

文章编号 1004-924X(2026)16-2452-08

反射型超表面彩色滤光结构

季羽昊¹, 宋 志¹, 叶 燕^{1,2,3*}

(1. 苏州大学 光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006;

2. 江苏省先进光学制造技术重点实验室 教育部现代光学技术重点实验室,
江苏 苏州 215006;

3. 苏州大学 苏州纳米科技协同创新中心, 江苏 苏州 215006)

摘要:为解决传统反射滤光技术色域窄、能量利用率低、制备效率低等瓶颈问题,开展微纳结构反射滤光的性能调控与高效制备研究。方法上,设计一维介质光栅-金属-介质(光刻胶-Ag-TiO₂)反射型超表面彩色滤光结构,采用时域有限差分法系统分析了光栅槽深、介质层厚度、占空比及光栅周期等关键参数对反射光谱的影响,并进行了结构优化。结果表明,优化结构在 280~480 nm 光栅周期内实现可见光连续变色,反射光谱半高全宽均小于 100 nm;满足导模共振时电场集中于 TiO₂ 层,能量利用率高。实验测得红绿蓝(Red-Green-Blue, RGB)三原色反射峰中心波长分别为 613 nm, 562 nm, 491 nm, 峰值反射率达 54%~57%;利用分时复用多干涉光场实现微缩九宫格像素结构制备,大幅提升微纳结构制备效率。该结构光谱选择性优异、色纯度高、兼容微纳加工,可为显示成像、红外探测、生物传感等领域提供技术支撑。

关键词:反射滤光;一维超表面;彩色滤光;微纳结构;分时复用多干涉光场

中图分类号:O436.1;TN305.7 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20263416.2452 **CSTR:**32169.14.OPE.20263416.2452

Reflective metasurface color filter structure

Ji Yuhao¹, SONG Zhi¹, YE Yan^{1,2,3*}

(1. School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China;

2. Key Laboratory of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province &
Key Laboratory of Modern Optical Technologies, Ministry of Education, Soochow University,
Suzhou 215006, China;

3. Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology, Soochow University,
Suzhou 215006, China)

* Corresponding author, E-mail: yanye@suda.edu.cn

Abstract: Traditional reflective filters had narrow color gamut, low energy utilization and low fabrication efficiency. These problems limited their applications. This work studied micro-nano structures for reflective filtering. A one-dimensional dielectric grating-metal-dielectric metasurface was designed. The materials were photoresist, Ag, and TiO₂. The finite-difference time-domain method was used. It analyzed key

收稿日期:2026-03-31;修订日期:2026-07-24.

基金项目:国家自然科学基金(No. 62075149, No. 61575132);江苏省自然科学基金(No. BK20201406);江苏高校优势学科建设工程资助项目

structural parameters. These parameters included grating groove depth, dielectric layer thickness, duty cycle and grating period. The structure was optimized based on these analyses. The results show that the structure enables continuous color tuning. The tuning covers the whole visible band. The grating period ranges from 280 nm to 480 nm. The full width at half maximum is below 100 nm. This holds for all reflection spectra. The electric field is confined in the TiO_2 layer under guided-mode resonance. This confinement leads to high energy utilization. The measured central wavelengths of the RGB peaks are obtained. They are 613 nm, 562 nm, and 491 nm. The corresponding peak reflectivities are measured. They are 55%, 57%, and 54%. These values agree well with simulations. A time-division multiplexed multi-interference optical field is used. This field generates multiple interference patterns. It fabricates a 3×3 pixel structure in one step. This method greatly improves fabrication efficiency. It avoids multiple exposures and reduces fabrication time significantly. The proposed structure shows excellent spectral selectivity and high color purity. The colors are vivid and stable. The structure is compatible with micro-nano fabrication. It can be integrated with existing processes. It can support display imaging applications, infrared detection and biosensing. These fields benefit from its high performance. The structure offers a promising solution. It addresses key challenges in traditional reflective filtering.

