

## 全介质圆环-纳米棒结构宽色域颜色滤波器

肖功利<sup>1</sup>, 陈剑云<sup>1</sup>, 杨宏艳<sup>2\*</sup>, 欧泽涛<sup>1</sup>, 王博文<sup>1</sup>, 赖子凡<sup>1</sup>, 李海鹏<sup>1</sup>, 王阳培华<sup>1</sup>, 刘兴鹏<sup>1</sup>, 孙堂友<sup>1</sup><sup>1</sup>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;<sup>2</sup>桂林电子科技大学光电工程学院广西光电信息处理重点实验室, 广西 桂林 541004

**摘要** 设计了一种新型的全介质圆环-纳米棒结构颜色滤波器。全介质圆环-纳米棒阵列结构与入射光的相互作用激发米氏共振,其在可见光波段展现出较强的反射特性,从而实现不同颜色的宽色域。采用时域有限差分法对纳米棒、纳米环、硅圆环-纳米棒三种不同结构滤波器的反射光谱及其颜色显示规律进行比较。同时研究纳米棒直径、圆环直径、高度和周期等主要参数对反射光谱及颜色特性的影响。结果表明:所设计的全介质圆环-纳米棒结构的滤波器在特定光波段的反射特性得到极大的提升;经优化后的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可实现宽色域颜色滤波特性,其色域面积高达0.115。该研究为下一代颜色滤波器的设计提供理论依据。

**关键词** 光学器件; 全介质; 颜色滤波器; 米氏共振; 高反射率; 宽色域; 时域有限差分法

中图分类号 TN256

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1923001

## Wide-Gamut Color Filter Using All-Dielectric Ring-Nanorod Structure

Xiao Gongli<sup>1</sup>, Chen Jianyun<sup>1</sup>, Yang Hongyan<sup>2\*</sup>, Ou Zetao<sup>1</sup>, Wang Bowen<sup>1</sup>, Lai Zifan<sup>1</sup>,  
Li Haiou<sup>1</sup>, Wangyang Peihua<sup>1</sup>, Liu Xingpeng<sup>1</sup>, Sun Tangyou<sup>1</sup><sup>1</sup>Guangxi Key Laboratory of Precision Navigation Technology and Application, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;<sup>2</sup>Guangxi Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing, School of Optoelectronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China

**Abstract** A new-type color filter has been designed using an all-dielectric ring-nanorod structure. The interaction of incident light with the all-dielectric ring-nanorod array structure is used to activate the Mie resonance, which has high reflection capabilities in the visible light band, allowing for a wide gamut of distinct colors. Using the finite-difference time-domain (FDTD) method, we compare the reflectance spectra and color display laws of three filters with other structures (nanorods, nanorings, and silicon ring-nanorods). Simultaneously, the impact of key parameters such as nanorod diameter, ring diameter, height, and period on the reflection spectrum and color characteristics is examined. According to the findings, the developed all-dielectric ring-nanorod structure filter considerably improves the reflection properties of the specific light waveband; the optimum color filter has a visible light reflectivity of more than 70%. The color gamut area of the nanorods can reach 0.115, and the diameter of the nanorods can be modified to achieve wide gamut color filtering properties. This study provides a theoretical foundation for the development of next-generation color filters.

**Key words** optical devices; all-dielectric; color filter; Mie resonance; high reflectivity; wide gamut; finite-difference time-domain method

## 1 引言

结构色是由可见光与微结构相互作用产生的颜

色<sup>[1]</sup>。对于自然界中无数的物种,其表面微结构会对不同的光进行衍射、反射或散射,从而呈现出不同的颜色。例如,蝴蝶<sup>[2]</sup>的翅膀颜色是由于它们上面的光

收稿日期: 2021-12-23; 修回日期: 2022-03-17; 录用日期: 2022-04-05

基金项目: 国家自然科学基金(62165004,61765004,61805053)、广西自然科学基金(2017GXNSFAA198164)、桂林电子科技大学研究生教育创新计划(2021YCX040)、广西精密导航技术与应用重点实验室基金(DH202006, DH202004)、广西自动检测技术与仪器重点实验室基金(YQ20115)

