

反射型光变色超表面滤光结构

宋志¹, 路畅¹, 魏国军^{1,2}, 许宜申^{1,2}, 叶燕^{1,2,3*}, 陈林森²¹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 提出了一种反射型超表面滤光结构, 该滤光结构由基底、低折射率纳米光栅、Ag 光栅、SiN_x 高折射率介质层组成。理论模拟结果表明: 45° 入射角下, 在垂直于光栅栅线的入射平面内, 反射谱峰值出现在 475 nm 波长处; 在平行于光栅栅线的入射平面内, 反射谱峰值出现在 550 nm 波长处。其电场分布特性表明, 在不同的平面内 TE 偏振入射光激发的导模共振区域不同, TM 偏振下激发的导模共振强度与表面等离子体共振强度不同, 导致该结构在垂直于光栅栅线方向与平行于光栅栅线方向的两个平面内表现出两种截然不同的颜色。基于此制备的超表面结构样品不但光变色效果明显, 且易于与纳米压印工艺相结合实现大幅面光变色结构制备, 在防伪和图案信息编码等领域有广阔的应用前景。

关键词 光学器件; 一维超表面; 反射式滤光; 光变色; 表面等离子体共振; 导模共振

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2023001

Reflective Metasurface Filter with Optical Variable Color

Song Zhi¹, Lu Chang¹, Wei Guojun^{1,2}, Xu Yishen^{1,2}, Ye Yan^{1,2,3*}, Chen Linsen²¹School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China;²Key Laboratory of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province & Key Laboratory of Modern Optical Technologies, Ministry of Education, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China;³Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

Abstract A reflective metasurface filter is proposed in this paper, which consists of a substrate, a nanograting with low refractive index, a Ag grating and a high-refractive-index dielectric SiN_x layer. The simulation results show that with the incident angle of 45°, the reflection peak appears at the wavelength of 475 nm for the plane perpendicular to the grating line, while it is located at 550 nm for the plane parallel to the grating line. The electric field distribution characteristics demonstrate that for different incident planes, transverse electric field-polarized incidence excites guided-mode resonance in different areas, and the intensity of guided-mode resonance is different from that of surface plasmon resonance in the case of transverse magnetic field-polarized incidence. As a result, different colors are present in the two planes perpendicular to and parallel to the grating line, respectively. Accordingly, the fabricated metasurface sample has significantly optical variable color, which can be flexibly realized for large-area structures by nanoimprint lithography. The proposed reflective metasurface filter has a broad application prospect in the fields of anti-counterfeiting and information encoding.

Key words optical devices; one-dimensional metasurface; reflective filter; variable color; surface plasmon resonance; guided-mode resonance

OCIS codes 310.6628; 260.5740; 230.7408

收稿日期: 2021-02-01; 修回日期: 2021-04-17; 录用日期: 2021-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(62075149, 61575132)、江苏省自然科学基金(BK20201406)、江苏高校优势学科建设工程资助项目

通信作者: *yanye@suda.edu.cn

1 引言

超表面是一种人工制备的平面型超材料,其通过精细的表面微纳结构,对光的相位、振幅、偏振态进行调制,实现对电磁波的精确有效调控,在新型显示、光纤通信、超透镜、生物检测等领域中展现出广阔的应用前景^[1-2]。在新型显示方面,不同于色素着色,超表面彩色显示是通过微纳结构对不同波长的光散射、衍射或干涉产生不同的颜色,具有高分辨率、不褪色、环保和虹彩效应等优点,近年来引起了人们极大的兴趣。基于表面等离子体共振(SPR)、导模共振(GMR)、法布里-珀罗(FP)腔、米氏共振等工作原理的滤色器件,在显示、装饰、防伪等领域具有广阔的应用前景,由此促进了仿生结构色加工和微纳米光学技术的发展^[3-18]。

随着反射式新型显示、新型 OLED、信息编码、高端防伪等产业的发展,反射型彩色滤光器件成为研究热点。基于 SPR,2018 年, Wu 等^[19]报道了由 SiO₂ 基底、SiO₂ 一维光栅、Al 仿形膜层组成的结构,通过改变腔的深度,在横向磁场(TM)偏振下,可以实现整个可见光范围内反射颜色的输出,在横向电场(TE)模式下具有宽带反射器的功能。2020 年, Melo 等^[20]提出了由 Si 基底、Si 一维光栅和 Al 膜组成的结构,通过调整光栅几何形状,可以在特定的偏振态上获得整个可见光光谱上的特定颜色。上述设计结构为获得理想的反射颜色,变量参数较多,且需采用电子束光刻和刻蚀技术,难以大幅面制备。

基于 GMR 共振,2014 年, Uddin 等^[21]提出了偏振光变色的一维光栅型彩色滤光片,该结构由 SiN_x 光栅层和玻璃基底组成,周期为 300 nm 时, TM 波反射蓝光、TE 波反射绿光,周期为 370 nm 时, TM 波和 TE 波分别反射橙光和红光,结构的光谱带宽仅有 12 nm,且 TM 波的反射效率高于 80%, TE 波的反射效率高于 90%。2015 年, Qian 等^[22]设计了一种双层 GMR 滤波器件,通过双光束干涉系统制作了光栅周期为 750 nm 的光栅,具有较低的旁带和 80% 的共振反射效率,在特殊倾斜角下,获得了良好的光谱响应。2020 年, Li 等^[23]设计了一种经典双层结构彩色滤光片,通过改变入射角来连续调整 GMR 波长,该结构在 TM 偏振下,随着入射角从 20°增大到 50°,谐振波长从 670.32 nm 减小到 463.21 nm,覆盖了整个可见波段。2021 年, Wang 等^[24]将 GMR 光栅和 ENZ 材料结合起来,提出了一

