振下,入射角分别为0°、10°、20°、30°时窄带滤光片性能参数

Table 4 Performance parameters of narrow-band filter when incident angle is 0°, 10°, 20°, and 30° under TE and TM polarization

TE	中心波长/nm	通带宽度/nm	透射率/%	TM	中心波长/nm	通带宽度/nm	透射率/%
0°	634	7.2	78.1	0°	634	7.2	78.1
10°	630	6.8	78.8	10°	630	7.4	78.1
20°	618	6.2	79.1	20°	619	8.0	78.9
30°	599	5.4	79.1	30°	601	9.6	78.5

射谱向短波方向移动,这是因为当入射角增大时,电磁波在窄带滤光片中的传播相位减小,根据布拉格条件,电磁波频率增大,波长减小,透射谱整体蓝移。从表4中的数据可以看出,当入射角由0°增至30°时,对于TE模式,中心波长由634 nm减小至599 nm,移动了35 nm,通带内平均透射率基本不变,通带带宽由7.2 nm减小至5.4 nm;对于TM模式,中心波长由634 nm减小至601 nm,移动了33 nm,通带内平均透射率基本不变,通带带宽由7.2 nm增加至9.6 nm。当入射角增大至30°时,无论是TE偏振还是TM偏振,中心波长都有较大的偏移程度,但是当入射角小于10°时,窄带滤光片中心波长的偏移程度、通带宽度、通带内平均透射率均没有明显的变化,仍可以达到理想的滤波效果。仿真实验结果表明,该结构对光线小角度(<10°)入射不敏感,具有较好的角度稳定性。

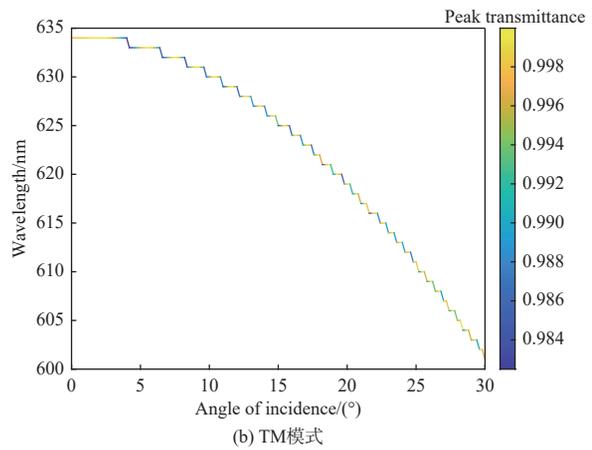
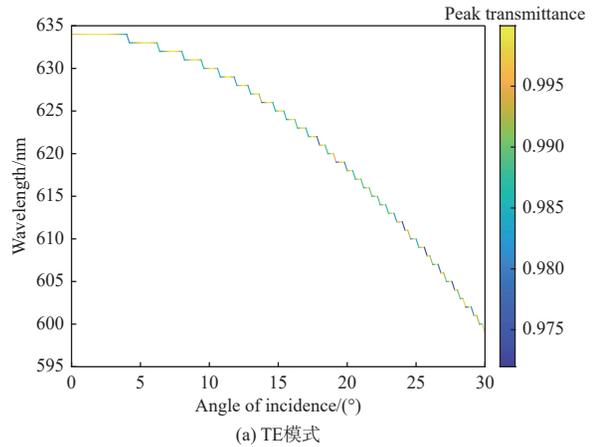


图10 入射角从0°变化至30°时,中心波长以及峰值透射率的变化

Fig.10 Change of central wavelength and peak transmittance when incident angle changing from 0° to 30°

3 结论

本文基于超表面对电磁波响应的调控能力,设计了在634 nm~714 nm波段透射率高、中心波长可调谐、角度稳定性好的多通道窄带滤光片结构。基于超表面的多通道窄带滤光片只需要使用同一种DBR以及缺陷层介质,通过将不同占空比排列的透射超表面阵列整合到缺陷层中,便可以调节谐振波长,实现多通道滤光。本文设计的超表面多通道窄带滤光片系统体积小、滤光性能好,在光学系统中具有非常好的应用潜能。

参考文献:

[1] HOU H G, HUSSAIN S, SHAO H C, et al. Experimental insights on factors influencing sensitivity of thin film narrow band-pass filters[J]. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 2019, 14(11): 1548-1554.