通信作者: \*yhy. gl@126. com

栅结构反射可见光造成的。从自然界中动植物的颜色机理出发,对光和微观结构进行了探讨。在 20 世纪初, Faraday<sup>[3]</sup>解释到光与金属微粒的相互作用会产生表面等离子激元,其对特定光产生辐射或吸收,进而产生不同的颜色。近年来,随着微纳加工技术的发展,人们对利用金属微结构产生结构颜色的方法进行了大量的研究,并实现了表面等离子激元结构色<sup>[4]</sup>。与传统颜料相比,纳米结构色具有分辨率高、环保、经久耐用等优点<sup>[5]</sup>,这使得纳米结构色滤波器在传感器<sup>[6]</sup>、超分辨彩色成像<sup>[7]</sup>、LCD 液晶显示<sup>[8-9]</sup>、CMOS 数字集成电路<sup>[10]</sup>等领域具有潜在的应用价值。研究发现,表面等离子结构色可分为 5 种结构:金属纳米棒、金属-绝缘体-金属(MIM)、金属纳米光栅、金属纳米孔洞和金属纳米孔-纳米盘。2013 年 Si 等<sup>[11]</sup>设计了基于银垂直纳米棒阵列的等离子激元彩色滤波器,通过优化纳米棒的尺寸,可以达到 60%~80% 的反射效率,而器件的反射颜色可以通过调整纳米棒的尺寸和阵列周期来控制。2014 年 Yang 等<sup>[12]</sup>提出了一种基于 MIM 亚波长光栅结构的全方位反射彩色滤色片,该滤色片在非偏振照明下以宽入射角显示相同的颜色。2019 年 Wang 等<sup>[13]</sup>制备超薄(约 10 nm)透射率高的双金属滤光片,通过在银层上嵌入铝,实现了高透光率(约 80%)的三种减色法的三原色(青色,品红,黄色)。2019 年 Zhao 等<sup>[14]</sup>设计了一个圆形纳米孔-纳米盘混合阵列,在光学亚衍射极限空间分辨率下形成一种色域宽、视角宽、偏振独立性强的结构色。2021 年肖功利等<sup>[15]</sup>设计了一种金属矩形块阵列结构的等离子体颜色滤波器,通过改变入射光偏振角实现动态调控。以上所有研究都考虑到金属的等离子体结构颜色,虽然可以产生不同的颜色,但贵金属的高损耗导致波段较宽,很难产生高纯度的颜色。

近年来,研究人员发现使用低损耗介质来设计彩色滤色片可以使颜色更加鲜艳。例如,2016 年 Yue 等<sup>[16]</sup>提出了一种硅基柱米氏共振高纯度减色法颜色滤波器,其反射光谱在共振时达到近零且窄的反射谷。2017 年 Ozerov 等<sup>[17]</sup>设计一种硅柱阵列超表面颜色滤波器,通过调整硅柱的半径,其散射峰几乎可以覆盖整个可见光范围。2020 年 Liu 等<sup>[18]</sup>展示了一种全介质纳米着色表面,利用其固有的纳米结构,在可见光范围内获得不同的结构颜色。另外, Yang 等<sup>[19]</sup>在石英衬底上制作了氮化硅超表面,在较短波长上应用瑞利异常抑制高阶 Mie 共振,产生明亮的彩色像素。结构色在生活中起着越来越重要的作用。2021 年王龙等<sup>[20]</sup>研究发现,碧凤蝶的鳞片结构对有机溶液、光照条件等具有敏感的变色特性,可以用作智能变色伪装、传感检测等仿生智能材料的生产。随着微纳光学技术的发展,陈沁等<sup>[21]</sup>认为高像素密度图像传感器的结构色技术成为可能,可以拓宽人类的视觉感知能力。

基于以上研究背景,本文设计了一种新型的全介质圆环-纳米棒结构颜色滤波器。硅圆环-纳米棒结构与可见光的相互作用产生的 Mie 共振现象,其在特定

光波段表现出较强反射特性,实现了不同的颜色滤波。采用时域有限差分(FDTD)法研究了该结构的纳米棒直径( $d_1$ )、高度( $h$ )、纳米环内径( $d_2$ )、周期( $P$ )等参数对光反射及颜色滤波特性的影响。当  $h=120$  nm、 $d_2=320$  nm、 $P=360$  nm 时,通过调节  $d_1$  从 60~140 nm 变化时可实现宽色域变化颜色滤波特性,可见光波段有较高的反射率,其反射峰值高达 75%,且能实现在色度图上面积  $S_2$  为 0.115 的颜色变化。