种电可切换的反射式彩色显示器件,该器件是通过在 ITO/Al₂O₃/ITO/SiO₂ 衬底上添加一维 Al₂O₃ 光栅而成,利用电可切换材料和具有导模共振的一维介质光栅,通过在窄带反射器和透明膜之间的切换,可以实现反射式显示装置的电开启或关闭。上述基于导模共振的结构,结合干涉光刻技术和刻蚀工艺,能够制备出不同尺寸的一维高折射率介质光栅,但制备技术要求较高,较难实现大幅面超表面结构制备。

基于 SPR 和 FP 共振,2016 年, Zheng 等^[25]提出反射式低旁带等离子体金属/介电混合光栅,实现了 TM 偏振入射时滤光反射输出,但该结构使用电子束制备,效率低,难以大幅面制备;2016 年, Wang 等^[26]提出了一种 Ag-Al₂O₃-Ag 超表面结构,通过调节纳米盘的半径和阵列的周期可以实现全色反射输出,且带宽较窄,具有高饱和度和高亮度等优点;2019 年, Huang 等^[27]设计了一种采用三维气隙结构的纳米彩色印刷方法,通过对 3D 纳米腔的多个几何参数(包括直径 D , 间隔 h 和高度 H)进行调整,可以实现理想的 RGB 反射输出,但是该二维结构的能量利用率偏低,反射极值约 50%。此外,上述结构由于相对复杂,工艺繁琐,且需采用电子束光刻工艺,难以实现大面积制备。

针对现有反射型滤光结构的能量利用率低、制备工艺繁琐、难度高等问题,本文提出了一种介质-金属-介质光栅的一维单周期反射彩色滤光结构,该结构简单,采用离子束光刻更技术,结合电子束蒸发和电感耦合等离子体化学气相沉积镀膜工艺,进行大幅面制备。该结构在导模共振与表面等离子体共振的共同作用下,反射光谱的峰值衍射效率高达 65%,能量利用率高,可以实现自然环境下彩色滤光效果,能够避免对入射光的偏振依赖。并且在垂直于光栅栅线方向的两个平面内、白光 45°倾斜入射下,不同的偏振态所激发的导模共振、表面等离子体共振的区域不同,两垂直平面内的反射光谱中心波长差异明显,导致该结构在两个方向上的颜色截然不同,双通道效应明显,故该结构适用于彩色显示和加密、防伪等方面的应用。

2 超表面滤光结构与反射光谱

该超表面滤光结构如图 1 所示,从下到上依次为石英衬底、光刻胶光栅、Ag 光栅与 SiN_x 介质层。其中 P 为光栅周期, F 为占空比, h_1 为 Ag 膜厚度, h_2 为光刻胶光栅槽深, h_3 为 SiN_x 介质层厚度, w 为介质对光栅横向包裹的宽度, θ 为入射角, φ 为

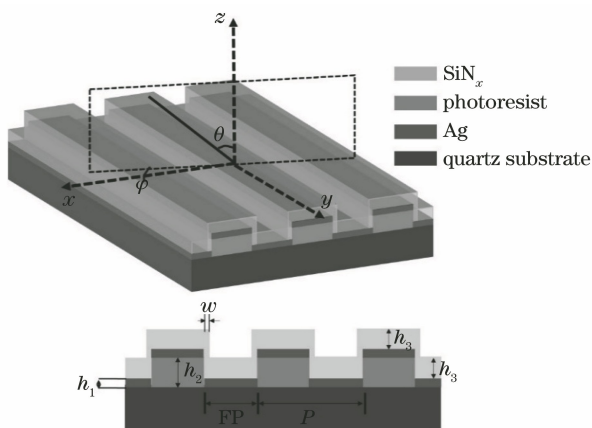


图 1 超表面滤光结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of metasurface color filter structure

入射光平面与垂直于光栅栅线方向的夹角。

当 Ag 膜厚度 h_1 为 20 nm, 光刻胶栅高 h_2 为 140 nm, 介质厚度 h_3 为 120 nm, 介质对光栅横向包裹的宽度 w 为 20 nm, 周期 P 为 520 nm, 占空比 F 为 0.4 时, 利用时域有限差分 (FDTD) 算法分析该结构在 $\theta=45^\circ$, φ 分别为 0° 和 90° 时的反射特性。

其他参数不变, 占空比 F 在 0.3~0.7 之间变化时, 该结构在不同入射光平面的反射光谱如图 2 所示。由图 2(a) 可知: 当 $\varphi=0^\circ$ 、 $F=0.3$ 时反射光谱表现出带阻滤波特性, 反射率峰值高达 65%; 随着占空比的逐渐增大, 反射峰的中心波长(长-短线)位置几乎保持不变, 但次反射峰(长-短-短线)的峰值先减小后增大; 在 $F=0.5$ 时取得最小值, 反射光谱表现出较好的宽带滤波特性。由图 2(b) 可知, $\varphi=90^\circ$ 、 $F=0.3$ 时, 其反射光谱(长-短线、长-短-短线)存在多个反射峰, 随着占空比的逐渐增加, 各反射峰峰值以不同速率先减小后增大, 在 $F=0.5$ 时反射光谱表现出较好的宽带滤波特性, 因此选择 $F=0.5$ 。图 2(a) 和图 2(b) 中实线表示 $F=0.4$ 时的反射光谱等高线, 虚线表示 F 为 0.5, $\varphi=0^\circ$ 或 90° 时的反射光谱等高线。此时优化后的该结构在两个平面的反射光谱如图 2(c) 所示, 两个平面内的反射光谱差异明显。反射光谱在 CIE1931 色域图的颜色如图 2(d) 所示, 其相应颜色分别为蓝灰色和褐色, 两种颜色连线经过白点附近, 形成互补色, 颜色区分度高。

