

基于矩形金属块阵列结构的等离子体颜色滤波器

肖功利¹, 杨寓婷¹, 杨宏艳^{2,3*}, 张开富¹, 曾丽珍⁴, 李海鸥¹, 刘兴鹏¹, 傅涛¹

¹桂林电子科技大学广西精密导航技术与应用重点实验室, 广西 桂林 541004;

²桂林电子科技大学广西自动检测技术与仪器重点实验室, 广西 桂林 541004;

³桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;

⁴桂林电子科技大学研究生院, 广西 桂林 541004

摘要 设计了一种基于矩形金属块阵列结构的等离子体颜色滤波器,该器件结合表面等离子体共振效应与平板波导的导波特性和非对称矩形金属块周期性阵列结构对入射光偏振敏感的特点,在可见光波段实现对透射谱的动态调控。采用时域有限差分法研究了阵列周期、填充因子、电介质层与金属层厚度、入射光偏振角等参数对透射谱及其滤色特性的影响。结果表明,通过改变矩形金属块阵列周期参数可静态调控透射谱;矩形金属块阵列周期不对称时,通过改变入射光偏振角可对透射谱进行动态调控。通过调节结构参数,得到滤波器在可见光范围内的透射率可高达 75%,且可同步实现对滤出颜色的静态和动态调控。该研究为下一代颜色可调谐等离子体颜色滤波器的设计提供理论依据。

关键词 衍射; 颜色滤波器; 表面等离子体; 平板波导; 矩形金属块阵列; 时域有限差分法

中图分类号 TN256

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0905002

Plasmonic Color Filter Based on Rectangular Metal Block Array Structure

Xiao Gongli¹, Yang Yuting¹, Yang Hongyan^{2,3*}, Zhang Kaifu¹, Zeng Lizhen⁴, Li Haiou¹,
Liu Xingpeng¹, Fu Tao¹

¹Guangxi Key Laboratory of Precision Navigation Technology and Application, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

²Guangxi Key Laboratory of Automatic Detecting Technology and Instruments, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

³School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

⁴Graduate School, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract In this paper, a plasmonic color filter based on a rectangular metal block array structure is designed. The

收稿日期: 2020-09-11; 修回日期: 2020-09-22; 录用日期: 2020-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(61765004, 61465004, 61874036)、广西自然科学基金项目(2017GXNSFAA198164, 2016GXNSFAA380006)、桂林电子科技大学研究生教育创新计划资助项目(2019YCX028, 2021YCX040)、广西精密导航技术与应用重点实验室基金资助(DH201907, DH202006)、广西自动检测技术与仪器重点实验室基金资助(YQ20115, YQ18110)

*E-mail: yhy.glt@126.com

device combines the surface plasmon resonance effect with the guided wave characteristics of planar waveguides, and realizes the dynamic control of transmission spectra in the visible light band by using the polarization sensitivity of the asymmetric rectangular metal block periodic array structure for the incident light. The effects of the array period, filling factor, thickness of dielectric and metal layers, and polarization angle of incident light on transmission spectra and color filtering characteristics are studied by using the finite difference time domain method. The results show that the transmission spectra can be adjusted statically by changing the period parameters of the rectangular metal block array and can be controlled by dynamically changing the polarization angle of the incident light when the period of the rectangular metal block array is asymmetric. By adjusting the structural parameters, the transmittance of the filter can be as high as 75% in the visible light range, and the static and dynamic control of the filtered color can be realized simultaneously. This research provides a theoretical basis for the design of next-generation color-tunable plasmonic color filters.

Key words diffraction; color filter; surface plasmon; slab waveguide; rectangular metal block array; finite difference time domain method

OCIS codes 050.6624; 080.1238; 240.0310; 240.5440

1 引言

结构色是通过物体的微结构对可见光进行衍射、反射、散射后表现出的色彩。Hooke^[1]首次提出结构色概念,研究人员 Faraday^[2-3]和 Mie^[4]对金属微粒色彩生成机理进行分析,Ebbesen 教授揭示了表面等离激元在光的异常透射现象中的作用,这些研究都促使了人工制造的金属微纳结构滤波器成为产生结构色的主要器件^[5]。表面等离激元具有良好的局域特性^[6],并且能够有效克服传统光学存在衍射极限的缺点^[7-8],提高器件成像分辨率。结构色滤波器具有控制表面等离激元的能力,在节能显示器、超高灵敏度生物传感器、超高分辨率成像等方面具有巨大的应用前景。

人工制造的结构色滤波器结构繁多,如金属-电介质-金属(MIM)结构^[9]、纳米孔结构^[10-11]、纳米棒阵列结构^[12-15]、纳米光栅结构^[16-18]、纳米盘-纳米孔洞复合结构^[19-20]等,但其大部分仅局限于静态调控。近年来,随着动态显示、密码学以及安全防伪技术的发展以及对动态调控的迫切需求,无需外加电源、能动态调控颜色的滤波器成为近年来的研究热点和众多研究团队关注的重点。2012年 Park 等^[21]提出了一种包含对称金属-电介质谐振结构的颜色滤波器,该小组研究了金属光栅周期与滤出颜色的关系以及入射光偏振对滤色的影响,从理论与实验上证明了该滤波器对入射光偏振不敏感且能实现全光调控的功能。Ellenbogen 等^[22]与 Li 等^[23]分别设计了由十字纳米盘阵列结构与十字纳米孔阵列结构组成的颜色滤波器,利用

阵列对入射光偏振敏感的特性,实现了部分可见光谱的动态调控。2015年 Raj Shrestha 等^[24]提出了一种由 Al 纳米线阵列组成的反射式颜色滤波器,通过调节纳米线阵列的周期与入射极化实现动态滤色,从而获得了包括青色、品红色和黄色在内的多种颜色。2017年 Koirala 等^[25]通过优化结构参数,克服了一维光栅在 TE 偏振下的低透射率及高反射性,设计了由一维光栅组成的透射式动态可调颜色滤波器,有效实现了入射光偏振调控滤色功能。2019年 Jia 等^[26]讨论了多种孔洞阵列结构的滤色特性以及偏振光调色特性,这可为设计理想的有源彩色滤光器提供参考。虽然以上报道的颜色滤波器均通过改变入射光偏振角实现了对透射谱的动态调控的功能,在滤色性能上具有一定的优势,但其单色性差、饱和度低、动态调色的色域不广、TE 偏振态颜色不易控制等局限性,极大地限制了其在高分辨、高对比度显示领域的应用^[27]。

基于以上研究背景,本文设计了一种新颖的矩形金属块阵列结构的等离子体颜色滤波器。利用周期不对称矩形金属块对入射光偏振敏感的特性,通过调控结构周期以及入射光偏振角,有效克服了单色性差、光谱透射率低、动态调色的色域不广等缺点,有效实现了可见光范围内对透射谱的动态调控。本研究结果可为实现各种可调谐等离子体颜色滤波器提供新思路,其在安全防伪、动态显示以及光学数据存储等方面具有潜在的应用价值。