## 2 结构设计与数值模拟

图 1(a)为本文设计的全介质圆环-纳米棒结构颜色滤波器的三维结构示意图,图中  $E$ 、 $H$ 、 $k$  分别表示电场矢量、磁场矢量和波矢。由于单个纳米环-棒结构中  $d_1$  不同,图 1(a)中展示了三种不同大小的纳米微结构,光与微观结构的相互作用会造成特定光的强反射现象,在肉眼看来呈现出红、绿、蓝三种颜色。图 1(b)为单个纳米环-棒结构示意图,在石英基底上纳米棒内嵌在纳米环里面,其中  $d_1$  为纳米棒直径,  $d_2$  为纳米环内径,高度为  $h$ (纳米环与纳米棒的高度保持一致),  $P$  表示阵列周期。纳米环与纳米棒的中心轴完全重合。由周期性排列的纳米环-棒阵列结构构成的超表面,在光的照射下会在特定光波段激发 Mie 共振,在共振模式下,纳米棒与纳米环之间发生耦合,会产生较强反射现象,同时出现较窄的半峰全宽(FWHM),实现高纯度的颜色滤波。

利用 FDTD 法分析入射光垂直照射纳米结构的特性。在仿真中, Si 的复折射率的实数部分和虚数部分  $N$  和  $K$  是根据文献[22]设定的,石英的折射率是根据 Ghosh<sup>[23]</sup>设定。在  $X$  和  $Y$  平面上设置了周期性边界条件,在  $Z$  平面的顶部和底部设置了完美匹配层(PML)边界条件,厚度设为 8 层,使单元模拟能够表现无限阵列的行为。

采用平面波作为入射光源,并将工作波长范围设为 400~750 nm。选择频域场及功率监视器采集反射光谱。为了保证计算结果的收敛性和准确性,整个模拟区域采用  $5$  nm $\times$  $5$  nm $\times$  $5$  nm<sup>[24]</sup> 的网格精度,最后,通过运行参数扫描(parameter sweep),观察不同结构参数的反射光谱,并将反射光谱转换成色度坐标,观察其在标准色度系统 CIE1931 下的颜色分布情况。

在这项工作中,利用上述结构,通过改变纳米结构的结构参数来获得不同颜色对应的各种反射光谱。假设得到的反射光谱为  $R(\lambda)$ ,则在 CIE 标准色度系统下  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三刺激值可由下列公式求得:

$$\begin{cases} X = \int_{400}^{750} R(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y = \int_{400}^{750} R(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z = \int_{400}^{750} R(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{cases}, \quad (1)$$

式中:  $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$  是人眼颜色视觉 CIE1931 光谱

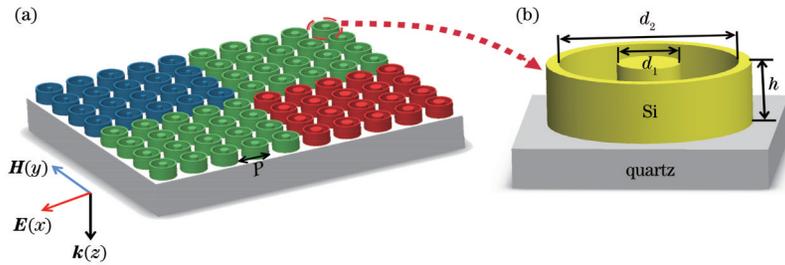


图 1 全介质圆环-纳米棒结构颜色滤波器示意图。(a)硅圆环-纳米棒阵列结构;(b)单个圆环-纳米棒结构单元

Fig. 1 Schematic diagrams of color filter with all-dielectric ring-nanorod structure. (a) Silicon ring-nanorod array structure; (b) single ring-nanorod structure unit

的三刺激函数,由三刺激值计算的色度坐标公式为

$$\begin{cases} x = X / (X + Y + Z) \\ y = Y / (X + Y + Z) \end{cases} \quad (2)$$