Key words: reflective filtering; one-dimensional metasurface; color filter; micro-nano structure; time-division multiplexed multi-Interference optical field

1 引言

反射型滤光技术作为光学工程领域的核心支撑技术,其性能决定了终端器件的光谱选择性、能量利用效率与集成兼容性,广泛应用于显示成像、红外探测、生物传感、信息防伪及光通信等多元场景^[1-4]。在可见与近红外波段,它是全彩色显示、高光谱成像的关键组件^[5-6];在中波红外波段,其窄带滤波能力为环境监测、伪装识别、化学指纹检测提供了核心保障^[7-8]。而偏振调控型反射滤光则在安全成像、目标轮廓增强等领域展现出不可替代的价值^[9-10]。

传统反射滤光技术主要依赖染料吸附、多层薄膜干涉或金属薄膜选择吸收机制。虽具备工艺成熟、成本低廉的优势,但存在诸多固有缺陷:色域覆盖范围窄、化学稳定性差、光学损耗显著,且易出现“串色”现象^[11-13]。在红外波段,传统法布里-珀罗滤光器光谱分辨率仅为百纳米量级,难以满足窄带探测需求^[14]。同时,分立式滤光结构导致器件体积大、集成度低,无法适配柔性电子、片上集成传感等新兴领域的轻薄化高集成需求^[15-16]。随着探测环境日趋复杂及器件小型化、智能化需求升级,传统技术已难以突破性能瓶颈,亟需新型光场调控技术实现革新^[17-18]。

基于亚波长微纳结构的光场调控技术凭借其灵活的光谱调控能力、高衍射效率及与微纳制造工艺的兼容性,成为反射滤光领域的核心研究方向^[19-20]。这类结构通过精确调控光栅周期、占空比、膜层厚度及材料折射率。利用导模共振、表面等离子体共振、光子晶体带隙、法诺共振或布拉格反射等效应,可实现对特定波长、偏振光的选择性反射,且具备结构色稳定、无化学褪色、可微型化集成等优势^[21-22]。

目前,已报道的微纳结构反射滤光方案呈现多元化发展。金属微纳结构方面,Wu等研究的Dimer-Aperture阵列结构则实现了76% sRGB色域的偏振选择性反射^[9];张森等提出的金光栅—波导复合结构,在中波红外波段实现5.7~101.0 nm可调带宽的窄带反射^[3]。全介质结构方面,Lin等提出的介电梯度超表面获得近衍射极限性能^[23];孙浩等设计的单层凹型全介质超表面有效有效简化多层堆叠结构的制备工艺^[24]。复合与特种结构方面,分布式布拉格反射镜在中波红外全波段反射率超90%^[25];邵亚楠等提出液态金属复合超表面,微波下可实现两类极化反射调控^[26]。

尽管现有方案已验证了技术可行性,但仍存在关键瓶颈:动态可调结构面临响应速率慢、循

环稳定性不足的问题^[25];全介质结构虽光学损耗低,但需纳米级尺寸控制,单一参数调控难以实现宽色域覆盖^[27-28];金属结构易受表面等离子体共振损耗影响,且多数存在偏振依赖性,限制了通用场景应用^[29];部分结构虽实现窄带反射,但角度敏感性显著,当入射角度超过 60° 后色纯度大幅下降^[30]。在中波红外等特殊波段,还存在材料折射率匹配难、高温环境下结构稳定性差等问题^[31]。

为解决全介质结构仅调控单一参数难以实现宽色域覆盖,本文针对微纳结构反射滤光的性能调控与能量利用率瓶颈,提出一维介质光栅-金属-介质的反射型超表面彩色滤光结构。经仿真优化确定关键参数组合,通过调控光栅周期实现可见波段连续变色,三原色呈现优异反射性能。当入射光满足导模共振条件时会在介质光栅层中接近全反射,偏离共振波长的光反射率急剧下降且电场能量集中于 TiO_2 层,能量利用率高。针对传统反射滤光技术色域窄且难以实现滤光结构高效率制备瓶颈,采用分时复用多干涉光场实现可见光波段连续变色。该光场可以制备出所设计的变参量九宫格像素图案从而实现三原色混色,极大的提高了制备效率,为大面积空间变参量结构的制备提供了基础。

2 超表面彩色滤光结构与反射光谱

设计了一种一维介质光栅-金属-介质的反射型超表面彩色滤光结构,该结构如图 1 所示。从下到上依次为石英衬底、光刻胶光栅、Ag 光栅与 TiO_2 介质层。其中 P 为光栅周期, F 为占空比, h_1