2 结构设计、计算方法与滤波机理

图 1(a)所示为一种矩形金属块阵列结构的等离体颜色滤波器的三维结构示意图。其中 E 、 H 、 K 分别表示电场矢量、磁场矢量和波矢,入射光偏振通过磁场矢量(H)相对于 x 方向的对准角度来描述, TM、TE 偏振可表示为分别沿 x 方向($\varphi=0^\circ$)和 y 方向($\varphi=90^\circ$)的 H 场。该滤波器结构分为三层,由上到下依次为矩形金属块阵列、电介质层和波导层。其中各层材料参数值如下:波导层材料采用 Si_3N_4 ,厚度为 H_1 ;电介质层材料为 MgF_2 ,厚度为 H_2 ;金属材料选择在可见光波段具有较小损耗的 Al,其厚度为 H_3 。 P_x 与 P_y 分别为矩形金属块阵列 x 与 y 方向的周期, D_x 与 D_y 分别为矩形金属块 x 与 y 方向的长度,矩形金属块阵列填充因子由金

属块边长与对应方向周期的比值决定, x 方向的填充因子 $f_x=D_x/P_x$, y 方向的填充因子 $f_y=D_y/P_y$ 。采用基于时域有限差分算法的 Lumerical FDTD Solutions 商业软件对矩形金属块阵列结构的光学特性进行研究。仿真时金属材料 Al 的折射率 n 、消光系数 k 来自文献[28], Si_3N_4 和 MgF_2 的折射率分别为 2.0 和 1.38。以单个矩形金属块结构为模拟周期,将仿真区域的 x 方向与 y 方向设置为周期边界条件, z 方向设置为完美匹配层(PML)。为了提高仿真精度,在进行收敛性测试后设定网格大小为 $\Delta x=\Delta y=5\text{ nm}$, $\Delta z=2\text{ nm}$ 。平面光源沿 z 轴从上到下垂直入射(K 为波矢),电场强度 E 和磁场强度 H 分别沿 x 轴和 y 轴方向,在研究结构参数对透射谱的影响时,设置周围电介质为空气(折射率为 1)。

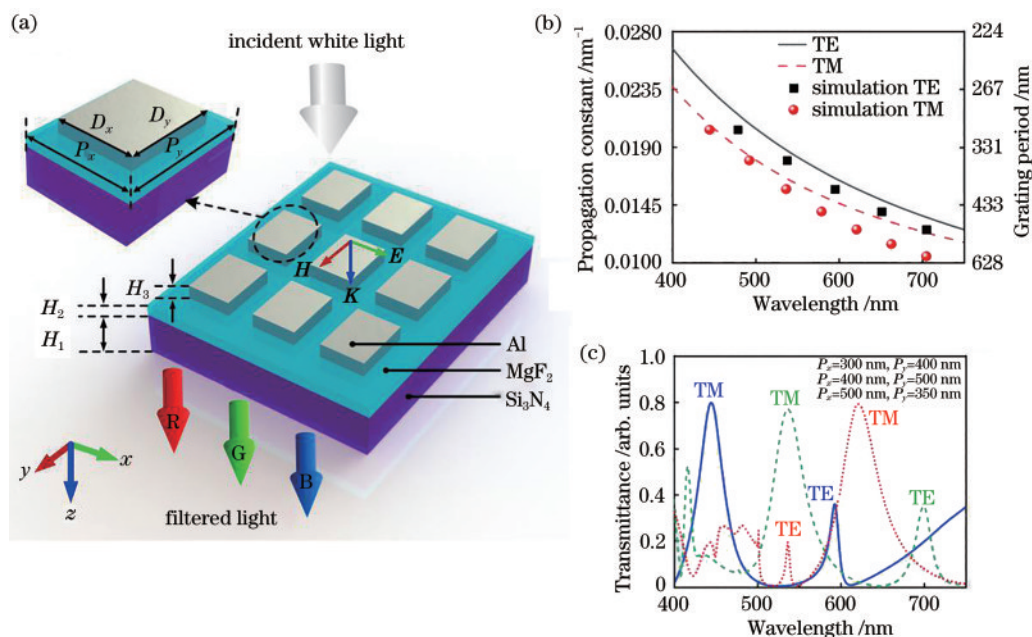


图 1 一种基于矩形金属块阵列结构的颜色滤波器及其色散关系和透射谱。(a)三维结构示意图;(b)由 MgF_2 、 Si_3N_4 和空气组成的非对称波导膜 TM/TE 波导模式的色散曲线;(c)在 $P_x=300\text{ nm}$ 、 $P_y=400\text{ nm}$ 、 $P_x=400\text{ nm}$ 、 $P_y=500\text{ nm}$ 、 $P_x=500\text{ nm}$ 、 $P_y=350\text{ nm}$ 条件下的透射谱图

Fig. 1 Color filter based on rectangular metal block array structure, and its dispersion relationship and transmission spectra. (a) Three-dimensional structural diagram; (b) dispersion curve of TM/TE waveguide mode for asymmetric waveguide film composed of MgF_2 , Si_3N_4 , and air; (c) transmission spectra for conditions: $P_x=300\text{ nm}$, $P_y=400\text{ nm}$; $P_x=400\text{ nm}$, $P_y=500\text{ nm}$; $P_x=500\text{ nm}$, $P_y=350\text{ nm}$

本文所设计的滤波器是通过 Al 矩形金属块阵列结构对光的衍射和电介质波导的导模共振 (GMR) 效应共同作用来实现滤色功能。Al 矩形金属块阵列结构将对特定波长的光进行衍射,并将其有效地耦合到由 Si_3N_4 膜组成的波导中,使其与波导

的导模产生共振。耦合光在波导中传播,受到金属块阵列的反射和衍射,并向下辐射到远场,从而实现在特定共振波长下的滤色效果。通过求解非对称膜波导的本征模方程,得到非对称膜波导的色散特性和传播特性^[21]:

$$(k_0^2 n_2^2 - \beta^2)^{\frac{1}{2}} H_1 = m\pi + \arctan \left[\left(\frac{n_2}{n_1} \right)^{2\rho} \times \left(\frac{\beta^2 - k_0^2 n_1^2}{k_0^2 n_2^2 - \beta^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] + \arctan \left[\left(\frac{n_2}{n_3} \right)^{2\rho} \times \left(\frac{\beta^2 - k_0^2 n_3^2}{k_0^2 n_2^2 - \beta^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right], \quad (1)$$