### 3 结果与讨论

设计了一种全介质圆环-纳米棒结构颜色滤波器,其工作原理是可见光与纳米结构相互作用产生 Mie 共振现象,纳米环与纳米棒之间形成强电场,在特定波段出现光强反射现象,从而实现颜色滤波。本文对纳米棒、纳米环、硅圆环-纳米棒三种不同结构颜色滤波器的光反射特性及其电场分布进行对比,发现纳米环-棒耦合结构的优点。接着分析其颜色滤波机理,研究主要结构参数对颜色特性的影响,最后通过优化结构参数来实现宽色域特性。

#### 3.1 结构对比及显色机理

图 2 为纳米棒、纳米环、硅圆环-纳米棒三种不同结构的反射光谱、结构颜色及其电场分布对比图。

图 2(a)为三种不同结构对应的反射光谱图(括号中的数字代表“波长,反射率”),图 2(b)为其结构反射光谱相对应的 CIE1931 色度坐标图,图 2(c)~(e)分别为这三种结构在反射峰处对应的 X-Z 平面的电场分布图。数值仿真的结构参数为:周期 P 为 360 nm,高度 h 为 120 nm,纳米棒直径 d<sub>1</sub> 为 100 nm,纳米圆环内环直径 d<sub>2</sub> 为 280 nm,圆环厚度为 20 nm。从图 2(a)中可以看出,结构 1 仅由纳米棒阵列与石英衬底组成,结构 2 仅由纳米环阵列与石英衬底组成,结构 3 为本文设计的全介质硅圆环-纳米棒结构。通过观察光反射曲线可以看出,由结构 1 组成的结构色,其反射光谱虽然出现两个峰,但其峰值对应的反射率较低,所以该结构对可见光的反射效果不明显,其对应的颜色在图 2(b)色谱图中“1”位置可以看出,该位置较靠近色度图的白光范围,光为混合色,故色彩纯度低,对光的选择效果较差。从图 2(c)可知,由纳米棒结构形成的滤波器的光反射强度最大时电场集中在

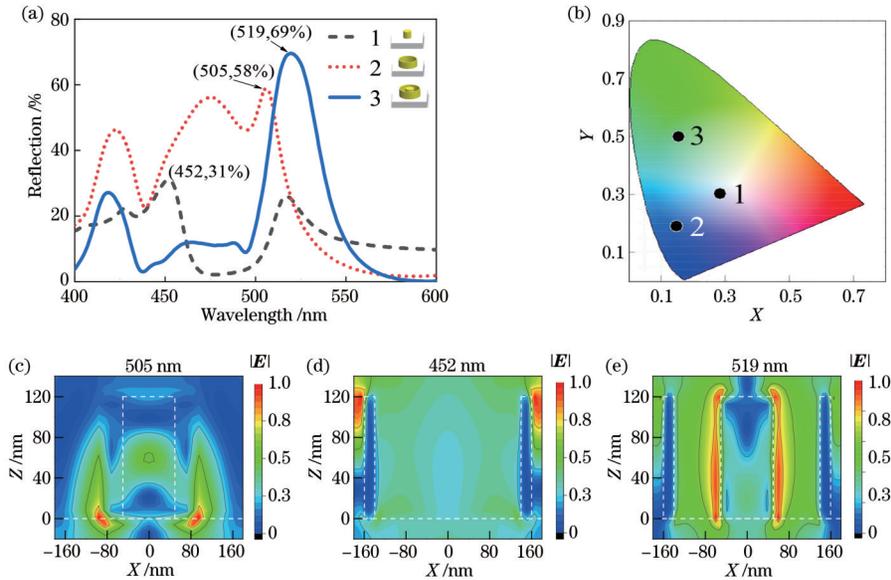


图 2 三种不同结构的反射光谱、结构颜色及其电场分布对比图。(a)纳米棒(1)、纳米环(2)、硅圆环-纳米棒(3)等三种结构的光谱对比图;(b)相对应的 CIE1931 色度坐标图;(c)~(e)三种结构在反射峰处对应的 X-Z 剖面电场强度分布图(白色虚线为结构边界)

Fig. 2 Comparison of reflectance spectra, structure colors, and electric field distributions of three different structures. (a) Spectral comparison diagrams of nanorods (1), nanorings (2), and silicon ring-nanorod structures (3); (b) corresponding CIE1931 chromaticity coordinate diagram; (c)~(e) X-Z section electric field intensity distribution diagrams corresponding to reflection peaks of three structures

