

偏振不敏感高选择性颜色滤波器

肖功利¹, 李苗¹, 杨宏艳^{2*}, 王博文¹, 张家荣¹, 陈康¹, 刘兴鹏¹¹桂林电子科技大学信息与通信学院广西高校微电子器件与集成电路重点实验室, 广西 桂林 541004;²桂林电子科技大学光电工程学院, 广西 桂林 541004

摘要 提出一种偏振不敏感且高选择性的新型纳米结构颜色滤波器。当平面光入射到超材料表面时,金属与介质交界处会发生表面等离子体共振和光学异常透射现象,部分频率的光被束缚在微纳结构中,而其他频率的光发生透射,从而实现滤色效果。采用时域有限差分法,对4种不同结构的滤波器的透射光谱和颜色显示规律进行研究。同时,还研究了结构周期、圆环直径、十字架宽度和偏振角等参数对透射光谱和滤波特性的影响。结果表明:与单层表面等离子体结构相比,所提双层等离子体亚表面结构模型的透射率更高;在可见光波段内,该滤波器具有偏振不敏感特性,半峰全宽的最小值为23.26 nm,并且具有90.5%的高透射率。这项研究为下一代颜色滤波器的设计提供了理论参考。

关键词 表面光学; 高传输效率; 偏振不敏感; 高选择性; 双层等离子体; 可见光

中图分类号 TN256

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231892

1 引言

结构色是由表面精密排列的微观结构引发的特殊光学现象,最初被发现于自然界的鸟类、昆虫、植物和鱼类等生物的体表上。这些特殊结构会使入射光发生干涉、散射和衍射等现象,从而呈现出丰富多彩的颜色。基于这种神奇的光学现象,科研人员从微观结构以及光学原理出发,开始对颜色滤波器进行研究。传统颜色滤波器通常采用薄膜或染料涂层制成,但受限于光学衍射极限,分辨率较低,且容易受到高温和紫外线长时间照射的影响^[1-4]。相比之下,基于微观结构的颜色滤波器能够通过改变结构参数或者材料参数来获得所需波段的光,在应用场景上更加灵活。相比于传统颜色滤波器,基于微观结构的颜色滤波器具有性能稳定、可调谐、可制造等优点,且通常使用无机材料或高温耐久材料制成,具有更长的使用寿命,在互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感器、液晶屏幕和像素开发等诸多领域中均有广泛的应用前景^[5-9]。

1902年,Wood^[10]在连续光谱光栅衍射实验中观测到一种反常衍射现象。在反射光谱上,光栅的光谱强度在某些特定波长处发生突变。虽然当时并没有给出相应的解释,但之后的研究发现这就是表面等离子体共振(SPR)现象。研究还发现,通过调整超表面的

结构参数,可以控制光的散射、反射、衍射,从而调节吸收峰波长并获得所需的颜色^[11-13]。近年来,随着微纳制造工艺的发展以及结构色理论的进步,人们对基于微纳结构的颜色滤波器进行了大量研究。2018年,顾佳美等^[14]设计了一种基于亚波长光栅微结构的大角度容忍颜色滤波器,可以在0~60°的入射范围内实现高透射率输出;2019年,Wang等^[15]制备了一维纳米光栅的双金属超薄(厚度约为10 nm)减色滤光片,其透射率超过80%;2022年,Wang等^[16]设计了一种反射率高达99%的纳米结构,该结构有助于在可见光波段内实现不同波长的选择;2022年,杨凤英^[17]设计了一种基于蝶形光栅等离子体波导的颜色滤波器,通过调整结构周期和介质层厚度对滤色效果实现动态调控;2022年,肖功利等^[18]设计了一种全介质圆环-纳米棒结构宽色域颜色滤波器,该颜色滤波器在可见光范围内的反射率达到70%以上,通过改变纳米棒直径来实现宽色域颜色滤波特性,色域面积高达0.115。随着制造工艺精度的提升,基于纳米结构的颜色滤波器在理论和实践中都取得了重大进展,并促进了纳米结构的颜色滤波器在各类器件中的应用^[19-21]。

基于以上研究背景,本文提出了一种颜色滤波器,该滤波器具有颜色稳定性、较小的半峰全宽(FWHM)、高谐振品质因数以及偏振不敏感等特性。该滤波器采用双层等离子体亚表面结构,通过增强交叉极化转换

收稿日期: 2023-12-05; 修回日期: 2024-01-09; 录用日期: 2024-02-02; 网络首发日期: 2024-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(62165004, 61805053)、广西自然科学基金(2023GXNSFAA026108)、桂林电子科技大学研究生创新项目(2022YCX047, 2021YCX040)、广西精密导航技术与应用重点实验室主任基金(DH202313)