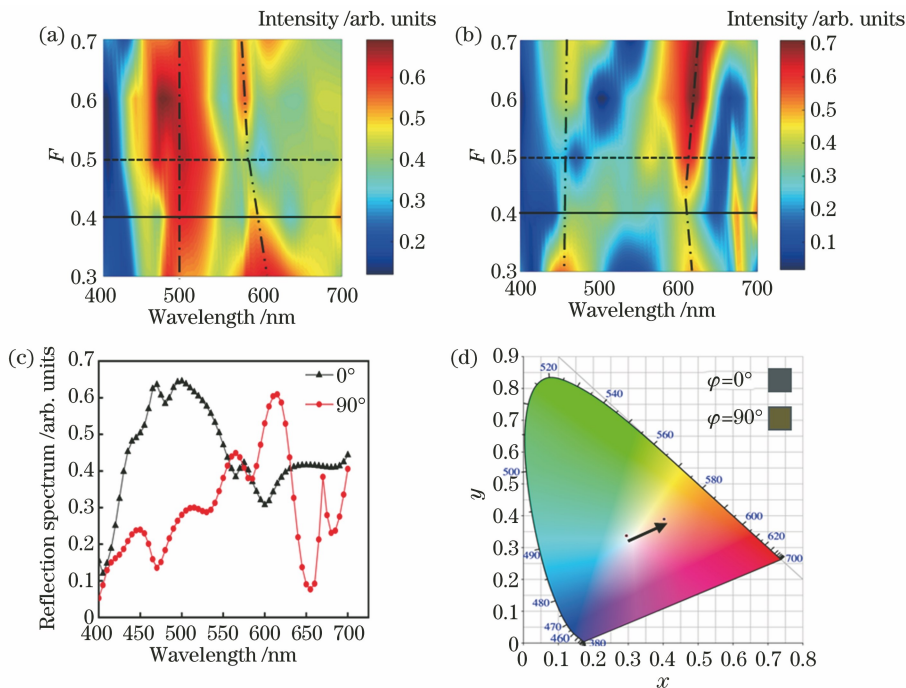


图 2 占空比变化时的反射光谱与优化后反射光谱及其对应颜色。(a) $\varphi=0^\circ$ 反射光谱; (b) $\varphi=90^\circ$ 反射光谱; (c) 两个平面优化后的反射光谱; (d) 反射光谱对应的 CIE1931 色域图

Fig. 2 Reflection spectrum corresponding to the duty cycle change, optimized reflection spectrum and its color gamut diagram. (a) Plane reflection spectrum at $\varphi=0^\circ$; (b) plane reflection spectrum at $\varphi=90^\circ$; (c) optimized reflection spectrum of the two planes; (d) CIE1931 color gamut diagram corresponding to the reflection spectrum

其他参数不变, 光栅高度 h_2 在 80 nm 至 160 nm 之间变化时, 该结构在不同入射光平面的反

射光谱如图 3 所示。由图 3(a) 可知: 当 $\varphi=0^\circ$ 、 $h_2=80$ nm 时反射光谱表现出带阻滤波特性, 随着光栅

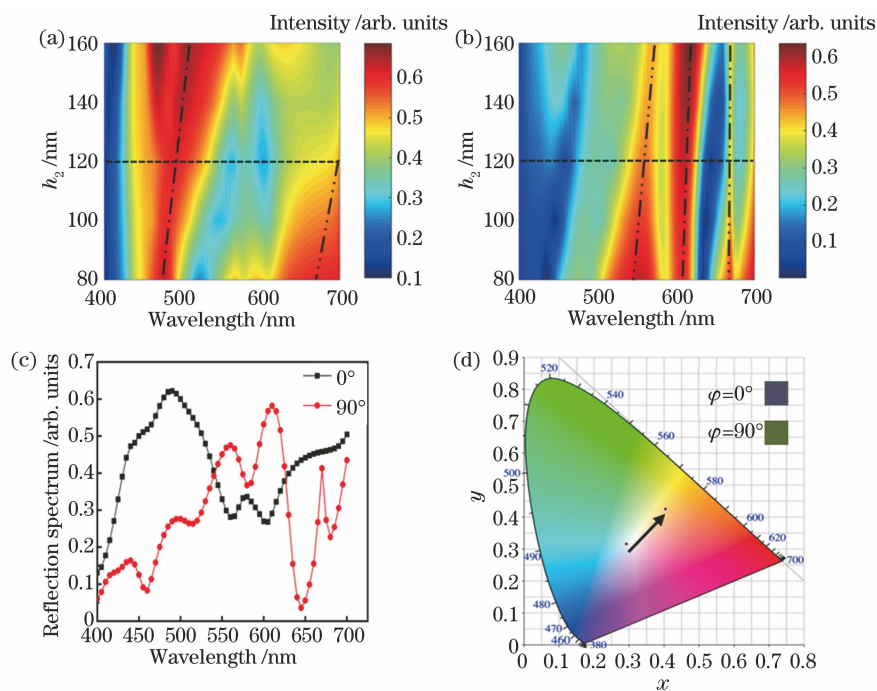


图 3 光栅高度变化时的反射光谱与优化后反射光谱及其对应颜色。(a) $\varphi=0^\circ$ 反射光谱;
(b) $\varphi=90^\circ$ 反射光谱;(c) 两个平面优化后的反射光谱;(d) 反射光谱对应的 CIE1931 色域图

Fig. 3 Reflection spectrum corresponding to the change of grating height, optimized reflection spectrum and its color gamut diagram. (a) Reflection spectrum at $\varphi=0^\circ$; (b) reflection spectrum at $\varphi=90^\circ$; (c) optimized reflection spectrum of the two planes; (d) CIE1931 color gamut diagram corresponding to the reflection spectrum