纳米棒下部,纳米棒底部两侧微小区域出现较强电场分布,光能量主要局域中在该区域,因此光反射率较低。由结构 2 纳米环组成的颜色滤波器的光谱图也出现两个波峰,其反射效率较高但其半峰全宽较宽,颜色滤波呈现出纯度不高的缺点。相应的颜色对应图 2(b) 色谱图中的“2”位置,可以看到,该结构主要反射短波段蓝光,同样由于低纯度,所以“2”距中心位置较近。从图 2(d) 可知,除圆环顶部两侧出现较强电场外,圆环内部也有较强电场分布,故光反射率较高。

由结构 3 即硅圆环-纳米棒组成的颜色滤波器的光谱图同样出现两个波峰,其在特定波长出现一个高且窄的峰,而其他波段的光反射率较低,从而实现高纯度的颜色,相应的颜色对应如图 2(b) 色谱图中的“3”位置,该位置主要反射短波段绿色,且距离中心点位置较远。从图 2(e) 可知,由硅圆环-纳米棒结构形成的滤波器在整个 X-Z 平面的电场较强,其中在纳米棒两侧

的电场强度最大,故光反射率最高。

### 3.2 结构参数对色域的影响

图 3 给出了不同  $d_1$  和  $h$  对颜色滤波器反射光谱及其色度坐标图的影响。图 3(a) 为  $d_2=280$  nm、 $h=120$  nm 时,  $d_1$  以 20 nm 的步长从 60 nm 增加到 140 nm 的反射光谱图。随着  $d_1$  的增加,反射峰发生红移,且在  $d_1=140$  nm 时,反射率达到最大。由反射光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对应的 1931 色度坐标图 [图 3(b)] 中观察到, CIE1931 坐标点随着箭头所示方向变化,说明基于该结构的小纳米棒主要反射短波段光,而大纳米棒主要反射长波段光。图 3(c) 为  $P=380$  nm、 $d_1=140$  nm、 $d_2=280$  nm、 $h$  以 10 nm 的步长从 80 nm 到 120 nm 变化的反射光谱图。 $h=120$  nm 处反射率达到最大;当  $h$  增加,反射峰会发生红移且反射率也变大。从图 3(d) 色度坐标图可以看到参数  $h$  对颜色也有影响。

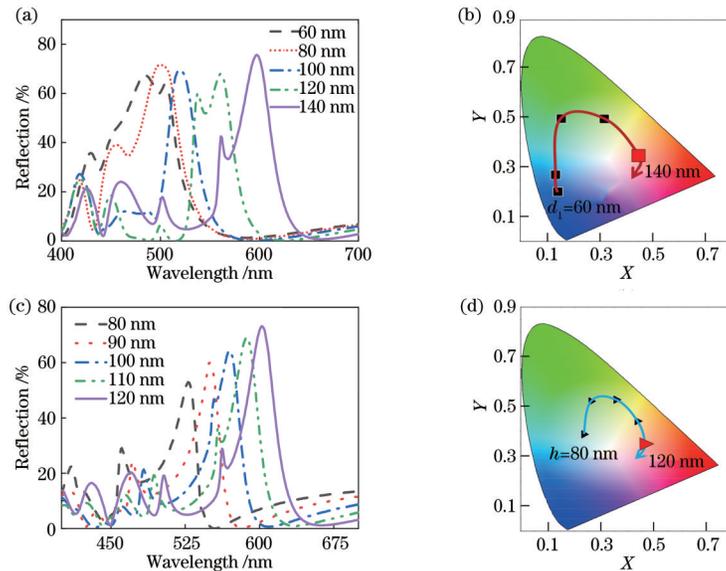


图 3 不同  $d_1$  和  $h$  对颜色滤波器的反射光谱及其色度坐标图的影响。(a)  $d_1$  为 60~140 nm; (b) 与图 3(a) 对应的 CIE1931 色度坐标图; (c)  $h$  为 80~120 nm; (d) 与图 3(c) 对应的 CIE1931 色度坐标图