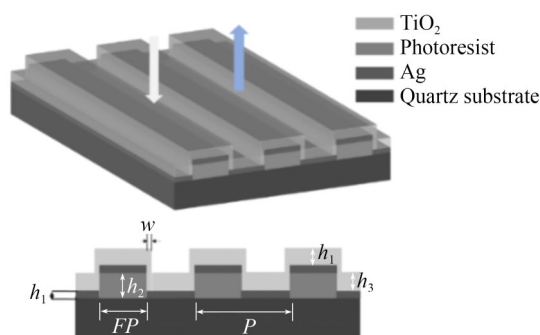


图 1 超表面滤光结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of metasurface color filter structure

为 Ag 膜厚度, h_2 为光刻胶光栅槽深, h_3 为 TiO_2 介质层厚度, w 为介质对光栅横向包裹宽度。利用时域有限差分 (Finite-Difference Time-Domain, FDTD) 算法分析横电波 (Transverse Electric, TE) 偏振光垂直入射时,光刻胶光栅槽深、镀膜厚度、占空比、以及光栅周期变化对反射光谱的影响。

固定 Ag 膜厚度 h_1 为 20 nm, TiO_2 介质层膜厚度 h_3 为 100 nm, 光栅周期 P 为 380 nm, 占空比 F 为 0.5 时。利用 FDTD 算法分析该结构在光刻胶光栅槽深 h_2 以 10 nm 为步长在 60~120 nm 之间变化时,该结构的反射光谱如图 2(a) 所示。

对图 2(a) 的分析可知,光栅槽深变化时,反射光谱中心波长几乎不发生变化,反射率最大值可以达到 90% 以上。但光栅槽深变化影响次反射峰,随着光栅槽深变大,红光区域的次反射峰峰值减小而蓝光区域的次反射峰峰值增大。与此同时,反射光谱的半高全宽 (Full Width at Half Maximum, FWHM) 随着光栅槽深变大而变大但始终小于 100 nm。因此,当 $h_2=80$ nm 时该彩色滤光结构具有良好的带通滤波特性。

其他参数不变,介质层膜厚度 h_3 以 10 nm 为步长在 70~130 nm 之间变化时,该结构的反射光谱如图 2(b) 所示。

对图 2(b) 的分析可知,随着介质层膜厚度增加,中心波长发生显著红移,且红光区域的次反射峰峰值逐渐变大,伴随着蓝光区域的次反射峰峰值逐渐变小。反射光谱的 FWHM 随着介质层厚度增加而变大但始终小于 100 nm。因此,当 $h_3=100$ nm 时该彩色滤光结构具有良好的带通滤波特性。

其他参数不变,占空比 F 以 0.1 为步长在 0.3 至 0.7 之间变化时,该结构的反射光谱如图 2(c) 所示。

对图 2(c) 的分析可知,在占空比变化过程中反射光谱的中心波长几乎保持不变且反射峰峰值均高于 80%。当占空比大于 0.5 时蓝光区域出现次反射峰,其峰值随着占空比的增加而增加,当占空比小于 0.5 时红光区域出现次反射峰,其峰值随着占空比的减小而增加。当占空比偏离 0.5 时反射光谱的 FWHM 逐渐变小但是变化不明显。因此,当 $F=0.5$ 时该彩色滤光结构具