高度的增加,反射峰中心波长(长-短线)整体基本不变,但中心波长的半峰全宽逐渐增加且次反射峰(长-短-短线)的峰值逐渐减小;当 $h_2=120$ nm 时,反射光谱表现出较好的宽带滤波特性。由图 3(b)可知, $\varphi=90^\circ$ 、 $h_2=80$ nm 时其反射光谱存在多个反射峰,反射峰中心波长(长-短线)几乎不变,次级反射峰(长-短-短线)峰值随着光栅高度的增加而减小。图 3(a)和图 3(b)中虚线表示 h_2 为 120 nm, φ 为 0° 或 90° 时的反射光谱等高线,此时优化后的两个平面内的反射光谱如图 3(c)所示,反射光谱在 CIE1931 色域图中的颜色如图 3(d)所示,分别对应着蓝灰色和褐色,颜色饱和度较之前增加不少,颜色区分度也比之变高。

其他参数不变,介质层厚度 h_3 在 70 nm 至 140 nm 之间变化时,该结构在不同入射光平面内的反射光谱如图 4 所示。由图 4(a)可知,当 $\varphi=0^\circ$ 、 $h_3=140$ nm 时反射光谱表现出带阻滤波特性,且随着介质层厚度的减少,反射峰的中心波长(长-短线)产生蓝移,次级反射峰(长-短-短线)的峰值和半峰全宽减少,当 $h_3=100$ nm 时,反射光谱表现出较好的宽带滤波特性。由图 4(b)可知,当 $\varphi=90^\circ$ 、 h_3 大于 110 nm 时出现双峰,且随着介质层厚度的增加,

中心波长(长-短线)峰值增加,次级反射峰(长-短-短线)峰值减少,当 $h_3=100$ nm 时,反射光谱表现出较好的宽带滤波特性。图 4(a)和图 4(b)虚线表示 h_3 为 100 nm, φ 为 0° 或 90° 时的反射光谱等高线,此时两个平面内的反射光谱如图 4(c)所示,反射光谱在 CIE1931 色域图的颜色如图 4(d)所示,分别对应着靛蓝色和深绿色,两种颜色的连线经过白点,形成互补色,颜色对比度高,光变色效果明显。接着,将分析该结构在入射角和周期变化时, φ 分别为 0° 和 90° 时的反射特性。

其他参数不变,入射角在 5° 至 60° 之间变化时的反射光谱及其对应的 CIE1931 色域图,如图 5 所示。由图 5(a)可知,当 $\varphi=0^\circ$ 时,随着入射角增加,整体上中心波长(长-短线)产生蓝移,在整个入射角变化内,反射光谱表现出较好的宽带滤波特性。由图 5(b)可知,当 $\varphi=90^\circ$ 时,整体上中心波长蓝移,当入射角偏离 35° 时,在 550 nm 或 480 nm 处出现反射峰(长-短线),且随着入射角偏离程度增加,反射峰峰值以不同速率变化。图 5(c)展示了 $\varphi=0^\circ$ 时的 CIE1931 色域图,从中可以看出,随着入射角增加,颜色由深绿色变化至蓝色。图 5(d)展示了 $\varphi=90^\circ$ 时的 CIE1931 色域图,从中可以看出,随着入射角

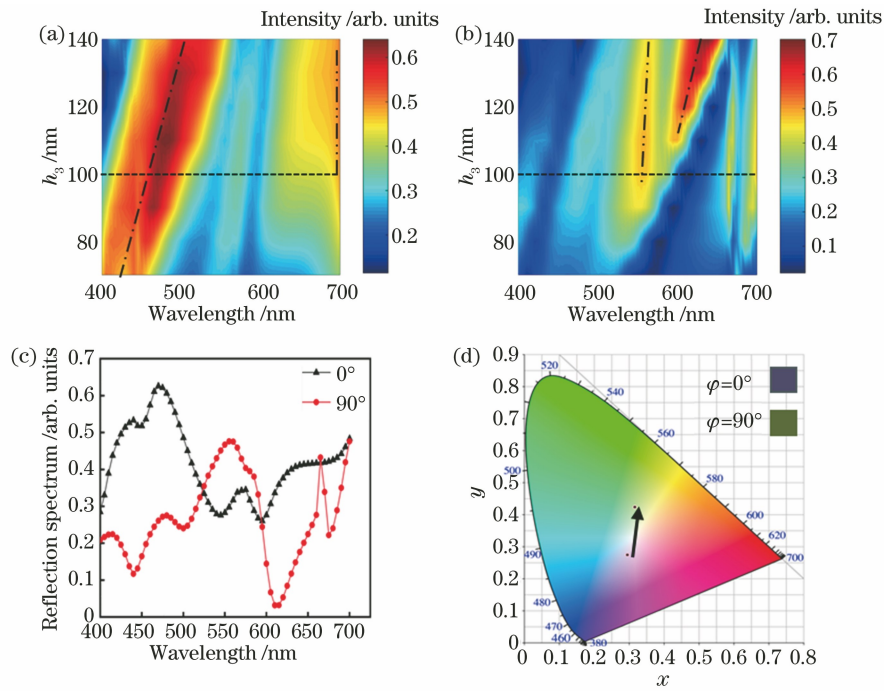


图 4 介质层膜厚变化时的反射光谱与优化后反射光谱及其对应颜色。(a) $\varphi=0^\circ$ 反射光谱；
(b) $\varphi=90^\circ$ 反射光谱；(c) 两个平面优化后的反射光谱；(d) 反射光谱对应的 CIE1931 色域图

Fig. 4 Reflection spectrum corresponding to changes in dielectric layer thickness, optimized reflection spectrum and its color gamut diagram. (a) Reflection spectrum at $\varphi=0^\circ$; (b) reflection spectrum at $\varphi=90^\circ$; (c) optimized reflection spectrum of the two planes; (d) CIE1931 color gamut diagram corresponding to the reflection spectrum