式中： β 为传播系数， $\beta = 2\pi/p$ (p 为光栅周期)时 TM/TE 波导模式被激发。 $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ (λ_0 为自由空间中的波长)为自由空间中的波数； $H_1 = 100$ nm 为 Si_3N_4 波导的厚度； m 为模数，经计算得出 m 取值为 0； $n_1 = 1.38$ 、 $n_2 = 2.0$ 、 $n_3 = 1$ 分别为 MgF_2 、 Si_3N_4 和空气的折射率；TM 和 TE 波导模式分别由 $\rho = 1$ 和 $\rho = 0$ 表示。图 1(b) 所示为本文计算得到的非对称膜波导色散曲线图，其中实线与虚线分别代表 TE 和 TM 波导模式下的色散曲线，方形与圆球分别代表 TE 和 TM 波导模式下的模拟值，可以看出模拟值与色散曲线吻合得较好，从而可利用色散曲线预测该结构在不同阵列周期下滤波的峰值。由于滤波器光栅为矩形金属块，因此任意偏振都能激发 TE 与 TM 波导模式^[21]。图 1(c) 所示为入射光为 TM 偏振光且矩形金属块阵列周期 $P_x \neq P_y$ 时，模拟得到三种条件 ($P_x = 300$ nm, $P_y = 400$ nm; $P_x = 400$ nm, $P_y = 500$ nm; $P_x = 500$ nm, $P_y = 350$ nm) 下的透射谱。其中每一条透射谱都有一个主峰和一个副峰，分别与图 1(b) 中 TM、TE 波导模式的模拟值一一对应。主峰峰值是由 TM 波导模式共振产生，为所需要的共振峰；副峰是由 TE 波导模式共振产生，随着周期的增加，透射谱波峰随之红移，该现象与色散曲线相吻合。TM 偏振和 TE 偏振分别指 H 场沿 x 方向 ($\varphi = 0^\circ$) 与 y 方向 ($\varphi = 90^\circ$) 的偏振模式，而对于其他特定的偏振角度，透射率可表示为

$$T_\varphi(\lambda) = T_0(\lambda)\cos^2\varphi + T_{90}(\lambda)\sin^2\varphi, \quad (2)$$

式中： φ 为偏振角； λ 为自由空间的光波长； T_0 和 T_{90} 分别表示入射光偏振角为 $\varphi = 0^\circ$ 和 $\varphi = 90^\circ$ 时的透射率。当 $\varphi = 0^\circ$ 时， $\sin^2\varphi = 0$ ， $\cos^2\varphi = 1$ ，因此 $T_\varphi(\lambda) = T_0(\lambda)$ ；当 $\varphi = 90^\circ$ ， $T_\varphi(\lambda) = T_{90}(\lambda)$ ；当 $0^\circ < \varphi < 90^\circ$ ， $\sin^2\varphi$ 与 $\cos^2\varphi$ 的值在 0 到 1 之间。由此可知，其他任意 φ 下所滤出的颜色由偏振角 $\varphi = 0^\circ$ 和 $\varphi = 90^\circ$ 时滤出的颜色以一定比例混合而成，而该比例取决于 φ ，即 $\sin^2\varphi$ 与 $\cos^2\varphi$ 的值。由以上输出关系式可看出，通过改变 φ ，能够调控输出的颜色，其他任意 φ 下输出的颜色都为 $\varphi = 0^\circ$ 和 $\varphi = 90^\circ$ 所输出颜色之间的过渡色。为了更加直观地看出色彩的变化，将透射谱图对应到 CIE1931 色度坐标图上，对应的坐标点可表示为^[13]

$$\begin{cases} X = A \sum_{\lambda} S(\lambda) P(\lambda) \bar{x}(\lambda) \\ Y = A \sum_{\lambda} S(\lambda) P(\lambda) \bar{y}(\lambda) \\ Z = A \sum_{\lambda} S(\lambda) P(\lambda) \bar{z}(\lambda), \end{cases} \quad (3)$$

$$A = \frac{100}{\sum_{\lambda} P(\lambda) \bar{y}(\lambda)}$$

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, \quad (4)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}, \quad (5)$$

式中： $S(\lambda)$ 为传输光谱的反射率或者透射率； $P(\lambda)$ 为光源的光谱功率； A 为归一化因子； $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 为标准三色刺激值，即色彩匹配函数； X 、 Y 、 Z 为所求取三色刺激值。在波长 λ 为 400~750 nm 时，以 1 nm 间隔取值，利用所求取三色刺激值 X 、 Y 、 Z 和 (4)、(5) 式计算出 CIE1931 色度坐标 x 与 y 。通过 CIE1931 色度坐标图可方便地将颜色信息如色彩亮度、色彩饱和度等以及颜色变化趋势进行可视化显示分析，从而有利于滤色结构设计者对结构进行优化设计、分析及调试。

3 结果与讨论

对于对称矩形金属块阵列结构组成的颜色滤波器，Tan 等^[20]进行了详细的研究并通过实验证明该滤波器对偏振不敏感，他们只是通过改变周期大小进行颜色调控。为了实现颜色滤波器的动态调控功能，本文主要探讨了由非对称矩形金属块阵列结构组成的颜色滤波器。首先讨论了在 TM 入射光偏振下， $P_x = 400$ nm、 $P_y = 300$ nm 时颜色滤波器的结构参数 H_1 、 H_2 、 H_3 、 f_x 、 f_y 对透射谱的影响。图 2(a) 所示为当 $H_2 = 25$ nm、 $H_3 = 40$ nm、 $f_x = f_y = 0.7$ 时， Si_3N_4 波导层的厚度 H_1 为 60~140 nm 时的透射谱， H_1 的变化步长为 20 nm。其中 peak 1 为主峰，是由 TM 波导模式共振所产生；peak 2 为副峰，是由 TE 波导模式共振产生。从图 2(a) 中观察到，随着 H_1 的增加，透射谱红移。该现象可由 (1) 式进行说明，当周期 P 固定， β 值确定，随着 H_1 的增加， k_0 减小，而自由空间中的波长 λ_0 随 k_0 的减小而增大，从而产生了红移现象，为了明确给出光谱形状和增强的性能，文

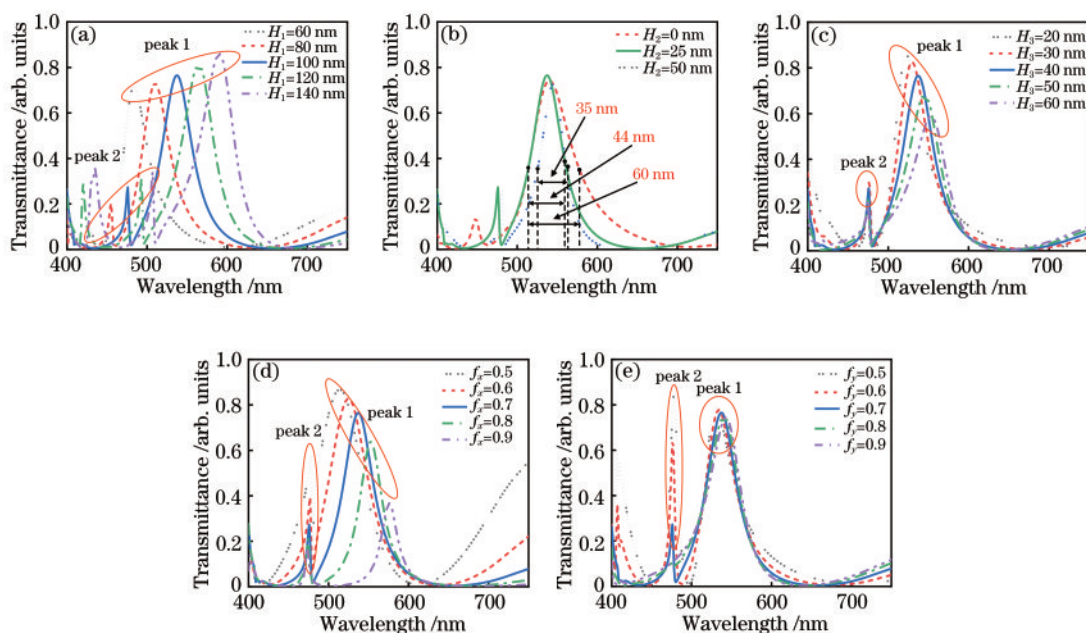


图 2 在 TM 偏振态下, $P_x=400$ nm、 $P_y=300$ nm 时颜色滤波器结构参数 H_1 、 H_2 、 H_3 、 f_x 、 f_y 的变化对透射谱的影响。(a) H_1 为 60~140 nm; (b) H_2 为 0~50 nm; (c) H_3 为 20~60 nm; (d) $f_y=0.7$ 时, f_x 为 0.5~0.9; (e) $f_x=0.7$ 时, f_y 为 0.5~0.9