通信作者: *hyang@guet.edu.cn

效率和层内与层间的耦合,实现了这些优势。此外,还对不同结构的透射率、透射光谱以及带宽进行了比较分析。详细研究了单元结构周期、十字圆环结构参数和偏振角对该滤波器输出特性的影响。

2 结构设计与数值模拟

图 1 为设计的偏振不敏感高选择性颜色滤波器的三维结构示意图,其中 \mathbf{E} 、 \mathbf{H} 、 \mathbf{K} 分别代表电场矢量、磁场矢量和波矢。电场强度 \mathbf{E} 的方向为 y 方向,磁场强度 \mathbf{H} 的方向为 x 方向。图 1 右侧图为单元结构模型,所提颜色滤波器由顶部双层十字圆环和底部缓冲层组成。双层十字圆环由金属铝 (Al) 和氢倍半硅氧烷 (HSQ) 聚合物构成。底部由缓冲层 TiO_2 、波导层

Al_2O_3 和基底 SiO_2 三层介质层组成。该单元结构自上而下所用的材料为 Al、HSQ、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 SiO_2 。该结构顶部十字圆环的内直径 $D=280\text{ nm}$, 十字架宽度 $B_1=154\text{ nm}$, 圆环宽度 $R_1=20\text{ nm}$, 金属 Al 的厚度为 20 nm , HSQ 的厚度为 25 nm , TiO_2 的厚度为 40 nm , Al_2O_3 的厚度为 50 nm , SiO_2 的厚度为 50 nm , 该单元结构沿 x 方向和 y 方向的长度分别为 W_1 和 L_1 。金属 Al 的参数来自 Palik 模型, HSQ 折射率为 1.40, SiO_2 折射率为 1.46, 入射平面光方向为 z 轴负方向, 工作波长范围为 $400\sim 700\text{ nm}$ 。在仿真时, x 方向和 y 方向的边界条件即为周期 (Period), z 方向的边界条件设置为完美匹配层 (PML)。研究结构参数对透射谱图的影响时, 周围介质默认为空气 (折射率为 1.00)。

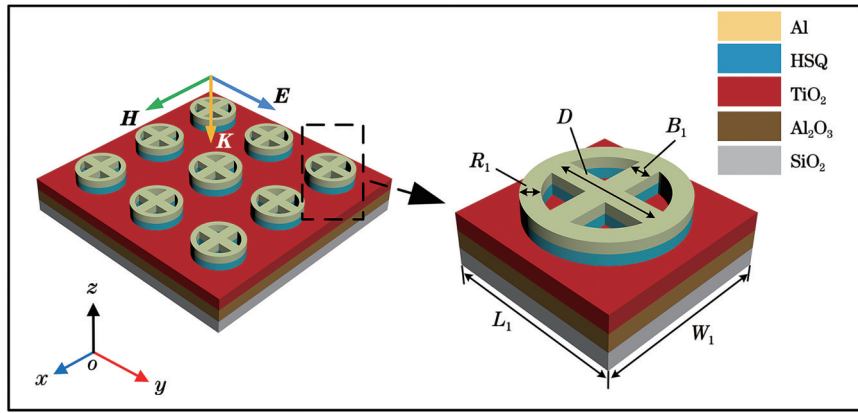


图 1 双层十字圆环滤波器及其单元结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of double-layer cross circle filter and its unit structure

为了观测滤波器的滤色效果,引入 CIE (国际照明委员会) 色度标准系统。CIE1931- RGB 色彩空间是众多 RGB 色彩空间中的一种,由红 (波长为 700 nm)、绿 (波长为 546.1 nm)、蓝 (波长为 435.8 nm) 作为三原色进行区分。为了便于 CIE1931- RGB 系统与 CIE1931- XYZ 系统之间的相互转换,两个系统的转换公式为

$$\begin{cases} X = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} kS(\lambda)R(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \\ Y = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} kS(\lambda)R(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \\ Z = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} kS(\lambda)R(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda \end{cases}, \quad (1)$$

$$k = \frac{100}{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} S(\lambda)\bar{y}d\lambda}$$

式中: λ 为波长,其取值限制在可见光范围内; $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 为标准三色刺激值,即色彩匹配函数; X 、 Y 、 Z 分别为物体颜色三刺激值; $S(\lambda)$ 为光源的功率谱分布; $R(\lambda)$ 为反射 (或透射) 谱; k 为归一化因子。为了观测滤色效果,将光谱三色刺激值转化为二维坐标公式,具体过程为

$$\begin{cases} x_0 = \frac{X}{X+Y+Z} \\ y_0 = \frac{Y}{X+Y+Z} \end{cases}, \quad (2)$$