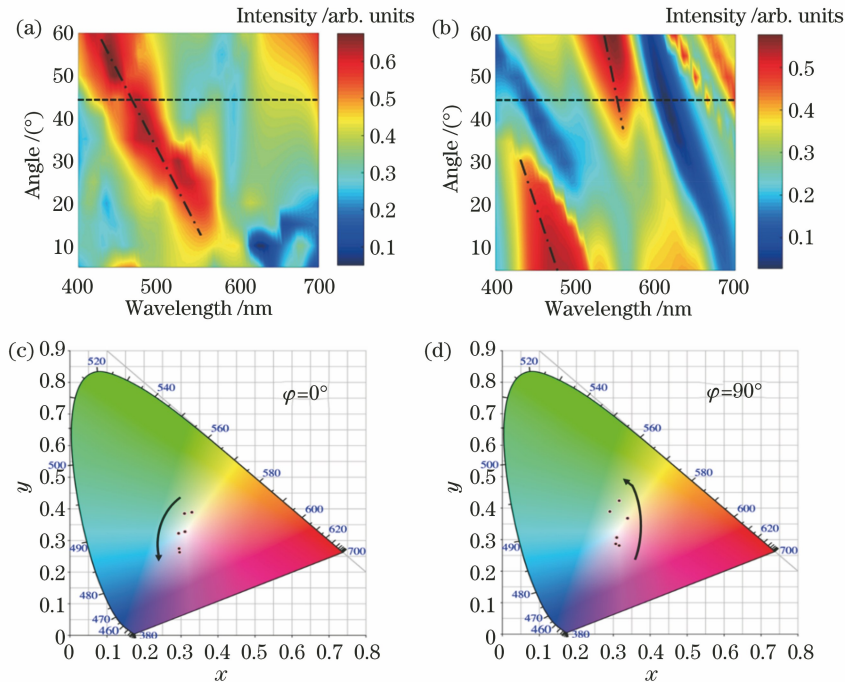


图 5 入射角变化时的反射光谱及其颜色。(a) $\varphi=0^\circ$ 反射光谱；(b) $\varphi=90^\circ$ 反射光谱；
(c) $\varphi=0^\circ$ CIE1931 色域图；(d) $\varphi=90^\circ$ CIE1931 色域图

Fig. 5 Reflection spectrum and color corresponding to the incident angle change. (a) Reflection spectrum at $\varphi=0^\circ$;
(b) reflection spectrum at $\varphi=90^\circ$; (c) CIE1931 color gamut at $\varphi=0^\circ$; (d) CIE1931 color gamut at $\varphi=90^\circ$

增加时, 颜色由浅蓝色变化至深绿色。其中, 图 5(a)、(b)虚线表示在 45° 观察角下 φ 分别为 0° 、

90°时的反射光谱。

在上述优化结构的基础上,为探讨结构的光变色机理,计算了 $\varphi=0^\circ$ 、反射峰中心波长为 475 nm 和 $\varphi=90^\circ$ 、反射峰中心波长为 550 nm 的电场分布,进一步阐明了 TE 和 TM 偏振下的物理机制。由图 6(a)和图 6(c)可知,TE 偏振态倾斜入射下, $\varphi=0^\circ$ 时电场能量主要分布于 SiN_x 介质光栅内, $\varphi=90^\circ$ 时电场能量主要分布于 Ag 光栅与 SiN_x 介质光栅脊区两端,少部分分布于光栅沟槽内的 SiN_x 介质层中。此时高折射率介质 SiN_x 光栅结构可以看作周期性调制的平面波导,当 TE 入射光波长与该光栅波导所支持的导模条件接近时,导模共振被激发出来,入射光的能量被重新分布,光波在光栅内发生反射,共振波长处反射率提高,偏离共振波长的反射率迅速降低。由图 6(b)和图 6(d)可知,TM 偏振态倾斜入射下, $\varphi=0^\circ$ 时电场能量主要分布于 SiN_x 光栅

沟槽内以及光刻胶-Ag 边界处。 $\varphi=90^\circ$ 时电场能量主要分布于 SiN_x 光栅脊区。同理,空气层和 SiN_x 介质层可以看作波导层,TM 波入射时,导模共振被激发出来,共振波长处反射率提高。此外,金属光栅结构能够与入射光耦合,激发出表面等离子体。当 TM 波入射到 Ag 层时,满足波矢匹配条件的入射光在金属表面形成表面等离子体共振,共振波长处的反射率降低。从图 6(a)和图 6(b)可知, $\varphi=0^\circ$,白光 45°倾斜入射时,在波长 475 nm 处,其反射率由导模共振影响的 TE 波反射率和导模共振、表面等离子体共振影响的 TM 波反射率共同决定。从图 6(c)和图 6(d)可知, $\varphi=90^\circ$,白光 45°倾斜入射时,在波长 550 nm 处,其反射率由导模共振影响的 TE 波反射率和导模共振影响的 TM 波反射率共同决定。因此,在表面等离子体共振和导模共振的作用下,入射时结构的共振机理不同,这是结构能够实现光变色的主要原因。