Fig. 3 Influence of  $d_1$  and  $h$  on reflection spectra and chromaticity coordinate diagrams of color filter. (a)  $d_1$  is 60-140 nm; (b) CIE1931 chromaticity coordinate diagram corresponding to Fig. 3(a); (c)  $h$  is 80-120 nm; (d) CIE1931 chromaticity coordinate diagram corresponding to Fig. 3(c)

图 4 给出了不同  $d_2$  和  $P$  对颜色滤波器的反射光谱及其色度坐标图的影响。图 4(a) 为  $P=380$  nm、 $d_1=100$  nm、 $h=100$  nm 时,  $d_2$  以 20 nm 的步长从 240 nm 到 320 nm 变化的反射光谱图,在  $d_2=320$  nm 处,光反射率较高且半峰全宽较窄。但随着  $d_2$  的增加,反射峰位置变化较小,反射率变化也不大。从图 4(b) 中可以看出,  $d_2$  对颜色变化的影响不大。图 4(c) 为  $d_2=280$  nm、 $d_1=140$  nm、 $h=110$  nm 时,  $P$  以 20 nm 的步长从 320 nm 到 400 nm 变化的反射光谱图。随着  $P$  的增加,反射峰发生微小的红移,且峰值呈下降趋势。从图 4(d) 中也可以看出,  $P$  对颜色的影响也不大。

### 3.3 参数优化实现宽色域

为得到更宽色域颜色滤波器,本文对  $d_1$ 、 $h$ 、 $d_2$  和  $P$  等参数进行优化,图 5 为结构参数优化前与后的结构色性能对比图。图 5(a) 为  $d_2=280$  nm、 $h=120$  nm、 $P=360$  nm 时,  $d_1$  以 20 nm 的步长从 60 nm 到 140 nm 变化的反射光谱图。从图中可以看出,随着  $d_1$  的增大,反射光谱峰发生红移,整个可见光波段内有较高的反射率,且光谱曲线的半峰全宽相对较窄。图 5(b) 展示了结构优化前后,对  $d_1$  进行调节时滤波器的颜色在色度图上的色度坐标变化范围图,在参数优化前且  $d_2=300$  nm、 $h=110$  nm、 $P=360$  nm 时,  $d_1$  同样以

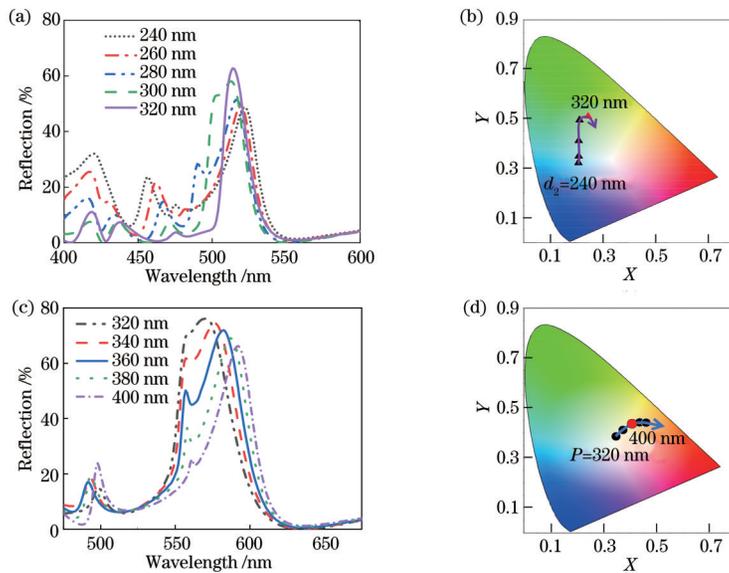


图 4 不同  $d_2$  和  $P$  对颜色滤波器反射光谱及其色度坐标图的影响。(a)  $d_2=240\sim 320$  nm; (b) 与图 4(a) 对应的 CIE1931 色度坐标图; (c)  $P=320\sim 400$  nm; (d) 与图 4(c) 对应的 CIE1931 色度坐标图

Fig. 4 Influence of different  $d_2$  and  $P$  on reflection spectrum and its chromaticity coordinate diagrams of color filter. (a)  $d_2=240\sim 320$  nm; (b) CIE1931 chromaticity coordinate diagram corresponding to Fig. 4(a); (c)  $P=320\sim 400$  nm; (d) CIE1931 chromaticity coordinate diagram corresponding to Fig. 4(c)