FWHM 的计算公式为

$$f_{\text{FWHM}} = f_1 - f_2, \quad (3)$$

式中: f_1 和 f_2 分别为光谱峰的左侧和右侧幅值下降到峰值一半时光频率所对应的波长。

3 结果与讨论

所提双层十字圆环结构的透射率曲线如图 2(a) 中实线所示,透射率峰值为 73.0% , 峰值对应的波长为 497 nm , FWHM 为 23.26 nm , 在 4 种不同结构的模型中,其透射率最高,带宽最窄,滤色效果最佳。由图 2(a) 可知,双层圆环结构在可见光波段下没有形成有效的透射峰,不具备滤色效果。双层十字结构的透射率曲线形成两个透射峰,其中一个透射率峰值为 65.0% , 对应的波长为 493 nm , FWHM 为 23.38 nm ; 另一个透射率峰值为 57.7% , 对应的波长为 547 nm , FWHM 为 33.24 nm , 由于两个透射峰距离较近,滤出的颜色不具有单一性,滤色效果差。单层十字圆环结构

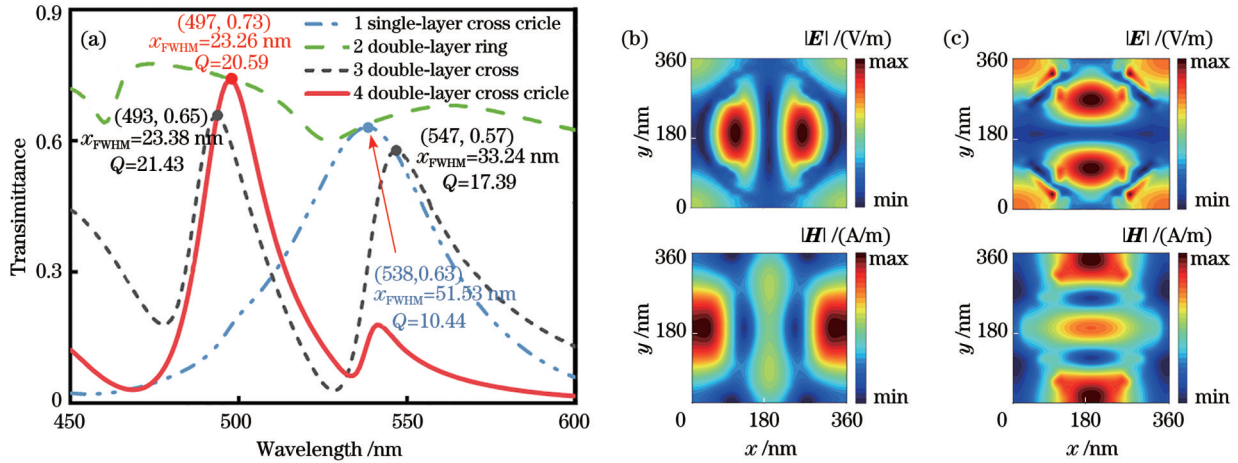


图 2 4 种不同结构透射率对比以及其电磁场分布。(a)对比不同结构的透射率曲线、半峰全宽及 Q 值；(b)双层十字圆环结构 xy 平面电磁场；(c)单层十字圆环结构 xy 平面电磁场

Fig. 2 Comparison of transmittance and electro-magnetic field distribution of four different structures. (a) Comparison of transmittance curves, full widths at half maximum, and Q values of different structures; (b) xy -plane electro-magnetic field of double-layer cross circle structure; (c) xy -plane electro-magnetic field of single-layer cross circle structure

在可见光波段只有一个透射峰,透射率峰值为 63.0%,对应的波长为 538 nm,FWHM 为 51.53 nm,透射峰带宽大,滤色效果不佳。在图 2 中,Q 为谐振品质因数。

图 2(b) 为双层十字圆环 xy 截面的电磁场分布,图 2(c) 为单层十字圆环 xy 截面的电磁场分布。尽管周期相同(均为 360 nm),单层十字圆环结构与双层十字圆环结构的电磁场分布仍有所不同。对于双层结构而言,由于 Al 层和 TiO_2 层之间存在着一层 HSQ,可见

光范围内的工作波长远远大于 HSQ 的高度,这使得 Al 层和 TiO_2 亚表面之间存在着强烈的耦合,电场和磁场左右对称分布,电磁场分布更加集中。如图 2(c) 所示,电场和磁场上下对称,电磁场相较于双层结构更加分散。通过对比单、双层结构的透射率曲线,可以说明双层十字圆环等离子体亚表面结构具有更小的 FWHM,以及更高的传输效率。