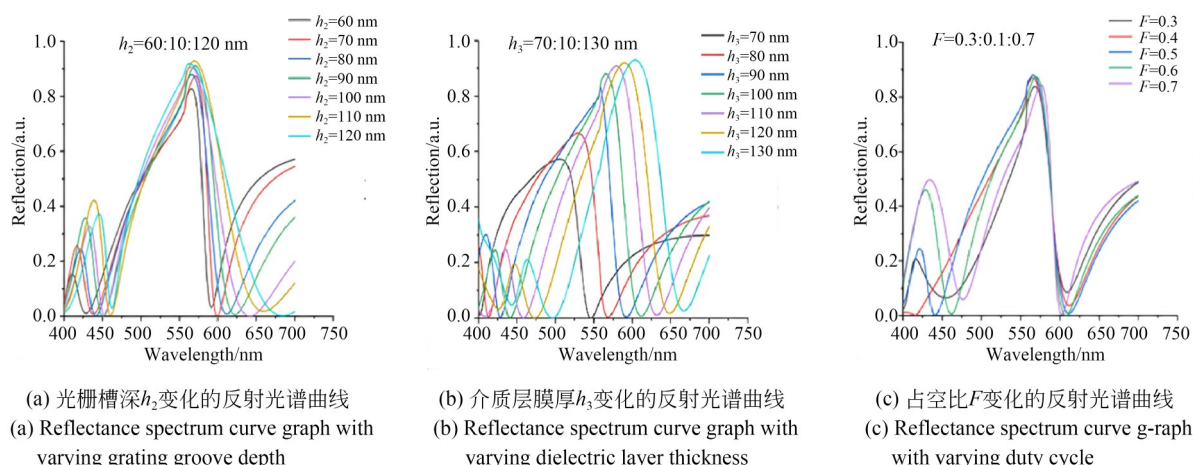


图 2 不同结构参数变化对反射光谱的影响

Fig. 2 Effect of parameter variations on reflectance spectrum

有良好的带通滤波特性。

综上,该反射型超表面彩色滤光微纳结构优化参数如下:Ag膜厚度 h_1 为20 nm,光栅槽深 h_2 为80 nm,介质层膜厚度 h_3 为100 nm,占空比 F 为0.5。该结构即为符合理论模拟的最优超表面彩色滤光结构。

以上述优化结构为基础,其他参数不变,当光栅周期 P 以20 nm为步长在260~480 nm之间变化时,该结构的反射光谱如图3(a)所示。随着光栅周期增大,反射光谱中心波长显著红移,反射光谱的FWHM逐渐展宽,蓝、绿光区域反射峰峰值最高,红光区域略低。具体数值为蓝光和绿光区域的反射峰峰值高达90%,红光区域的反射峰峰值约为65%,所有反射光谱的FWHM均小于100 nm。当光栅周期超过350 nm时蓝光区域

出现次反射峰,其峰值反射率随着周期的增加而增加。图3(b)展示了光栅周期变化对应的RGB反射光谱在1931CIE色度图中的颜色坐标,进一步验证了该结构在滤光方面的优异性能。1931CIE色度图显示,颜色随光栅周期增大从蓝色连续过渡至红色,但没有覆盖整个可见光波段。因此可通过三原色结合加法混色原理,实现全色反射输出。

当光栅周期 P 分别设置为280 nm,380 nm和480 nm时,所对应结构的反射光谱中心波长分别为475 nm,570 nm和630 nm。根据图3(c)所示,设计的一维超表面彩色滤光微纳结构表现出良好的三原色反射特性。蓝光和绿光的反射峰峰值高达90%,红光反射峰峰值超过60%且三原色的反射光谱的FWHM均小于100 nm,展现出

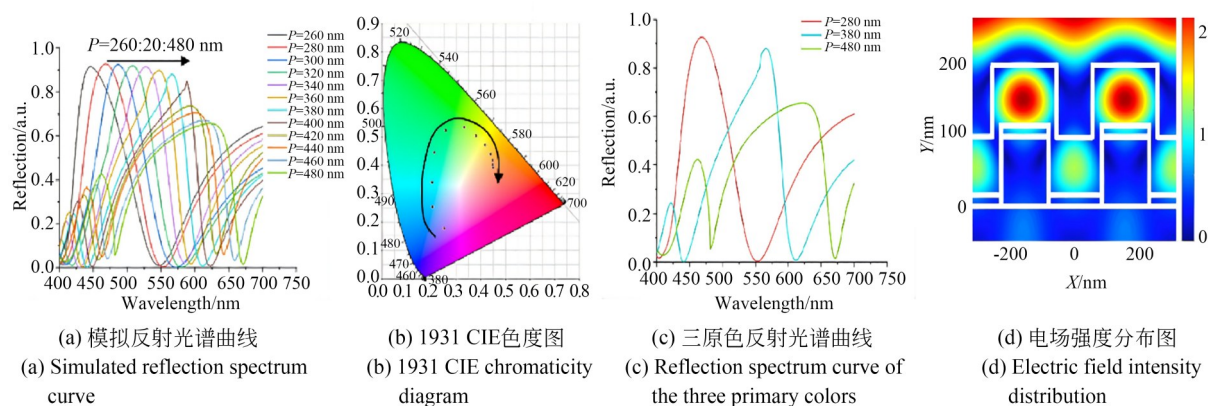


图 3 不同光栅周期变化对反射光谱的影响

Fig. 3 Effect of grating period variation on the reflection spectrum

良好的三原色反射光谱特性。在此基础上,进一步分析光栅周期为 380 nm、中心波长为 570 nm 的结构在两个周期内的场强分布,结果如图 3(d) 所示。分析表明,570 nm TE 偏振光入射时,电场能量集中于光栅上方介质层与光栅间介质层。周期性介质光栅层可看作为平面波导层激发出导模共振,当入射光满足导模共振条件时会在介质光栅层中接近全反射,偏离共振波长的光反射率急剧下降,验证了此超表面彩色滤光结构具有优异的能量利用率性能。