Fig. 2 Effects of color filter structural parameters H_1 , H_2 , H_3 , f_x , and f_y on transmission spectra for TM polarization state, $P_x=400$ nm, and $P_y=300$ nm. (a) H_1 is 60–140 nm; (b) H_2 is 0–50 nm; (c) H_3 is 20–60 nm; (d) when $f_y=0.7$, f_x is 0.5–0.9; (e) when $f_x=0.7$, f_y is 0.5–0.9

中在讨论其他参数时将 H_1 设置为 100 nm。图 2(b) 为 $H_1=100$ nm、 $H_3=40$ nm、 $f_x=f_y=0.7$ 时, MgF₂ 电介质层厚度 H_2 为 0, 25, 50 nm 时的透射谱, 对应透射谱的波峰的半峰全宽 (FWHM) 分别为 60, 44, 35 nm。由此可知, 随着 H_2 的增加, 透射谱的半峰全宽变窄, 这种现象可用金属谐振波导光栅理论来解释: 随着电介质层厚度的减小, 金属波导模的损耗增加, 则谐振品质因数减小, 这导致了更宽的谐振带宽^[18]。经过综合考虑, 本文中选取透射谱半峰全宽相对窄且透射率最高时对应的 H_2 值 (25 nm)。图 2(c) 为 $H_1=100$ nm、 $H_2=25$ nm、 $f_x=f_y=0.7$ 时, 金属 Al 层厚度 H_3 为 20~60 nm 的透射谱, 随着 H_3 以 10 nm 的步长增加, peak 1 红移且峰值减小。产生这种变化的原因是光场在金属光栅狭缝以驻波状分布, 驻波的波长与入射光的波长呈线性关系, 当光栅厚度一定且驻波波长与光栅厚度满足一定的匹配条件时, 随着光栅厚度的增大, 能与之匹配的驻波波长增大, 入射光波长也随之增大, 从而导致光谱图上峰值波长红移^[29]。当光栅厚度与驻波波长满足 $mD_{\text{ht}} = h + \Delta$ (m 为常数, D_{ht} 为透射率极大值随光栅厚度变化的周期, Δ 为常量) 时, 透射率最大, 当不满足此关系时, 透射谱峰值会降低甚至透射谱峰消失^[29], 由此可以解释 peak 1 峰值随光栅厚度的增加而减小的现象。

为了保证 peak 1 对应较高的透射率的同时旁带透射率较低, 在讨论其他参数时将 H_3 定为 40 nm。图 2(d) 为 $H_1=100$ nm、 $H_2=25$ nm、 $H_3=40$ nm、 $f_y=0.7$ 时, x 方向填充因子 f_x 为 0.5~0.9 的透射谱。随着 f_x 的增加, 图中透射谱 peak 1 红移且峰值逐渐降低; peak 2 峰值略有降低, 其共振波长不变。这主要是由于金属具有不透光性, 当填充因子 f_x 增加时, 光透过量减小, 导致光谱峰值减小。图 2(d) 中 peak 1 由 TM 波导模式共振产生, 而 peak 2 由 TE 波导模式共振产生。当入射光采用 TM 偏振光时, TM 波导模式被激发到 x 方向, 因此 x 方向的填充因子变化对 peak 1 的影响更大, 这种变化在图 2(d) 中能明显观察到。为了保证透射谱在具有高透射率的同时也有高的颜色纯度, 旁带透射率以及 peak 2 的透射率需要低于 0.3, 因此文中在讨论其他参数时, 令 f_x 的取值为 0.7。图 2(e) 为 $H_1=100$ nm、 $H_2=25$ nm、 $H_3=40$ nm、 $f_x=0.7$ 时, y 方向的填充因子 f_y 为 0.5~0.9 时的透射谱。随着 f_y 的增加, peak 1 基本无变化, peak 2 峰值随之降低, 最后 peak 2 消失。由此可见, 填充因子 f_x 是一个能够有效调控共振峰 peak 1 的重要参数, 而填充因子 f_y 是能够调控 peak 2 的重要参数。填充因子的选取对共振峰峰值有较大影响: 填充因子太小时会有高的旁带透射率; 而填充因子太大时

虽旁带会被抑制,但会导致透射谱峰值显著降低。综上所述,为了保证入射光为TE偏振光时依然有高的透射率以及低的旁带透射率,在文中讨论其他参数时令 $f_y=f_x=0.7$ 。

图3给出了三种不同尺寸的矩形块阵列滤波器在不同偏振角度入射光时的滤色特性,图3(a)为 $P_x=300\text{ nm}$ 、 $P_y=400\text{ nm}$ 时, φ 以 22.5° 的步长从 0° 增加到 90° 的透射谱图。随着 φ 的增加,445 nm波长处的波峰逐渐降低,538 nm波长处出现新的波峰并逐渐增大,当 φ 增加到 90° 时445 nm波长处的波峰完全消失,而538 nm波长处的波峰达到最大值。由透射谱图中波峰的变化可以看出颜色的变化,更直观的变化可以从图3(a)对应的CIE1931色度坐标[图3(b)]中观察到,图3(b)中所有CIE坐标点均

在同一直线上,可看出颜色随着 φ 的变化而变化的趋势。当入射光为TM偏振光($\varphi=0^\circ$)时,TM波导模式被激发到 x 方向进行传播,其透射谱与滤出颜色主要由 P_x 决定;入射光为TE偏振光($\varphi=90^\circ$)时,TM波导模式被激发到 y 方向上,其透射谱与滤出颜色主要由 P_y 决定,因此,在 $P_x \neq P_y$ 的条件下,滤波器对入射光偏振敏感。透射谱所产生的变化可结合(2)式来说明:其他任意 φ 下所滤出的颜色均为 $\varphi=0^\circ$ 和 $\varphi=90^\circ$ 时所输出颜色之间的过渡色,即TM和TE入射光偏振下滤出颜色以一定比例混合而成。随着 φ 的增大, $\varphi=0^\circ$ 时所输出颜色的比例逐渐减小, $\varphi=90^\circ$ 时所输出颜色的比例逐渐增大,从图3(b)能直观地看到颜色变化,随着 φ 增大,CIE坐标点随着箭头所示方向变化,由此可知其他 φ 下的