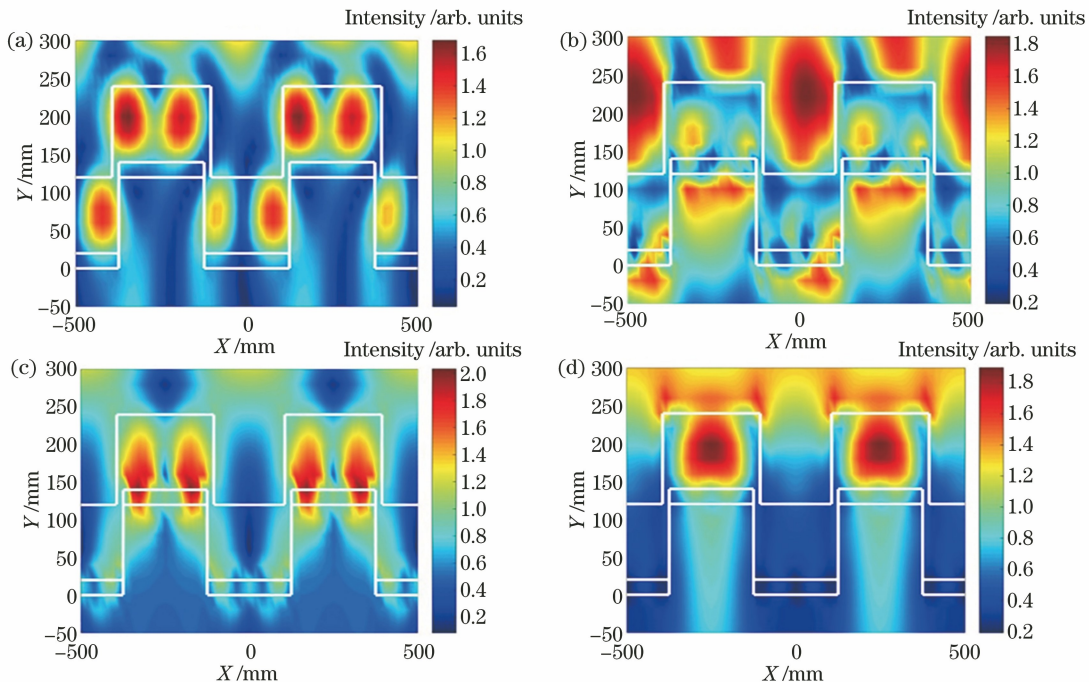


图 6 电场强度分布图。(a) $\varphi=0^\circ$ TE 波入射;(b) $\varphi=0^\circ$ TM 波入射;(c) $\varphi=90^\circ$ TE 波入射;(d) $\varphi=90^\circ$ TM 波入射

Fig. 6 Electric field intensity distribution maps. (a) TE wave incident at $\varphi=0^\circ$; (b) TM wave incident at $\varphi=0^\circ$; (c) TE wave incident at $\varphi=90^\circ$; (d) TM wave incident at $\varphi=90^\circ$

3 光变色超表面滤光样品

根据上述优化结构,实验制备了该超表面滤光结构。首先,将光致抗蚀剂(苏州众信启恒股份有限公司 AZ 系列)按比例旋涂在石英基板的表面上以形成均匀光刻胶层(约 150 nm),然后采用连续变频干涉光刻技术^[28](激光波长:355 nm,重复频率:1 kHz,脉冲宽度<15 ns,物镜:50×)制作像

素化光栅阵列,光刻胶层在氢氧化钠溶液(温度 22 °C,质量分数为 0.6%)中显影 8 s,得到一维光刻胶光栅。

中间 Ag 膜层通过电子束蒸发在光刻胶光栅表面获得 20 nm 厚的 Ag 光栅。最外层介质包裹层采用电感耦合等离子体化学气相沉积的方法,沉积 100 nm SiN_x 介质层,最终样品的 SEM 形貌图和剖面图如图 7 所示。

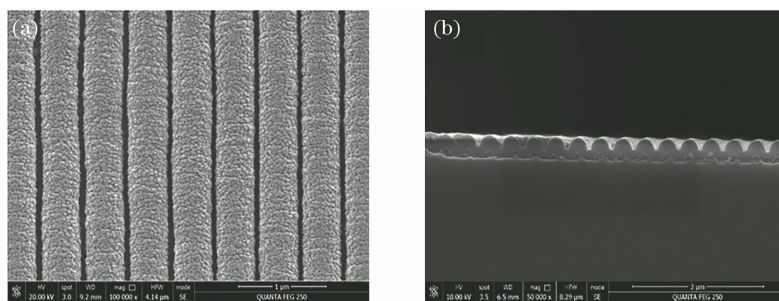


图 7 SEM 形貌图和剖面图。(a) SEM 形貌图;(b)剖面图

Fig. 7 SEM topography and profile. (a) SEM topography; (b) profile

图 8(a)和图 8(b)为白光 45° 入射下, $\varphi=0^\circ$ 和 $\varphi=90^\circ$ 时所制备样品的反射颜色照片, 其中样品尺寸为 $2\text{ cm}\times 2\text{ cm}$, 幅面为 $1.5\text{ cm}\times 1.5\text{ cm}$ 。由图 8(c)可知: 当 $\varphi=0^\circ$ 时实验测得反射光谱的中心位置在 475 nm 附近处, 与模拟反射光谱基本吻合, 样品反射峰峰值略低于模拟值, 其对应的颜色为靛蓝色[图 8(d)]; 当 $\varphi=90^\circ$ 时实验测得反射光

谱的中心位置在 550 nm 附近处, 与模拟反射光谱基本吻合, 样品反射峰峰值略低于模拟值, 其对应的颜色为深绿色[图 8(d)]。两个平面内, 45° 倾斜入射下, 反射光谱中心波长的位置差别很大, 不同方向上会呈现出截然不同的颜色, 双通道效应明显, 可以应用于信息编码、装饰、防伪等领域。