3 彩色滤光样品制备与分析

根据上述优化结构,实验制备了该反射型超表面彩色滤光结构。首先将光致抗蚀剂(AZ 系列)按比例旋涂在清洗烘干后的石英玻璃表面上以形成均匀光刻胶层(约 140 nm),然后采用双光束干涉光刻技术制备一维纳米光栅结构,光刻胶在氢氧化钠溶液(温度 20 ℃,质量分数 0.6%)中显影 6s,得到一维光刻胶光栅。

镀 Ag 膜和介质膜是通过高密度电子流光束融化熔料(银/二氧化钛)并气化,在真空环境下充满整个真空腔。通过伞顶在基片沉积,真空腔压强稳定,沉积速率恒定,可通过调控时间控制沉积厚度,最终在基片上形成 20 nm 金属银层和 100 nm 二氧化钛介质层。以 380 nm 周期的一维光栅结构为例,其干涉光刻形成的图案及相应的微纳结构形貌图通过电子扫描显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)进行表征,结果如图 4 所示。

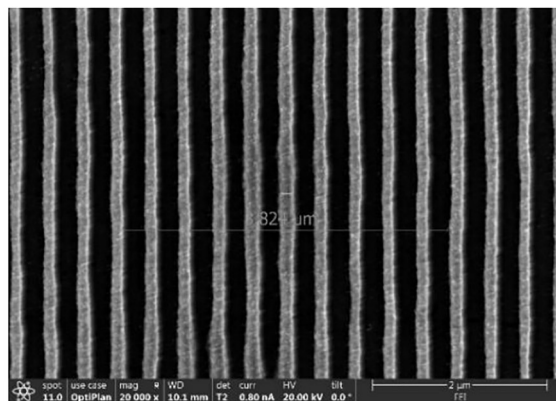


图 4 样品 SEM 形貌图

Fig. 4 SEM morphology of the sample

图 4 展示了周期为 380 nm 的光栅样品的电子扫描显微镜测量结果,实测 10 个光栅周期的总长度为 3.824 μm ,栅高为 63 nm。该样品具有良好的栅线形状,与理论设计的结构相符。

制备了周期范围 260 ~ 480 nm、步长为 20 nm 的彩带条样品,每个周期对应的样品尺寸为 5 $\times$ 10 mm²。采用暗场显微技术对彩色滤光结构样品的反射光谱进行测量。扫描波长范围为 400 ~ 700 nm,所制备的彩带条反射样品和测量光谱曲线如图 5(a)和图 5(b)所示。

将图 5(b)实际样品反射光谱与图 3(a)模拟反射光谱进行对比,模拟与实验测得的各反射光谱峰值中心波长位置随着周期的增大而产生红移,中心波长的大小也基本吻合,实际样品的反射光谱峰值略低于模拟反射值,且反射光谱的 FWHM 也比模拟反射光谱较宽。通过改变周期,其颜色变化不能覆盖整个可见光范围,因此