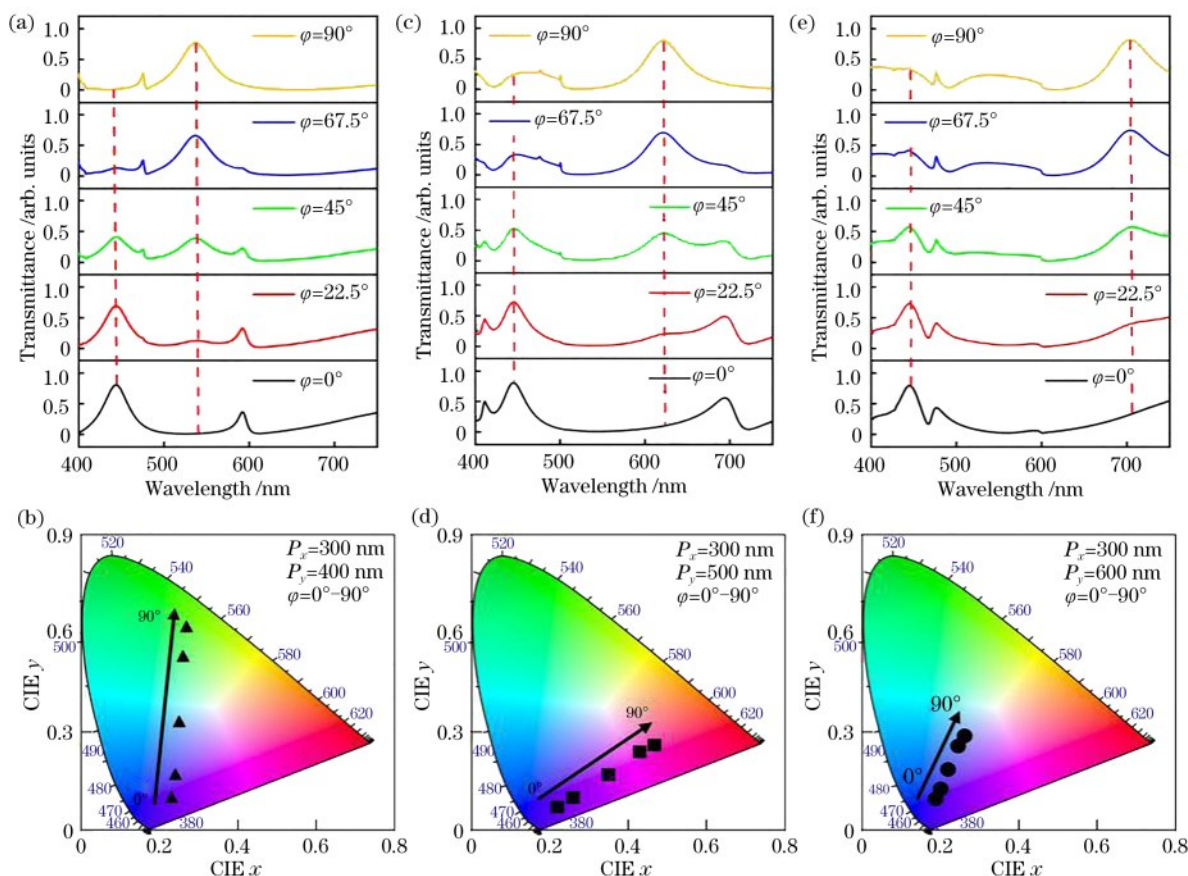


图3 $P_x \neq P_y$ 时,不同 φ 对颜色滤波器的透射谱及其色度坐标图的影响。(a) $P_x=300\text{ nm}$ 、 $P_y=400\text{ nm}$ 时不同 φ 下的透射谱;(b)与图3(a)相对应的CIE1931色度坐标图;(c) $P_x=300\text{ nm}$ 、 $P_y=500\text{ nm}$ 时不同 φ 下的透射谱;(d)与图3(c)相对应的CIE1931色度坐标图;(e) $P_x=300\text{ nm}$ 、 $P_y=600\text{ nm}$ 时不同 φ 下的透射谱;(f)与图3(e)相对应的CIE1931色度坐标图

Fig. 3 Influence of φ on transmission spectrum and its chromaticity coordinate diagram of color filter for $P_x \neq P_y$. (a) Transmission spectrum under different φ for $P_x=300\text{ nm}$ and $P_y=400\text{ nm}$; (b) CIE1931 chromaticity diagram corresponding to Fig. 3(a); (c) transmission spectrum under different φ for $P_x=300\text{ nm}$ and $P_y=500\text{ nm}$; (d) CIE1931 chromaticity diagram corresponding to Fig. 3(c); (e) transmission spectrum under different φ for $P_x=300\text{ nm}$ and $P_y=600\text{ nm}$; (f) CIE1931 chromaticity diagram corresponding to Fig. 3(e)

输出颜色都为 TE 与 TM 入射光偏振输出颜色之间的过渡色。图 3(c) 与图 3(e) 分别为 $P_x=300\text{ nm}$ 、 $P_y=500\text{ nm}$ 和 $P_x=300\text{ nm}$ 、 $P_y=600\text{ nm}$ 时, φ 以 22.5° 的步长从 0° 增加到 90° 的透射谱图。当 φ 增加, 图 3(c) 与图 3(e) 中 445 nm 波长处的波峰逐渐减小, 622 nm 与 704 nm 处出现新的波峰并逐渐增大; 当 φ 为 90° 时, 445 nm 波长处的波峰消失, 622 nm 与 704 nm 波长处波峰的峰值达到最大。图 3(d) 与 3(f) 分别为与图 3(c) 与图 3(e) 相对应的 CIE1931 色度坐标图, 从图 3(c)~(f) 中的变化规律与图 3(a) 与图 3(b) 中相同。

图 4 为 $P_x \neq P_y$ 时, 不同偏振光条件下矩形金属块在 x - y 平面内的电场分布图, 是对图 3 中相关现象的进一步分析说明。图 4(a)~4(c) 是 $P_x=300\text{ nm}$ 、 $P_y=400\text{ nm}$ 时, φ 分别为 0° 、 45° 、 90° 的电场分布。当 $\varphi=0^\circ$, 电场在矩形金属块 y 方向得到增强; 当 $\varphi=$

90° 时, 电场在矩形金属块 x 方向得到增强; 对于其他 φ , 如 $\varphi=45^\circ$, 局部电场在矩形金属块的 x 与 y 方向都有一定的增强。图 4(d)~(f) 是 $P_x=300\text{ nm}$ 、 $P_y=500\text{ nm}$ 时, φ 分别为 0° 、 45° 、 90° 时的电场分布。图 4(d)~(f) 中电场分布以及电场随着 φ 改变的变化规律与图 4(a)~(c) 基本相同。图 4(g)~(i) 是 $P_x=300\text{ nm}$ 、 $P_y=600\text{ nm}$, φ 分别为 0° 、 45° 、 90° 时的电场分布。图 4(g)~(i) 所示的电场分布规律不同于图 4(a)~(f) 的原因在于 P_x 与 P_y 尺寸相差太大, 导致电场增强基本集中在 y 方向, x 方向基本无电场增强。将图 4 分为三个横向组进行对比: 1) 图 4(a)、(d)、(g); 2) 图 4(b)、(e)、(h); 3) 图 4(c)、(f)、(i)。通过对三个组的纵向对比, 得到: 随着 P_y 的增大, 矩形金属块 y 方向的电场强度变大, x 方向电场强度减小, P_y 与 P_x 尺寸相差过大会使 x 方向无电场增强。图 4 是从电场分布对滤色影响的角度将图 3 中透射