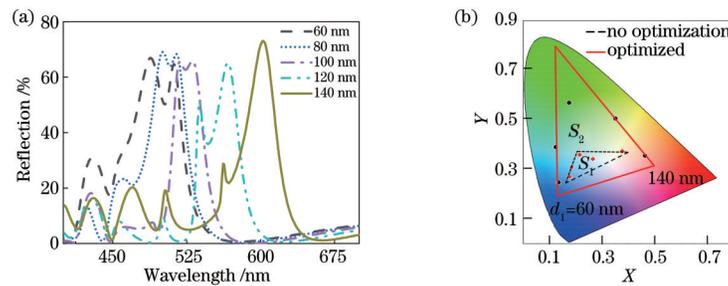


图 5 结构参数优化前与后的性能对比。(a) 在  $d_1$  为 60~140 nm 情况下结构优化后的反射光谱图; (b) 结构优化前与后的 CIE1931 色度坐标比较图

Fig. 5 Performance comparison before and after structural parameter optimization. (a) Reflectance spectrum after structural optimization when  $d_1$  is 60~140 nm; (b) comparison of CIE1931 chromaticity coordinate diagram before and after structural optimization

20 nm 的步长从 60 nm 到 140 nm 变化, 该滤波器的色度坐标在色度图上能实现如图 5(b) 中的色域面积  $S_1 \approx 0.016$  的黑色虚线小三角形区域, 因此, 该滤波器的色域变化范围较小。优化后的滤波器在  $d_1$  同样变化下的色度图上实现面积  $S_2 \approx 0.115$  的实线大三角

区域的色域变化范围, 其面积  $S_2$  远大于  $S_1$  ( $S_2 \approx 7S_1$ )。表 1 所示为不同结构的颜色滤波器性能参数比较。结果发现, 相对于其他结构, 本文提出的全介质圆环-纳米棒结构滤波器具有高反射率、窄半峰全宽、色域宽等特点。

表 1 不同结构的颜色滤波器的性能参数比较

Table 1 Comparison of performance parameters of color filters with different structures

Structure of color filter	Maximum reflectivity $R / \%$	FWHM $w / \text{nm}$	Color gamut area $S$
Nanodisk-nanohole <sup>[25]</sup>	60	—	0.04
Nanoporous MIM <sup>[26]</sup>	85	150	0.05
Silicon nanodisk <sup>[27]</sup>	82	—	0.03
Cross-shape <sup>[28]</sup>	70	100	0.11
In this paper	75	40	0.115

## 4 结 论

设计了一种基于全介质圆环-纳米棒结构的宽色域颜色滤波器。采用 FDTD 法从理论上分析了纳米棒、纳米环、硅圆环-纳米棒三种不同结构颜色滤波器的反射光谱、结构色及其电场分布。研究发现基于硅圆环-纳米棒结构的滤波器比其他两种结构有更高的反射率和更窄的半峰全宽。同时还分析了该结构的  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $h$ 、 $P$  等主要参数对光反射现象以及滤色特性的影响。结果表明： $d_2$  和  $h$  是影响色域的关键参数，而  $d_1$  及  $P$  对颜色滤波特性的影响较小。为了得到更宽的色域，进行了参数优化，最终得到参数为  $d_2=320\text{ nm}$ 、 $h=120\text{ nm}$ 、 $P=360\text{ nm}$  且  $d_1$  为  $60\sim 140\text{ nm}$  范围内时可见光范围内的特定波段均表现高的反射特性，其峰值高达 75%，且半峰全宽较窄，可实现高纯度颜色。该颜色滤波器在色度坐标图上围成的色域面积  $S_2$  高达 0.115，实现了宽色域。这些研究发认为新型等离子体颜色滤波器的设计提供理论依据，在光学显示、成像、高分辨率打印等领域具有重要的应用价值。