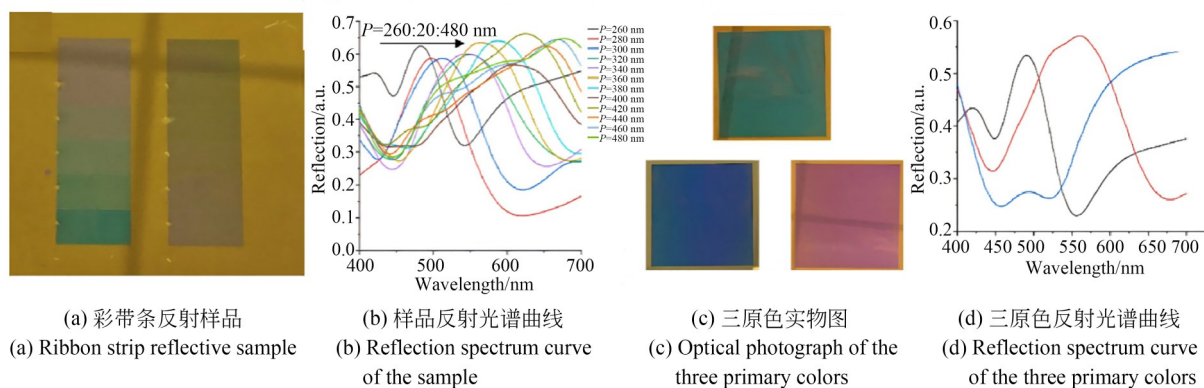


图 5 彩色滤光样品制备的实验结果图

Fig. 5 Experimental results of color filter sample fabrication

通过三原色加法混合的方案实现全色反射输出。

又根据模拟仿真结果,分别选取 480 nm, 380 nm 和 280 nm 作为 RGB 三原色对应的光刻胶光栅周期。在 TE 偏振光入射条件下,实测得到红绿蓝三原色样品的 $20 \times 20 \text{ mm}^2$ 幅面的实物图及其反射光谱如图 5(c) 和图 5(d) 所示。三种样品的反射光谱中心波长分别为 613 nm, 562 nm 和 491 nm, 对应的反射峰峰值分别为 55%, 57% 和 54%。实验结果表明,所制备的一维介质光栅-金属-介质的反射型超表面彩色滤光结构表现出良好的滤光性能。

针对反射滤光的颜色不能全覆盖可见光波段瓶颈,实验采用三原色混色原理,通过设计九宫格像素结构可以精准混合三原色从而制备出所需要的可见光颜色。通过分时复用多干涉光场同时制备光栅结构的 RGB 像素从而混合三原色获得了浅黄色。多干涉光场调控制备的像素光栅图案结构与设计图案结构形状、位置分布一致,对应的双光束干涉图案重合情况良好。由此,通过分时复用多干涉光场,可以实现所设计的变参量九宫格像素图案制备。

图 6 为制备的幅面为 $3 \times 3 \text{ cm}^2$ 苹果像素化图案,设计的区域 1 的光栅周期为 380 nm,区域 2 的光栅周期为 480 nm,区域 4 的光栅周期为 280 nm,区域 3 为浅黄色九宫格光栅结构。从图中可以看出区域 1、区域 2 和区域 4 与图 5(c) 颜色基本对应,区域 3 颜色与设计的浅黄色基本吻合(彩图见期刊电子版)。

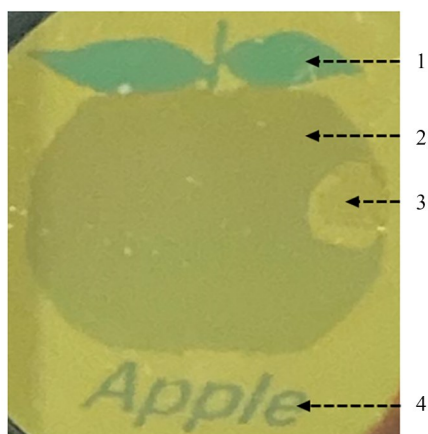


图 6 苹果的像素化图案

Fig. 6 Apple's pixelated pattern

4 结 论

本文设计了一维介质光栅-金属-介质的反射型超表面彩色滤光结构,通过 FDTD 模拟仿真分析了光刻胶光栅槽深、介质层膜厚度、占空比以及光栅周期变化对反射光谱的影响。在结构参数优化过程中发现结构中的能量主要集中于二氧化钛介质层内。基于优化后的结构参数,制备了步长为 20 nm 且单个周期样品幅面为 $5 \times 10 \text{ mm}^2$ 的滤光彩带条样品以及幅面为 $20 \times 20 \text{ mm}^2$ 的 RGB 反射样品。测试结果显示,在 TE 偏振光垂直入射条件下,反射光谱随光栅周期变化呈现明显的波长偏移特性——增大光栅周期可使反射光谱红移,减小光栅周期则会导致反射光谱蓝移。所制备样品的红绿蓝三原色样品均展现出优异的反射输出性能,光谱的峰值反射率均超过 50%,证实该超表面结构具备良好的彩色滤光功能,在彩色显示成像等相关领域具有潜在应用价值。通过分时复用多干涉光场,实现了设计的九宫格像素图案纳米结构制备,极大的提高了制备效率,为大面积空间变参量结构的制备提供了基础。