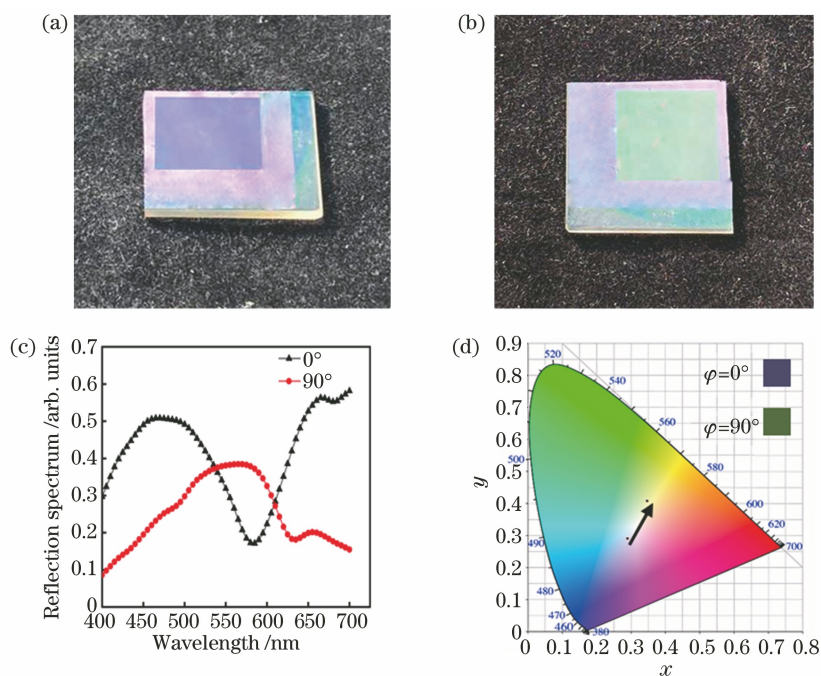


图 8 白光下样品反射颜色和反射光谱。(a) $\varphi=0^\circ$ 样品颜色; (b) $\varphi=90^\circ$ 样品颜色; (c) 两个平面内样品反射光谱; (d) 样品反射光谱对应的 CIE1931 色域图

Fig. 8 Sample reflection color under white light and reflection spectrum. (a) Sample color at $\varphi=0^\circ$; (b) sample color at $\varphi=90^\circ$; (c) reflection spectrum test curve of the sample in two planes; (d) CIE1931 color gamut diagram corresponding to the sample test curve

4 样品结构分析与性能优化

为探讨样品形貌对反射光谱的影响, 基于 SEM 形貌图建模, 在 φ 为 0° 和 90° 、白光 45° 倾斜入射下, 仿真的反射光谱如图 9 所示。结构参数不变, 仿真

结构的介质层和光刻胶层为正弦型时, 两个平面内的反射峰峰值分别为 55% 和 42% , 低于优化后结构的反射峰峰值 65% 和 55% , 反射光谱的中心波长分别为 450 nm 和 520 nm , 与优化后结构的反射光谱中心波长基本吻合, 由此验证了样品的实际形貌对

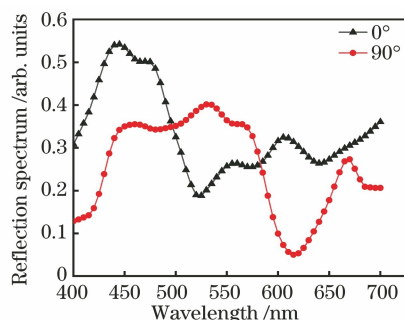


图 9 两个平面内反射光谱

Fig. 9 Reflection spectrum of the two planes

结构反射率的影响。

此外,为了提升光栅结构的反射滤光性能,分析

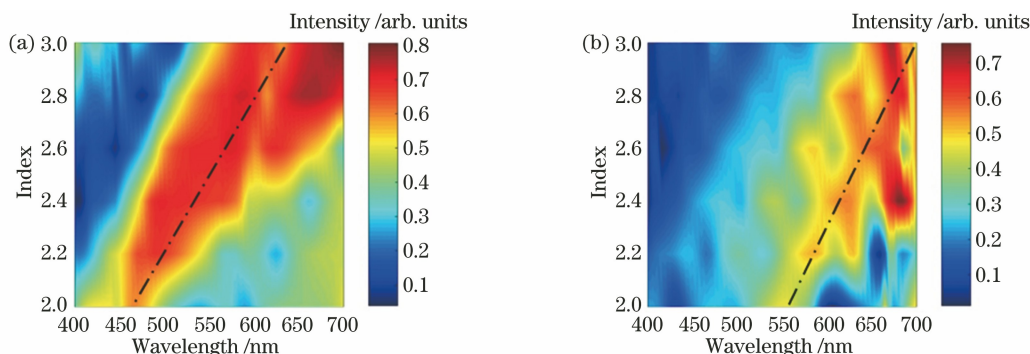
图 10 介质层折射率变化时的反射光谱。(a) $\varphi=0^\circ$ 反射光谱;(b) $\varphi=90^\circ$ 反射光谱

Fig. 10 Reflection spectrum corresponding to the change of dielectric refractive index.

(a) Reflection spectrum at $\varphi=0^\circ$; (b) reflection spectrum at $\varphi=90^\circ$

5 结 论

综上所述,提出并制备了一种一维反射式超表面光变色结构,在白光 45° 倾斜入射下,理论与实验结果表明,不同偏振光在不同入射面内激发共振的结构区域、共振强度不同,导致两个平面内的反射光谱不同。在垂直于光栅栅线的入射平面内,反射光谱中心波长在 475 nm 附近,呈靛蓝色;在平行于光栅栅线的入射平面内,反射光谱中心波长在 550 nm 附近,呈深绿色,光变色效应明显。该结构易于与纳米压印工艺结合,实现光变色结构的大幅面制备,在防伪、装饰、编码等领域有较好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Chen L, Yan J H, Guo H X, et al. Highly efficient large-angle beam deflection based on silicon-based metasurface[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(3): 0305001.
陈磊, 严金华, 郭焕祥, 等. 基于硅基超表面的高效率大角度光束偏转[J]. 光学学报, 2021, 41(3): 0305001.