- [2] ANUSHA N P, SHARAN A. Design of narrow band multi-channel optical filters using zero index medium[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2018, 32(15): 185-188.
- [3] 刘永强, 金柯, 王慧娜, 等. 基于双层金属光栅的中波红外多通道滤光片结构[J]. *应用光学*, 2020, 41(1): 176-179.
LIU Yongqiang, JIN Ke, WANG Huina, et al. Mid-wave infrared multi-channel filter structure based on double-layer metal grating[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(1): 176-179.
- [4] 廖乘胜, 吴正, 曾立波, 等. 基于多通道窄带滤光片和彩色图像传感器的实时多光谱成像系统[J]. *光子学报*, 2017, 46(4): 100-108.
LIAO Chengsheng, WU Zheng, ZENG Libo, et al. Real-time multispectral imaging system based on multi-channel narrow-band filter and color image sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(4): 100-108.
- [5] 朱元强. 基于F-P滤光片的三通道滤光片的设计[J]. *真空*, 2019, 56(5): 74-76.
ZHU Yuanqiang. Design of three-channel filter based on F-P filter[J]. *Vacuum*, 2019, 56(5): 74-76.
- [6] 潘永强, 陈佳. 微结构窄带滤光片设计及制备工艺研究[J]. *应用光学*, 2017, 38(1): 78-82.
PAN Yongqiang, CHEN Jia. Research on design and fabrication technology of microstructure narrow band filters[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(1): 78-82.
- [7] 贺芝宇, 焦宏飞, 程鑫彬, 等. 基于光子晶体带隙特性的反射式多通道滤光片设计[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 312-318.
HE Zhiyu, JIAO Hongfei, CHENG Xinbin, et al. Design of reflective multi-channel filter based on photonic crystal bandgap characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 312-318.
- [8] FANG C, DAI B, XU Q, et al. Optofluidic tunable linear narrow-band filter based on Bragg nanocavity[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(2): 1-8.
- [9] 黄新朝, 付全红, 张富利. 超表面研究进展[J]. *航空兵器*, 2016(1): 28-34.
HUANG Xinchao, FU Quanhong, ZHANG Fuli. Progress in metasurface research[J]. *Aero Weaponry*, 2016(1): 28-34.
- [10] YU N, CAPASSO F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(2): 139-150.
- [11] 严巍, 王纪永, 曲俞睿, 等. 基于相变材料超表面的光学调控[J]. *物理学报*, 2020, 69(15): 63-82.
YAN Wei, WANG Jiyong, QU Yurui, et al. Optical control based on metasurfaces of phase change materials[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(15): 63-82.
- [12] 范智斌, 陈泽茗, 周鑫, 等. 氮化硅光子器件与应用研究进展[J]. *中国光学*, 2021, 14(4): 998-1018.
FAN Zhibin, CHEN Zeming, ZHOU Xin, et al. Research progress in silicon nitride photonic devices and applications[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(4): 998-1018.
- [13] 张淳钰, 周锦松, 何晓英, 等. 基于超表面的多光谱成像系统设计[J]. *光谱学与光谱分析*, 2023, 43(1): 225-229.
ZHANG Chunyu, ZHOU Jinsong, HE Xiaoying, et al. Design of multispectral imaging system based on metasurface[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, 43(1): 225-229.
- [14] YE M, PENG Y, YI Y S. Silicon-rich silicon nitride thin films for subwavelength grating metalens[J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9(3): 1200-1207.
- [15] SOMAN A, ANTONY A. Tuneable and spectrally selective broadband reflector-modulated photonic crystals and its application in solar cells[J]. *Solar Energy*, 2018, 162: 525-532.
- [16] PARK C S, KOIRALA I, GAO S, et al. Structural color filters based on an all-dielectric metasurface exploiting silicon-rich silicon nitride nanodisks[J]. *Optics Express*, 2019, 27(2): 667-679.
- [17] NEUMANN N, EBERMANN M, KURTH S, et al. Tuneable infrared detector with integrated micromachined Fabry-Perot filter[J]. *Journal of Micro-Nanolithography MEMS and MOEMS*, 2008, 7(2): 021004-1-9.
- [18] 张兰, 戚子昂, 马会中. 2种不同结构的1维光子晶体窄带滤波器[J]. *光电子·激光*, 2022, 33(4): 356-363.
ZHANG Lan, QI Ziang, MA Huizhong. One-dimensional photonic crystal narrow-band filter with two different structures[J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2022, 33(4): 356-363.