针对如何进一步提升反射率峰值,可以通过降低 Ag 膜厚度,并将占空比作为变量实现参量联动优化;可以通过进一步优化分时复用多干涉光场光路系统等方式优化光栅形貌,提高结构的反射率峰值从而提高光能利用率。

针对材料吸收对于体系整体性能的影响,材料吸收是限制反射率峰值的关键因素。金属膜选用 Ag 是因为在可见光波段 Ag 膜的本征欧姆损耗、带间跃迁吸收都很小。Ag 膜的本征吸收损耗在常用金属薄膜中处于较低水平,整体反射能力优于铝等材料,更适配可见光结构色与滤光器件的应用需求。

作者贡献声明:

季羽昊:论文构思,验证,可视化呈现,初稿写作;

叶 燕:论文构思,方法论,获取资助,审核与编辑写作,形式分析,提供资源;

宋 志:调查研究,数据管理,项目管理。

参考文献:

- [1] BANDHU H, VERMA A. Dynamic color switching in direct laser written Vanadium dioxide patterns [J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 191: 113289.
- [2] 陈林森, 乔文, 叶燕, 等. 面向柔性光电子器件的微纳光制造关键技术与应用[J]. 光学学报, 2021, 41(8): 0823018.
CHEN L S, QIAO W, YE Y, *et al.* Critical technologies of micro-nano-manufacturing and its applications for flexible optoelectronic devices [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41 (8) : 0823018. (in Chinese)
- [3] 张森. 基于金属微纳结构的中波红外滤波器的设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2023.
ZHANG S. *Design of Mid-wave Infrared Filter Based on Metal Micro Nano Structure*[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [4] 谷雨. 大面积偏振变色微纳结构与图案[D]. 苏州: 苏州大学, 2019.
GU Y. *Large-area, Polarization-dependent Micro/ Nano Structure and Its Pixelated Colorful Pictures* [D]. Suzhou: Soochow University, 2019. (in Chinese)
- [5] HUA J Y, HUA E K, ZHOU F B, *et al.* Foveated glasses-free 3D display with ultrawide field of view via a large-scale 2D-metagrating complex [J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 213.
- [6] 肖功利, 李苗, 杨宏艳, 等. 偏振不敏感高选择性颜色滤波器[J]. 光学学报, 2024(8): 0824001.
XIAO G L, LI M, YANG H Y, *et al.* Polarization-insensitive highly selective color filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024(8): 0824001. (in Chinese)
- [7] LIU H Z, WU J. MWIR narrowband filter based on guided-mode resonance subwavelength structure [J]. *Journal of Electronic Science and Technology*, 2025, 23(2): 100313.
- [8] SOLIMAN A, WILLIAMS C, HOPPER R, *et al.* High-transmission mid-infrared bandpass filters using hybrid metal-dielectric metasurfaces for CO₂ sensing[J]. *Advanced Optical Materials*, 2025, 13 (8): 2402603.
- [9] WU S H, CONNOLLY P W R, PUSINO V, *et al.* Polarization-controlled transmissive plasmonic color filter using a dimer-aperture array [J]. *Advanced Science*, 2025, 12(19): 2501941.
- [10] SADMAN S, KHALEQUE A, ISLAM R, *et al.* Deep neural network for color prediction from a dielectric metasurface and inverse design of corresponding color filter [J]. *Optical Materials Express*, 2025, 15(9): 2308.
- [11] ASLAM K, MUSHTAQ N, KANG G G. A highly efficient visible color filter employing an all-dielectric meta-surface decorated with TiO₂ nanostructures suitable as an excellent refractive index sensor[J]. *Journal of Optics*, 2025: 1-9
- [12] 王云姬. 片上集成滤光微结构的研究进展[J]. 金陵科技学院学报, 2020, 36(1): 27-29, 52.
WANG Y J. Research progress of integrated filter microstructure on chips[J]. *Journal of Jinling Institute of Technology*, 2020, 36(1): 27-29, 52. (in Chinese)
- [13] XIONG L, ZHANG Y, LU X M, *et al.* High-quality structural color filter based on embedded metasurface and dielectric-metal cavity [J]. *Optics Communications*, 2025, 592: 132259.
- [14] 陈召民. 面向成像探测的高光谱分辨率红外 Fano 窄带滤光方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
CHEN Z M. *Research on Hyperspectral Resolution Infrared Fano Narrowband Filtering Method for Imaging Detection* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [15] CHEN W T, ZHU A Y, CAPASSO F. Flat optics with dispersion-engineered metasurfaces [J]. *Nature Reviews Materials*, 2020, 5(8): 604-620.
- [16] CONNOLLY P W R, LI H Z, YAO D, *et al.* High-resolution multispectral three-dimensional profiling using a metasurface-enhanced SPAD quantum image sensor [J]. *Optics Express*, 2025, 33 (14): 29485.
- [17] EISA M H, ZIA A, HASSAN Z, *et al.* Ultrafast laser two-photon lithography for metasurface engineering: advances in fabrication and photonic applications[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2026, 20 (11): e02914.
- [18] 吴尚亮. 微纳结构的滤光特性及应用基础研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2019.
WU S L. *Basic Research on Light Filtering Characteristics and Applications of Micro-nano structures* [D]. Suzhou: Soochow University, 2019.