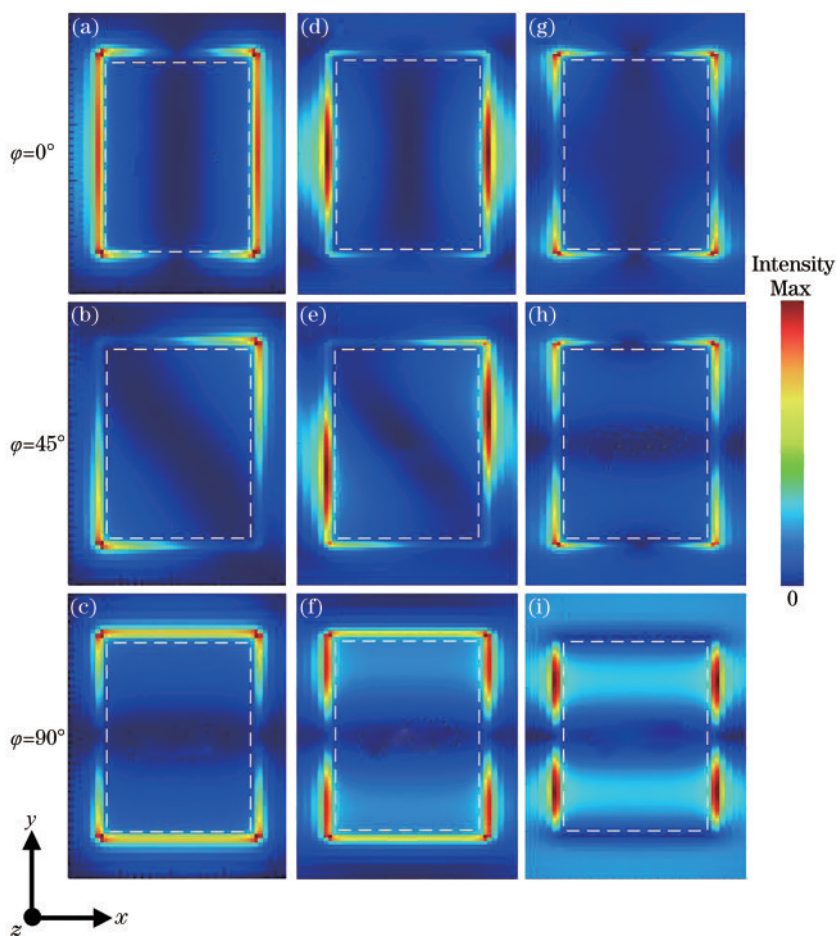


图 4 $P_x \neq P_y$ 时, 不同的 φ 对矩形金属块 x - y 平面内电场分布的影响。(a)~(c) $P_x=300\text{ nm}$ 、 $P_y=400\text{ nm}$; (d)~(f) $P_x=300\text{ nm}$ 、 $P_y=500\text{ nm}$; (g)~(i) $P_x=300\text{ nm}$ 、 $P_y=600\text{ nm}$
 Fig. 4 Influence of φ on electric field distribution of rectangular metal block in x - y plane when $P_x \neq P_y$. (a)~(c) $P_x=300\text{ nm}$ 、 $P_y=400\text{ nm}$; (d)~(f) $P_x=300\text{ nm}$ 、 $P_y=500\text{ nm}$; (g)~(i) $P_x=300\text{ nm}$ 、 $P_y=600\text{ nm}$

谱中的变化及其 CIE 色度图中坐标点的变化进行了进一步的比较分析和说明。

图 5(a) 为 $P_x=300\text{ nm}$ 、 $\varphi=0^\circ$ 时, P_y 以 50 nm 步长从 300 nm 增加到 600 nm 时的透射谱图。随着 P_y 以 50 nm 步长从 300 nm 增加到 600 nm, 透射谱主峰的峰值在 445 nm 波段无变化, 副峰会随着 P_y 的增加而红移。产生该现象的原因是入射光为 TM 偏振光, TM 波导模式沿 x 方向传播, TE 波导模式沿 y 方向传播。主峰由 TM 波导模式产生, 当 P_x 不变时, 主峰不发生变化; 副峰由 TE 波导模式共振产生, P_y 逐渐增大, 副峰产生红移, 但其透射率较小, 对滤出颜色基本无影响。从与图 5(a) 相对应的 CIE1931

色度坐标图[图 5(b)]中看出, 透射谱所对应的 CIE 坐标点均分布在一个极小的范围, 这说明在 $P_x=300\text{ nm}$ 、 $\varphi=0^\circ$ 条件下, P_y 的变化对颜色滤波器滤出的颜色基本无影响。图 5(c) 为 $\varphi=0^\circ$ 、 $P_x=500\text{ nm}$ 时, P_y 以 50 nm 步长从 300 nm 增加到 600 nm 的透射谱图。该透射谱的变化趋势与图 5(a) 相似, 随着 P_y 的增加, 主峰波长在 622 nm 处无变化, 副峰随之红移。图 5(d) 为图 5(c) 所对应的 CIE1931 色度坐标图, 其 CIE 坐标点分布情况证明在 $P_x=500\text{ nm}$ 、 $\varphi=0^\circ$ 条件下, P_y 对滤色并无影响。综上所述: 当 $\varphi=0^\circ$ 时, 透射谱即输出颜色仅由 P_x 决定; 当 $\varphi=90^\circ$ 时, 透射谱即输出颜色仅由 P_y 决定。由此可知, 该颜色