研究结构周期对透射率的影响,图 3(a) 为 $L_1=$

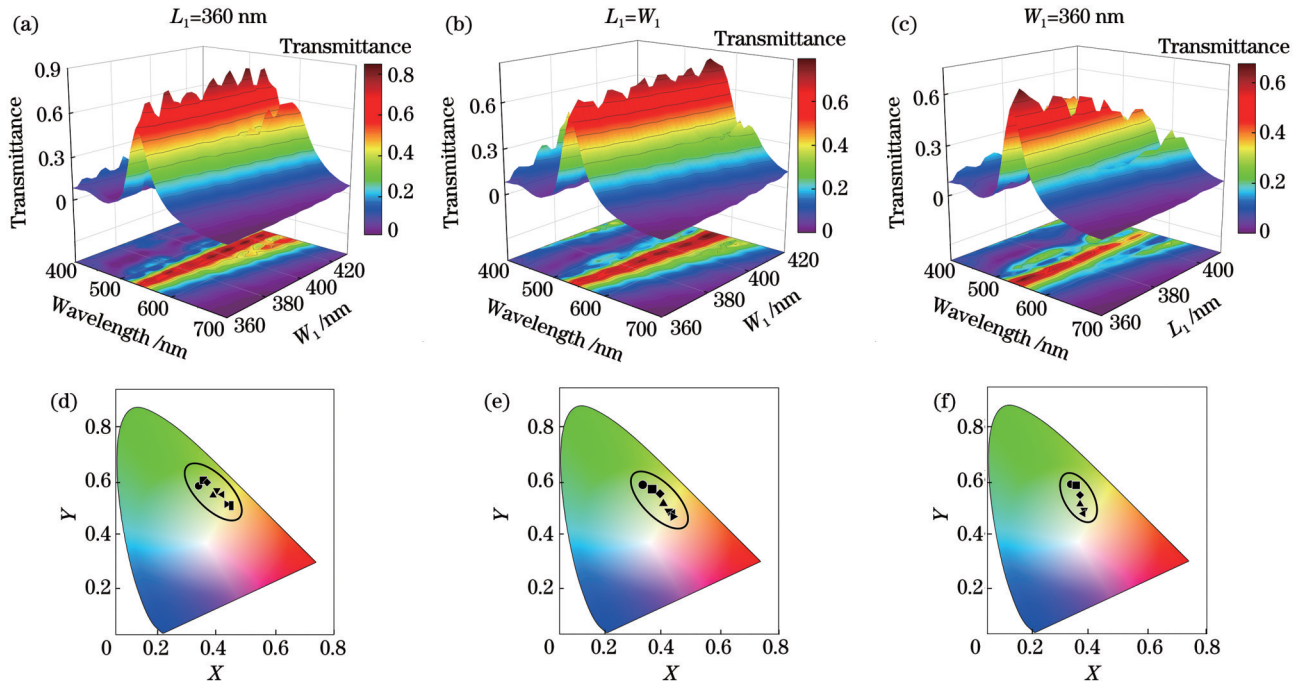


图 3 不同结构周期对应的透射光谱和色度图。(a)(d) $L_1=360$ nm, W_1 变化；(b)(e) W_1, L_1 同时变化且 $W_1=L_1$ ；(c)(f) $W_1=360$ nm, L_1 变化

Fig. 3 Transmission spectra and colorimetry diagrams of different structural periods. (a) $L_1=360$ nm, varying W_1 ; (b) W_1 and L_1 varying simultaneously and $W_1=L_1$; (c) $W_1=360$ nm, varying L_1

360 nm、 W_1 在 360~430 nm 范围内变化时的三维透射率曲线。随着 W_1 的不断增大,透射曲线的共振峰在 534~547 nm 范围内移动,FWHM 由 34.00 nm 增加到 38.00 nm,谐振品质因数 Q 略有减小,这是由于随着介质层光照面积的增大,金属波导模式的损耗增加。图 3(d) 展示了不同 W_1 下透射率峰值的移动范围,色度图中的坐标点在小范围内移动,集中在黄和绿之间。图 3(b) 为 W_1 与 L_1 同时从 360 nm 变化到 420 nm 时的三维透射率曲线,随着 W_1 与 L_1 的不断增大,模型的透射率也逐渐增加,共振峰在 534 nm 到 566 nm 的范围内移动,FWHM 的最小值为 36.59 nm,透射曲线所对应的色度坐标点在小范围内移动。图 3(c) 为 $W_1=360$ nm、 L_1 在 360~410 nm 范围内时的三维透射率曲线,随着 L_1 的不断增大,透射率逐渐减小,对应的色度坐标点移动范围较小。从图 3(d)~(f) 中的 3 幅 CIE1931 色度坐标图可以看出,改变结构单元周期对