- (in Chinese)
- [19] YANG J W, CUI K Y, HUANG Y D, *et al.* Angle-insensitive spectral imaging based on topology-optimized plasmonic metasurfaces [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024, 18(12): 2400255.
- [20] YE Y, XU F C, WEI G J, *et al.* Scalable Fourier transform system for instantly structured illumination in lithography [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(10): 1978-1981.
- [21] SARKAR S, SARKER D, ZUBAIR A. A polarization tunable incident angle tolerant dielectric metasurface-based color filter [J]. *Materials Advances*, 2024, 5(18): 7455-7466.
- [22] 杨凤英. 基于蝶形光栅等离子体波导的颜色滤波器研究[J]. 广西物理, 2022, 43(4): 6-12.
YANG F Y. Research on color filter based on butterfly grating plasma waveguide[J]. *Guangxi Physics*, 2022, 43(4): 6-12. (in Chinese)
- [23] LIN D M, FAN P Y, HASMAN E, *et al.* Dielectric gradient metasurface optical elements [J]. *Science*, 2014, 345(6194): 298-302.
- [24] 邵亚楠, 李博文, 高世博, 等. 基于液态金属的跨波段超宽带极化转换超表面[J]. 光学精密工程, 2024, 32(7): 987-997.
SHAO Y N, LI B W, GAO S B, *et al.* Liquid metal based metasurface for cross-band and ultra-wideband polarization conversion [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(7): 987-997. (in Chinese)
- [25] 刘晓璐, 秦朗, 俞燕蕾. 胆甾相液晶微球光子禁带的动态调控及其应用[J]. 物理化学学报, 2024, 40(5): 4-24.
LIU X J, QIN L, YU Y L. Dynamic manipulation of photonic bandgaps in cholesteric liquid crystal microdroplets for applications [J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2024, 40(5): 4-24. (in Chinese)
- [26] 孙浩, 鄢松岩, 周程扬, 等. 基于单层介电超表面的红光波段手性响应[J]. 发光学报, 2025, 46(10): 1961-1968.
- [27] BARACU A M, AVRAM M A, BREAZU C, *et al.* Silicon metalens fabrication from electron beam to UV-nanoimprint lithography [J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(9): 2329.
- [28] XIANG G M, ZHANG Y, LU X M, *et al.* All-dielectric transmissive narrow-band filters adjustable within wide spectral range [J]. *Optics Communications*, 2025, 575: 131280.
- [29] SEMPLE M, HRYCIW A C, LI P, *et al.* Patterning of complex, nanometer-scale features in wide-area gold nanoplasmonic structures using helium focused ion beam milling [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(36): 43209-43220.
- [30] LI X T, LI Y, LI C, *et al.* High color saturation and angle-insensitive ultrathin color filter based on effective medium theory [J]. *Chinese Optics Letters*, 2023, 21(3): 033602.
- [31] 张文文. 微纳结构光-热-电转化调控机制与优化设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
ZHANG W W. *Basic Research on Regulation Mechanism and Optimization Design of Photo-Thermal-Electric Conversion in Micro-Nano Structures* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023. (in Chinese)

作者简介:



季羽昊(2003—),男,江苏泰兴人,硕士研究生,主要从微纳光学设计与制造方面的研究。E-mail: 20254239002@stu.suda.edu.cn

通讯作者:



叶燕(1979—),女,江苏泰兴人,教授,博士生导师,2007年于苏州大学获得博士学位,主要从事微纳光电器件、干涉光场调控、微纳制造等方面的研究。E-mail: yanye@suda.edu.cn