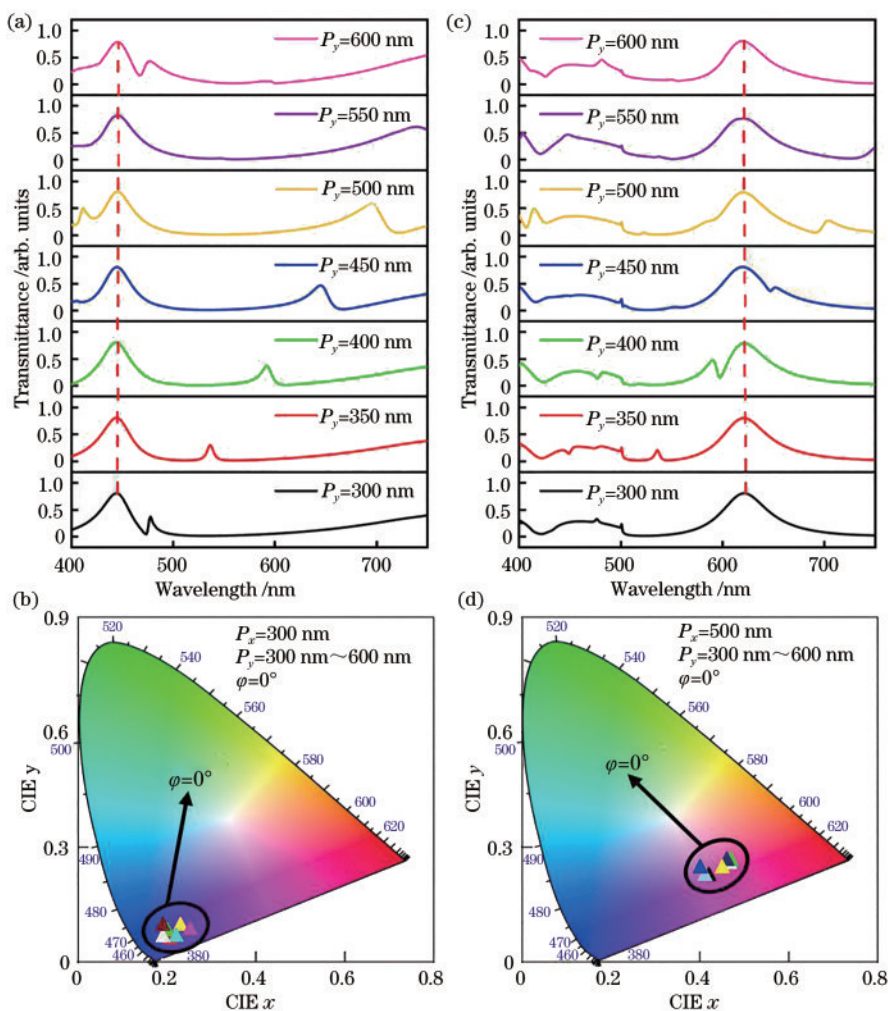


图 5 P_x 与 φ 固定时 P_y 对颜色滤波器的透射谱及其色度坐标图的影响。(a) $P_x=300\text{ nm}$ 、 $\varphi=0^\circ$ 、 P_y 为 300~600 nm 的透射谱; (b) 与图 5(a) 相对应的 CIE1931 色度坐标图; (c) $P_x=500\text{ nm}$ 、 $\varphi=0^\circ$ 、 P_y 为 300~600 nm 的透射谱; (d) 与图 5(c) 相对应的 CIE1931 色度坐标图

Fig. 5 Influence of P_y on transmission spectrum and its chromaticity coordinate diagram of color filter when P_x and φ are fixed. (a) Transmission spectra for $P_x=300\text{ nm}$ and $\varphi=0^\circ$ when P_y is 300–600 nm; (b) CIE1931 chromaticity diagram corresponding to Fig. 5(a); (c) transmission spectra for $P_x=500\text{ nm}$ and $\varphi=0^\circ$ when P_y is 300–600 nm; (d) CIE1931 chromaticity diagram corresponding to Fig. 5(c)

滤波器可独立调控 $\varphi = 0^\circ$ 与 $\varphi = 90^\circ$ 偏振条件下的滤色功能。根据对图 2~5 的分析, $\varphi = 0^\circ$ 和 $\varphi = 90^\circ$ 时滤出的颜色分别由 P_x 与 P_y 决定, 而其他 φ 下所滤出的颜色均为中间过渡色。由此可见, 在实际应用中, 人们仅需改变 φ 便可动态调控滤波器所滤出的颜色。

单个尺寸矩形金属块阵列结构的调控颜色范围有限, 要实现可见光内的全光调控往往需要多个尺寸颜色滤波器组成的芯片级结构, 以达到所期望的效果。图 6 提供了一种采用三种不同尺寸的矩形金属块阵列组合结构实现全光调控的设计思路。图 6(a) 为三种不同尺寸 (尺寸 1: $P_x = 300$ nm, $P_y = 400$ nm; 尺寸 2: $P_x = 400$ nm, $P_y = 500$ nm; 尺

寸 3: $P_x = 500$ nm, $P_y = 300$ nm) 的矩形金属块阵列结构的滤波器在不同 φ 下的透射谱。图 6(b) 为与图 6(a) 相对应的三种不同尺寸滤波器的三维结构示意图, 图 6(c) 为与图 6(a) 相对应的 CIE1931 色度坐标图, 透射谱在 CIE1931 色度坐标图上所对应的点能形成色彩闭环, 说明通过调控光偏振角能实现可见光内的全光调控。本文设计中, 令尺寸 1 中的 P_x 与 P_y 分别与尺寸 3 中的 P_y 以及尺寸 2 中的 P_x 相等, 尺寸 1 的 P_y 与尺寸 3 中的 P_x 相等, 由此可实现色彩闭环。在实际设计中, 人们可以采用不同的金属块阵列组成更加复杂的结构, 以实现其他功能的颜色滤波, 但这不是本文所关注的重点。

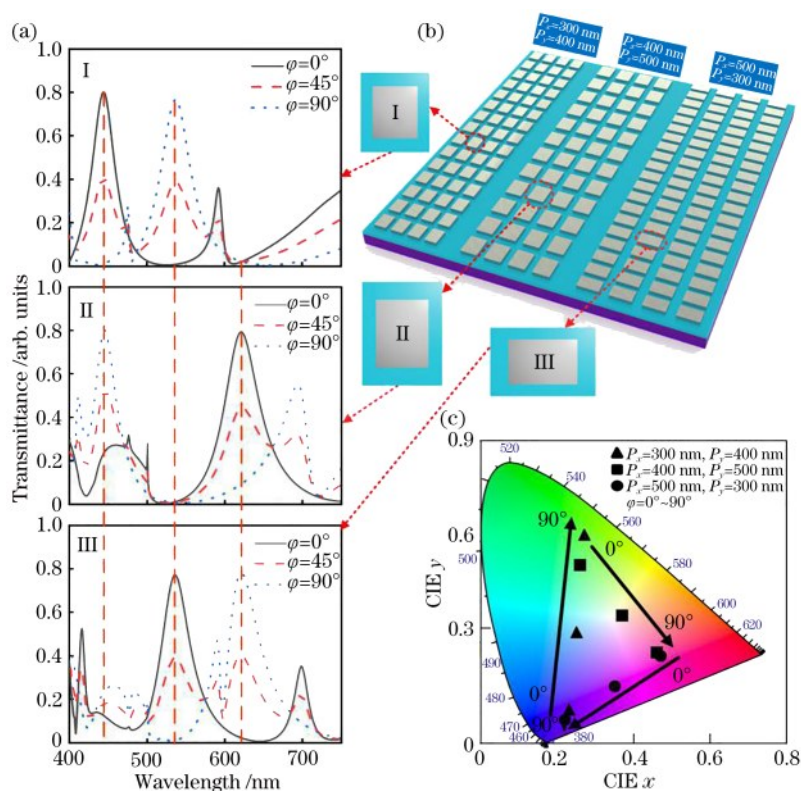


图 6 三种不同尺寸矩形金属块阵列结构滤波器实现的全光调控。(a) 不同偏振角条件下的透射谱 (I : $P_x = 300$ nm, $P_y = 400$ nm; II : $P_x = 400$ nm, $P_y = 500$ nm; III : $P_x = 500$ nm, $P_y = 300$ nm); (b) 与图 6(a) 相对应的三种尺寸滤波器的三维结构图; (c) 与图 6(a) 相对应的 CIE1931 色度坐标图

Fig. 6 All-optical control achieved by three different sizes of filters with rectangular metal block array structure. (a) Transmission spectra under different polarization angles (I : $P_x = 300$ nm, $P_y = 400$ nm; II : $P_x = 400$ nm, $P_y = 500$ nm; III : $P_x = 500$ nm, $P_y = 300$ nm); (b) three-dimensional structures of filters with different sizes corresponding to Fig. 6(a); (c) CIE1931 chromaticity diagram corresponding to Fig. 6(a)