滤色效果影响小,透射曲线的共振峰基本不发生变化。

所提模型是基于纳米结构的等离子颜色滤波器,十字圆环结构的尺寸影响着透射率、FWHM、谐振品质因数。如图 4(a) 所示,当十字架宽度 B_1 以 6 nm 的步长从 100 nm 增加到 160 nm 时,共振峰在 534~537 nm 范围内移动,透射率由 61.1% 增加到 74.1%,FWHM 的最小值为 33.30 nm。最终设置本模型的十字架宽度 B_1 为 154 nm。如图 4(b) 所示,当圆环宽度 R_1 以 5 nm 的步长从 20 nm 变化到 45 nm 时,共振峰在 534~537 nm 的范围内移动,透射率由 89.2% 减少到 71.7%,FWHM 的最小值为 36.00 nm,共振波长随着圆环宽度的变化而变化。为了保持高透射率,设置本模型的圆环宽度 R_1 为 20 nm。在保持高透射率的条件下,将 FWHM 控制在 40.00 nm 以内,这使得所设计的颜色滤波器在不同结构参数的条件下依旧保持优秀的滤色效果,且能在可见光波段内对颜色进行选择。

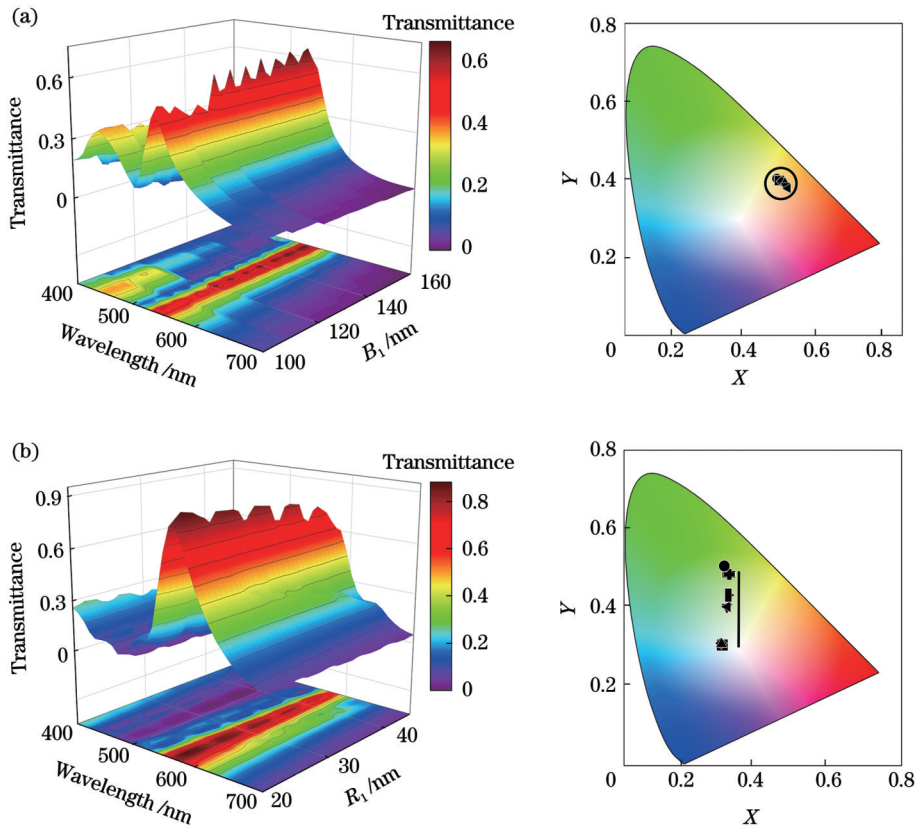


图 4 十字架宽度 B_1 和圆环宽度 R_1 变化时所对应颜色滤波器的透射光谱及其色度图。(a) 十字架宽度 B_1 ; (b) 圆环宽度 R_1

Fig. 4 Transmission spectra and chromaticity diagrams of color filter corresponding to variation of cross width B_1 and ring width R_1 .

(a) Cross width B_1 ; (b) ring width R_1

偏振敏感的纳米结构对滤光性能以及颜色清晰度会造成影响,研究偏振角度对滤光效果的影响。在偏振不敏感的特性研究中主要是对平坦色散特性进行研究,结构的色散表达式可等效为

$$k_{spp} = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}}, \quad (4)$$

式中: k_{spp} 为表面等离子体波的波矢; $k_0 = \omega/c$ 为真空

中光的波矢,其中 ω 为角频率, c 为真空中光速; ϵ_d 为介质的相对介电常数; ϵ_m 为金属的相对介电常数。在 $W_1=400$ nm、 $L_1=380$ nm、偏振角以 15° 的步长从 0 变化到 90° 的情况下,模型的透射率变化结果如图 5(a) 所示。随着偏振角的增加,模型的透射率从 84.0% 下降到 62.5% ,共振峰在 $554\sim 556$ nm 范围内移动。另外还模拟在 $W_1=430$ nm、 $L_1=390$ nm 条件下,透射率随