了介质层光栅的材料性质对于反射峰大小和位置的影响。其他参数保持不变,当介质折射率在 2 至 3 之间变化时,该结构在不同入射光平面内的反射光谱如图 10 所示。由图 10(a)可知,当 $\varphi=0^\circ$,白光 45° 倾斜入射下,随着介质层折射率增加,反射峰中心波长(长-短线)产生红移,反射峰的峰值和半峰全宽增加,峰值高达 80%;由图 10(b)可知,当 $\varphi=90^\circ$,白光 45° 倾斜入射下,随着介质层折射率增加,中心波长(长-短线)产生红移,反射峰的峰值和半峰全宽增加,峰值高达 70%。由此,通过选取折射率更高的介质材料和优化的结构参数,能够实现性能更高的光变色超表面滤光样品。

- [2] Zhang M D, Wang W T, Sun P, et al. A highly efficient nonlinear metasurface based on nanoring-pillar structure [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1219002.
张梦蝶, 王文涛, 孙朋, 等. 一种基于纳米环-柱结构的高效非线性超表面[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1219002.
- [3] Lochbihler H. Colored images generated by metallic sub-wavelength gratings[J]. Optics Express, 2009, 17(14): 12189.
- [4] Zhou Y. Design and fabricate the color filter and the polarizer based on the subwavelength grating [D]. Suzhou: Soochow University, 2013.
周云. 亚波长光栅偏振和滤光器件设计与制备[D]. 苏州: 苏州大学, 2013.
- [5] Ye Y, Zhou Y, Chen L S. Color filter based on a two-dimensional submicrometer metal grating [J]. Applied Optics, 2009, 48(27): 5035-5039.
- [6] Ye Y, Chen L S. Dual-channel characteristic and application of the embedded grating[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(12): 2255-2260.
叶燕, 陈林森. 埋入式光栅双通道特性及其应用研究[J]. 光学学报, 2008, 28(12): 2255-2260.

- [7] Joon P H, Ting X, Yong L J, et al. Photonic color filters integrated with organic solar cells for energy harvesting[J]. *ACS Nano*, 2011, 5(9): 7055-7060.
- [8] Xing Y, Guo L, Wang Y, et al. Advance of anti-counterfeit materials based on photochromic dyes[J]. *Dyestuffs and Coloration*, 2017, 54(6): 28-32. 邢颖, 郭林, 王瑛, 等. 光致变色防伪材料的研究进展[J]. *染料与染色*, 2017, 54(6): 28-32.
- [9] Tang S T. Research on tricolor-shifting device with an embedded sub-wavelength sinusoidal grating structure [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2017. 唐少拓. 亚波长嵌入式正弦结构三色光变器研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2017.
- [10] Wang X Q, Chen J Y, Guo T B, et al. Polarization tunable color filters based on flexible all-dielectric metasurfaces[J]. *Optics Express*, 2020, 28(15): 21704-21712.
- [11] Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F, et al. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays [J]. *Nature*, 1998, 391(6668): 667-669.
- [12] Ye Z C, Zheng J, Sun S, et al. Compact color filter and polarizer of bilayer metallic nanowire grating based on surface plasmon resonances [J]. *Plasmonics*, 2013, 8(2): 555-559.
- [13] Cai E F, Huang Y Q, Duan X F, et al. Design and analysis of optical-communication-band sub-wavelength grating polarizer [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2013, 34(3): 410-412, 416. 蔡二飞, 黄永清, 段晓峰, 等. 光通信波段亚波长光栅偏振器的设计与分析[J]. *半导体光电*, 2013, 34(3): 410-412, 416.
- [14] Huang Y W, Chen W T, Tsai W Y, et al. Aluminum plasmonic multicolor meta-hologram [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(5): 3122-3127.
- [15] James T D, Mulvaney P, Roberts A. The plasmonic pixel: large area, wide gamut color reproduction using aluminum nanostructures [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(6): 3817-3823.
- [16] Yang C Y, Shen W D, Zhang Y G, et al. Compact multilayer film structure for angle insensitive color filtering[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 9285.
- [17] Cui H L, Jiao L, Li L J, et al. Theoretical investigations of THz subwavelength metamaterials polarization insensitive modulators[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3849-3853. 崔海林, 焦磊, 李丽娟, 等. 基于太赫兹亚波长超材
- 料的偏振不敏感调制器的理论研究[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(11): 3849-3853.
- [18] Chen Q, Wen L, Yang X G, et al. Structured color technology for high pixel density image sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(8): 0823010. 陈沁, 文龙, 杨先光, 等. 面向高像素密度图像传感器的结构色技术[J]. *光学学报*, 2021, 41(8): 0823010.
- [19] Wu S L, Ye Y, Luo M H, et al. Polarization-dependent wide-angle color filter incorporating meta-dielectric nanostructures [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(14): 3674-3678.
- [20] Melo E G, Ribeiro A L A, Benevides R S, et al. Bright and vivid diffractive-plasmonic reflective filters for color generation [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2020, 3(2): 1111-1117.
- [21] Uddin M J, Khaleque T, Magnusson R. Guided-mode resonant polarization-controlled tunable color filters[J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 12307-12315.
- [22] Qian L Y, Zhang D W, Huang Y S, et al. Performance of a double-layer guided mode resonance filter with non-subwavelength grating period at oblique incidence [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 72: 42-47.
- [23] Li H T, Wang K N, Qian L Y. Tunable color filter with non-subwavelength grating at oblique incidence [J]. *Optik*, 2020, 207: 164432.
- [24] Wang W Q, Guan Z Q, Xu H X. A high speed electrically switching reflective structural color display with large color gamut [J]. *Nanoscale*, 2021, 13(2): 1164-1171.
- [25] Zheng J, Ye Z C, Sheng Z M. Reflective low-sideband plasmonic structural colors [J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(2): 381-387.
- [26] Wang H, Wang X L, Yan C, et al. Full color generation using silver tandem nanodisks [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(5): 4419-4427.
- [27] Huang Y, Zhu J, Chen Z J, et al. Diversified and precise plasmonic color tuning by three-dimensional air-gap nanocavities [C] // 2019 IEEE 32nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), January 27-31, Seoul, Korea (South). New York: IEEE Press, 2019: 934-937.
- [28] Lou Y M, Ye Y, Pu D L, et al. A large-scale diffractive glasses-free 3D display [J]. *SPIE Newsroom*, 2014.