4 结 论

设计了一种基于金属矩形块阵列结构的等离子体颜色滤波器, 采用 FDTD 方法从理论上分析了

该结构的 f_x , f_y , $H_1 \sim H_3$, P_x , P_y 以及 φ 等主要参数对光透射现象以及滤色特性的影响。结果表明: 1) 通过改变 P_x , P_y , 可实现透射谱的静态调控, 随着 P_x , P_y 的增大, 透射峰逐渐红移, 滤出颜色由蓝向红转变;

2) 当 $P_x \neq P_y$, 该颜色滤波器对偏振敏感, 通过改变 φ 值, 可实现对颜色滤波器的动态调控; 3) 当 $\varphi = 0^\circ$ 和 $\varphi = 90^\circ$ 时, 滤出的颜色分别由 P_x 和 P_y 单独控制, 其他 φ 值时所滤出的颜色均为过渡色。因此, 通过改变 φ 值可实现对可见光谱的全光调控。相对于传统颜色滤波器, 所设计的等离子体颜色滤波器的透射率在 75% 以上, 通过改变阵列周期能实现对透射谱的静态调控, 通过改变入射光偏振角可实现透射谱的动态调控。这些研究发现为下一代新型的等离子体颜色滤波器的设计提供理论参考, 其在安全防伪、动态显示、彩色打印等领域具有巨大的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Parker A R. 515 million years of structural colour [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2000, 2(6): R15-R28.
- [2] Wang J X, Fan Q B, Zhang H, et al. Research progress in plasmonic structural colors [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(1): 23-33, 123. 王嘉星, 范庆斌, 张辉, 等. 表面等离激元结构色研究进展[J]. *光电工程*, 2017, 44(1): 23-33, 123.
- [3] Genevet P, Capasso F, Aieta F, et al. Recent advances in planar optics: from plasmonic to dielectric metasurfaces[J]. *Optica*, 2017, 4(1): 139-152.
- [4] Scholl J A, Koh A L, Dionne J A. Quantum plasmon resonances of individual metallic nanoparticles [J]. *Nature*, 2012, 483(7390): 421-427.
- [5] Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M. Planar photonics with metasurfaces[J]. *Science*, 2013, 339(6125): 1232009.
- [6] Xiao G L, Dou W Y, Yang H Y, et al. Band-stop filter based on metal-insulator-metal waveguide with asymmetric circular resonant cavities[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0513001. 肖功利, 窦婉滢, 杨宏艳, 等. 基于非对称圆形谐振腔金属-介质-金属波导结构的带阻滤波器[J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0513001.
- [7] Xiao G L, Xu J L, Yang H Y, et al. Multi-channel plasmonic logic-gate output light source based on sawtooth resonant cavity coupled with metal-waveguide structure [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(12): 121301. 肖功利, 徐俊林, 杨宏艳, 等. 基于锯齿共振腔耦合金属波导结构的多通道等离子体逻辑门输出光源[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(12): 121301.
- [8] Yang H Y, Chen Y P, Xiao G L, et al. MIM tunable plasmonic filter embedded with symmetrical sector metal resonator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(11): 1124001. 杨宏艳, 陈昱澎, 肖功利, 等. 内嵌对称扇形金属谐振腔的 MIM 可调谐等离子体滤波器[J]. *光学学报*, 2020, 40(11): 1124001.
- [9] Li Z Y, Butun S, Aydin K. Large-area, lithography-free super absorbers and color filters at visible frequencies using ultrathin metallic films [J]. *ACS Photonics*, 2015, 2(2): 183-188.
- [10] Sun L B, Hu X L, Zeng B B, et al. Effect of relative nanohole position on colour purity of ultrathin plasmonic subtractive colour filters [J]. *Nanotechnology*, 2015, 26(30): 305204.
- [11] Sun L B, Hu X L, Xu Y, et al. Influence of structural parameters to polarization-independent color-filter behavior in ultrathin Ag films [J]. *Optics Communications*, 2014, 333: 16-21.
- [12] Yue W, Gao S, Lee S S, et al. Subtractive color filters based on a silicon-aluminum hybrid-nanodisk metasurface enabling enhanced color purity [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 29756.
- [13] Hu X L, Sun L B, Zeng B, et al. Polarization-independent plasmonic subtractive color filtering in ultrathin Ag nanodisks with high transmission [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(1): 148-152.
- [14] Goh X M, Ng R J H, Wang S H, et al. Comparative study of plasmonic colors from all-metal structures of posts and pits [J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(6): 1000-1009.
- [15] Shrestha V R, Lee S S, Kim E S, et al. Aluminum plasmonics based highly transmissive polarization-independent subtractive color filters exploiting a nanopatch array [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(11): 6672-6678.
- [16] Kaplan A F, Xu T, Guo L J. High efficiency resonance-based spectrum filters with tunable transmission bandwidth fabricated using nanoimprint lithography [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(14): 143111.
- [17] Zeng B, Gao Y, Bartoli F J. Ultrathin nanostructured metals for highly transmissive plasmonic subtractive color filters [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 2840.
- [18] Wang J X, Fan Q B, Zhang S, et al. Ultra-thin plasmonic color filters incorporating free-standing resonant membrane waveguides with high transmission efficiency [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(3): 031110.
- [19] Kumar K, Duan H G, Hegde R S, et al. Printing

- colour at the optical diffraction limit [J]. *Nature Nanotechnology*, 2012, 7(9): 557-561.
- [20] Tan S J, Zhang L, Zhu D, et al. Plasmonic color palettes for photorealistic printing with aluminum nanostructures [J]. *Nano Letters*, 2014, 14 (7) : 4023-4029.
- [21] Park C H, Yoon Y T, Lee S S. Polarization-independent visible wavelength filter incorporating a symmetric metal-dielectric resonant structure [J]. *Optics Express*, 2012, 20(21): 23769-23777.
- [22] Ellenbogen T, Seo K, Crozier K B. Chromatic plasmonic polarizers for active visible color filtering and polarimetry [J]. *Nano Letters*, 2012, 12 (2) : 1026-1031.
- [23] Li Z B, Clark A W, Cooper J M. Dual color plasmonic pixels create a polarization controlled nano color palette[J]. *ACS Nano*, 2016, 10(1): 492-498.
- [24] Raj Shrestha V, 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.
- [25] Koirala I, Shrestha V R, Park C S, et al. Polarization-controlled broad color palette based on an ultrathin one-dimensional resonant grating structure [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 40073.
- [26] Jia H, Wu Q J, Jiang C, et al. High-transmission polarization-dependent active plasmonic color filters [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(3): 704-711.
- [27] Cheng F, Gao J, Luk T S, et al. Structural color printing based on plasmonic metasurfaces of perfect light absorption [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11045.
- [28] Palik E D. Introductory remarks [M] //Palik E D. *Handbook of optical constants of solids*. Amsterdam: Elsevier, 1985: 3-9.
- [29] Tan C L, Yi Y X, Wang G P. Optical transmission properties of one-dimensional metallic gratings [J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, 51(5): 1063-1067.
谈春雷, 易永祥, 汪国平. 一维金属光栅的透射光学特性[J]. *物理学报*, 2002, 51(5): 1063-1067.