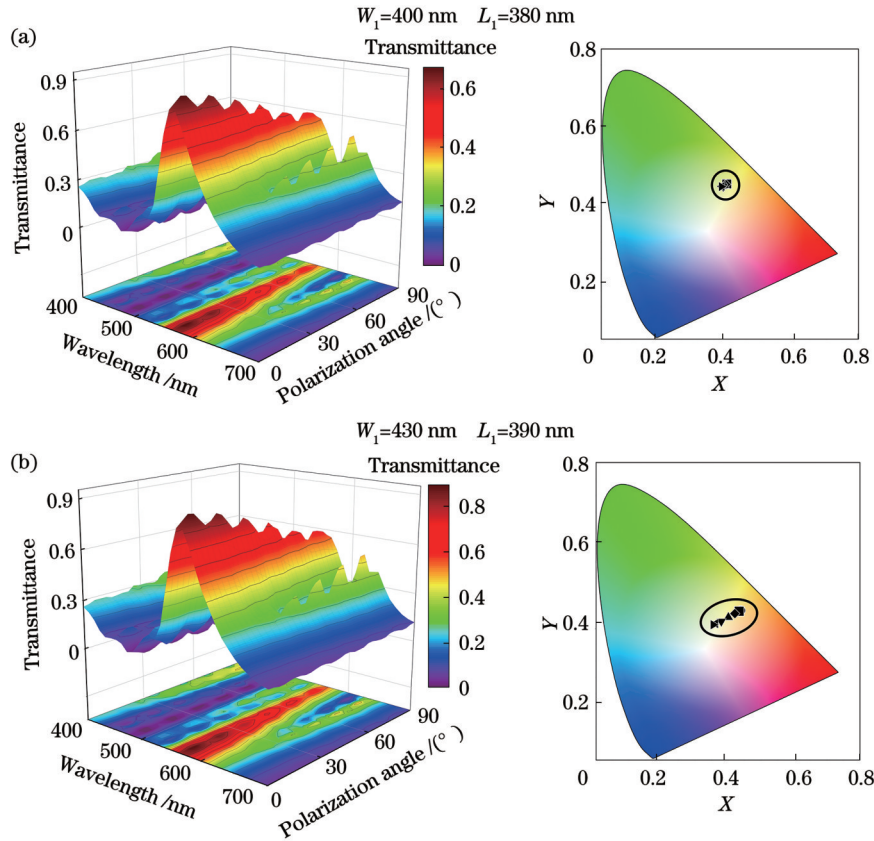


图 5 不同结构周期下偏振角变化时所对应颜色滤波器的透射光谱及其色度图。(a) $W_1=400\text{ nm}$, $L_1=380\text{ nm}$; (b) $W_1=430\text{ nm}$, $L_1=390\text{ nm}$

Fig. 5 Transmission spectra and chromaticity diagrams of color filter corresponding to variation of polarization angle under different structural periods. (a) $W_1=400\text{ nm}$, $L_1=380\text{ nm}$; (b) $W_1=430\text{ nm}$, $L_1=390\text{ nm}$

偏振角变化的情况,结果如图 5(b)所示。随着偏振角的增加,模型的透射率从 90.5% 下降到 62.6%,共振峰在 559~567 nm 范围内移动。与图 5(a)相比,图 5(b)的色度坐标点更加分散,但移动范围仍然较小,这表明不同周期下所提模型仍能保持较好的偏振不敏感特性。

以上的仿真结果均是在光线垂直入射的条件下完成的,在实际应用中还应考虑不同入射角度下颜色滤波器的滤色效果。因此,模拟了入射角在 0~90° 范围内时透射光谱的变化情况。由图 6 可知,当入射角在

0~30° 范围内时,透射率能够维持在 50.0% 以上,共振峰在 500 nm 处小范围移动。

为了进一步证明本颜色滤波器的优势,与现有的颜色滤波器进行对比,各种颜色滤波器的透射率、FWHM 和谐振品质因数等参数如表 1 所示。由表 1 可知,与其他参考文献提出的颜色滤波器相比,所提颜色滤波器具有更高的透射率和更小的 FWHM,可以实现在可见光波段对单一波长光的选择。

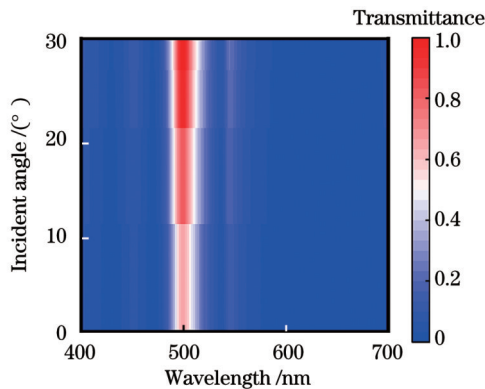


图 6 入射角度在 0~30° 的透射率谱图

Fig. 6 Transmittance spectrum for incident angle from 0 to 30°

表 1 各种颜色滤波器的性能比较

Table 1 Performance comparison of various color filters

Reference	Transmittance /%	FWHM /nm	Q
[22]	87.9	55.00	10.00
[23]	72.0	>50.00	<12.00
[24]	80.0	40.00	11.00
[25]	69.0	100.00	5.50
[26]	60.0	110.00	5.10
[27]	65.0	>50.00	<10.00
This study	73.0	23.26	20.59
	90.5	65.00	8.72

4 结 论

提出了一种偏振不敏感且高选择性的颜色滤波器。通过时域有限差分法(FDTD)数值模拟,研究了十字圆环双层亚表面结构,并将其与单层等离子体结构进行对比。结果显示,双层亚表面结构与介质的组合能够得到较高的透射率和较小的 FWHM。因此,该颜色滤波器不仅具有更鲜艳的颜色,而且具有很强的抗干扰性。此外,该滤波器与图像传感器的应用相匹配。在偏振光的角度从 0 变化到 90° 时,模拟透射光谱的共振峰位置几乎没有变化,色度坐标点的变化范围也很小。这表明该滤波器具有偏振不敏感的特性,扩展了其在结构色彩显示领域的应用。

参 考 文 献

- [1] Isapour G, Lattuada M. Bioinspired stimuli-responsive color-changing systems[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(19): e1707069.
- [2] Yang B, Liu W W, Li Z C, et al. Ultrahighly saturated structural colors enhanced by multipolar-modulated metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(7): 4221-4228.
- [3] Zhao Y Q, Zhao Y, Hu S, et al. Artificial structural color pixels: a review[J]. *Materials*, 2017, 10(8): 944.
- [4] Hwang S H, Zhao Z J, Jeon S, et al. Repeatable and metal-independent nanotransfer printing based on metal oxidation for plasmonic color filters[J]. *Nanoscale*, 2019, 11(23): 11128-11137.
- [5] Lee G Y, Yoon G, Lee S Y, et al. Complete amplitude and phase control of light using broadband holographic metasurfaces[J]. *Nanoscale*, 2018, 10(9): 4237-4245.
- [6] Shrestha V R, Lee S S, Kim E S, et al. Polarization-tuned dynamic color filters incorporating a dielectric-loaded aluminum nanowire array[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 12450.
- [7] Gramotnev D K, Bozhevolnyi S I. Plasmonics beyond the diffraction limit[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4: 83-91.
- [8] 苏思华, 王开阳, 肖淑敏, 等. 基于双光子聚合 3D 打印技术的结构色研究进展[J]. *中国激光*, 2023, 50(18): 1813007.
Su S H, Wang K Y, Xiao S M, et al. Advances in structural color research based on two-photon polymerization 3D printing technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(18): 1813007.
- [9] 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.
- [10] Wood R W. On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum[J]. *Proceedings of the Physical Society of London*, 1902, 18(1): 269-275.
- [11] Xu J Y, Zhuang X J, Guo P F, et al. Wavelength-converted/selective waveguiding based on composition-graded semiconductor nanowires[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(9): 5003-5007.
- [12] Walia J, Dhindsa N, Khorasaninejad M, et al. Color generation and refractive index sensing using diffraction from 2D silicon nanowire arrays[J]. *Small*, 2014, 10(1): 144-151.
- [13] Gildas F, Dan Y P. Review of nanostructure color filters[J]. *Journal of Nanophotonics*, 2019, 13(2): 020901.
- [14] 顾佳美, 张思琦, 周虹邑, 等. 基于亚波长光栅微结构的大角度容忍颜色滤波器[J]. *量子电子学报*, 2018, 35(5): 636-640.
Gu J M, Zhang S Q, Zhou H Y, et al. Angle-insensitive color filter based on sub-wavelength grating microstructure[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2018, 35(5): 636-640.
- [15] Wang J, Shi R Y, Tang L L, et al. Ultrathin bimetal color filter based on plasmonic nanostructure[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2019, 19(1): 176-180.
- [16] Wang Y H, Jiang L F, Li X H. Mimicking the structure of Morpho butterfly wing surface: a highly reflective nanostructure assembled by nanospheres[J]. *Journal of Nanophotonics*, 2022, 16(4): 046005.
- [17] 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 plasmonic waveguide[J]. *Guangxi Physics*, 2022, 43(4): 6-12.
- [18] 肖功利, 陈剑云, 杨宏艳, 等. 全介质圆环-纳米棒结构宽色域颜色滤波器[J]. *光学学报*, 2022, 42(19): 1923001.
Xiao G L, Chen J Y, Yang H Y, et al. Wide-gamut color filter using all-dielectric ring-nanorod structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(19): 1923001.
- [19] Moon Y G, Do Y S, Lee M H, et al. Plasmonic chromatic electrode with low resistivity[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 15206.
- [20] Kim J Y, Lee S H, Do Y S. Optimized structure for a moisture-sensitive colorimetric sensor utilizing photonic crystals based on a metal-organic framework[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 85483-85491.
- [21] Han J H, Kim D, Lee T W, et al. Color purifying optical nanothin film for three primary colors in optoelectronics[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(8): 3322-3330.
- [22] Ren S X, Zhou L, Yang J P, et al. Broad palettes of polarizing structural color filter based on subwavelength metallic nanograting[J]. *Plasmonics*, 2021, 16(1): 167-173.
- [23] Dai P, Wang Y S, Zhu X P, et al. Transmissive structural color filters using vertically coupled aluminum nanohole/nanodisk array with a triangular-lattice[J]. *Nanotechnology*, 2018, 29(39): 395202.
- [24] Song C, Feng Y, Bao Z Y, et al. Angle-insensitive color filters based on multilayer ultrathin-film structures[J]. *Plasmonics*, 2020, 15(1): 255-261.
- [25] Rehan S, Daud K A, AlHarbi Fatemah F, et al. Optical transmission plasmonic color filter with wider color gamut based on X-shaped nanostructure[J]. *Photonics*, 2022, 9(4): 209.
- [26] Yokogawa S, Burgos S P, Atwater H A. Plasmonic color filters for CMOS image sensor applications[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(8): 4349-4354.
- [27] Zeng B B, Gao Y K, Bartoli F J. Ultrathin nanostructured metals for highly transmissive plasmonic subtractive color filters [C]//2014 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)-Laser Science to Photonic Applications, June 8-13, 2014, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2014.

Polarization-Insensitive Highly Selective Color Filter

Xiao Gongli¹, Li Miao¹, Yang Hongyan^{2*}, Wang Bowen¹, Zhang Jiarong¹, Chen Kang¹,
Liu Xingpeng¹

¹Key Laboratory of Microelectronic Devices and Integrated Circuits of Guangxi Colleges, School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;

²School of Optoelectronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China

Abstract

Objective Color filters are often made of thin films or dye coatings, but are limited by optical diffraction restrictions, they have low resolution and are sensitive to high temperatures and prolonged ultraviolet (UV) ray exposure. Meanwhile, microstructure-based color filters are more adaptable under application scenarios since they may get the necessary light wavelengths by modifying structural or material factors. Microstructure-based color filters have the advantages of stable performance, tunability, and manufacturability over conventional color filters. Additionally, they are usually made of inorganic or high-temperature durable materials, which have a longer service life with extensive applications in many fields, such as complementary metal oxide semiconductor (CMOS) image sensors, liquid crystal screens, and pixel development.

Methods A top double-layer cross circle and a bottom buffer layer comprise the color filter presented in our study. The metal Al and the hydrogen silsesquioxane (HSQ) polymers make up the double-layer cross circle. The bottom is made up of three dielectric layers: a buffer layer of TiO_2 , a waveguide layer of Al_2O_3 , and a substrate layer of SiO_2 . The finite difference time domain (FDTD) method is adopted to conduct a comparative investigation into the transmission spectra and color display patterns of four different structural filters. The effects of the structural period, cross ring diameter, cross width, and polarization angle on the transmission spectra and filtering characteristics are also examined.

Results and Discussions Compared to single-layer construction, the designed color filter using a double-layer cross circle structure has a greater transmittance and reduced full width at half maximum (FWHM). The filter can achieve high transmittance of up to 90.5% at vertical incidence [Fig. 5(b)] and the minimum FWHM at the structural period is $L_1 = W_1 = 360$ nm [Fig. 1(a)]. Meanwhile, the resonance wavelength of the transmission peak remains essentially constant over the polarization range of 0–90° (Fig. 5), and the transmittance remains above 50 when the angle of incidence is varied from 0 to 30° (Fig. 6).

Conclusions We propose a polarization-insensitive and highly selective color filter. FDTD numerical simulation is adopted to investigate and compare the cross ring double-layer subsurface structure to the single-layer plasmonic structure. The results show that combining the double-layer subsurface structure with the dielectric can result in a higher transmittance and narrower FWHM, thus leading to a more effective color selection in the visible wavelength range and robust interference resistance. When the angle of the polarized light is changed from 0 to 90°, the resonance peak position of the simulated transmission spectrum varies somewhat, and the accompanying chromaticity coordinate point moves within a small range. This means that the output properties of the filter are consistent across polarization angles, allowing the filter to be employed in structural applications.

Key words optics at surfaces; high transmission efficiency; polarization insensitivity; high selectivity; double-layer plasma; visible light