### 参 考 文 献

- [1] Parker A R. Colour in Burgess Shale animals and the effect of light on evolution in the Cambrian[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences, 1998, 265(1400): 967-972.
- [2] Vukusic P, Sambles R, Lawrence C, et al. Sculpted-multilayer optical effects in two species of Papilio butterfly[J]. Applied Optics, 2001, 40(7): 1116-1125.
- [3] Faraday M. X. The Bakerian lecture: experimental relations of gold (and other metals) to light[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1857, 147: 145-181.
- [4] Gu Y H, Zhang L, Yang J K W, et al. Color generation via subwavelength plasmonic nanostructures[J]. Nanoscale, 2015, 7(15): 6409-6419.
- [5] Al-Salem S M, Lettieri P, Baeyens J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): a review[J]. Waste Management, 2009, 29(10): 2625-2643.
- [6] Khorasaninejad M, Abedzadeh N, Walia J, et al. Color matrix refractive index sensors using coupled vertical silicon nanowire arrays[J]. Nano Letters, 2012, 12(8): 4228-4234.
- [7] Tseng M L, Yang J, Semmlinger M, et al. Two-dimensional active tuning of an aluminum plasmonic array for full-spectrum response[J]. Nano Letters, 2017, 17(10): 6034-6039.
- [8] Franklin D, Frank R, Wu S T, et al. Actively addressed single pixel full-colour plasmonic display[J]. Nature Communications, 2017, 8: 15209.
- [9] Lueder E. Liquid crystal displays: addressing schemes and electro-optical effects[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2010.
- [10] Yokogawa S, Burgos S P, Atwater H A. Plasmonic color filters for CMOS image sensor applications[J]. Nano Letters, 2012, 12(8): 4349-4354.
- [11] Si G Y, Zhao Y H, Lü J T, et al. Reflective plasmonic color filters based on lithographically patterned silver nanorod arrays[J]. Nanoscale, 2013, 5(14): 6243-6248.
- [12] Yang C Y, Shen W D, Zhang Y G, et al. Design and simulation of omnidirectional reflective color filters based on metal-dielectric-metal structure[J]. Optics Express, 2014, 22(9): 11384-11391.
- [13] 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.
- [14] Zhao J C, Yu X C, Zhou K, et al. Wide-gamut and polarization-independent structural color at optical sub-diffraction-limit spatial resolution based on uncoupled LSPPs[J]. Nanoscale Research Letters, 2019, 14(1): 214.
- [15] 肖功利, 杨寓婷, 杨宏艳, 等. 基于矩形金属块阵列结构的等离子体颜色滤波器[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9): 0905002.
- Xiao G L, Yang Y T, Yang H Y, et al. Plasmonic color filter based on rectangular metal block array structure[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 0905002.
- [16] 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.
- [17] Ozerov I, Proust J, Bedu F, et al. Nanofabrication of silicon Mie resonators and all-dielectric colored metasurfaces [EB/OL]. (2017-08-27)[2022-12-13]. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01577657/>.
- [18] Liu X, Huang Z, Zang J F. All-dielectric silicon nanoring metasurface for full-color printing[J]. Nano Letters, 2020, 20(12): 8739-8744.
- [19] Yang J H, Babicheva V E, Yu M W, et al. Structural colors enabled by lattice resonance on silicon nitride metasurfaces[J]. ACS Nano, 2020, 14(5): 5678-5685.
- [20] 王龙, 汪刘应, 许可俊, 等. 碧凤蝶鳞片的微纳结构及其光学特性[J]. 光学学报, 2021, 41(5): 0523002.
- Wang L, Wang L Y, Xu K J, et al. Micro-nano structure and optical characteristics of Achillidesbianor Cramer scales[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(5): 0523002.
- [21] 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.
- Chen Q, Wen L, Yang X G, et al. Structural color technology for high pixel density image sensors[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(8): 0823010.
- [22] Palik E D. Handbook of optical constants of solids[M]. New York: Academic Press, 1998.
- [23] Ghosh G. Dispersion-equation coefficients for the refractive index and birefringence of calcite and quartz crystals[J]. Optics Communications, 1999, 163(1/2/3): 95-102.
- [24] Mahani F F, Mokhtari A, Mehran M. Design and development of aluminum nanoring arrays for realization of dual-mode operation plasmonic color filters[J]. Journal

- of the Optical Society of America B, 2018, 35(8): 1764-1771.
- [25] Zhao J C, Yu X C, Zhou K, et al. Polarization-sensitive subtractive structural color used for information encoding and dynamic display[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 138: 106421.
- [26] Li Y, Yue W J, Chen Z X, et al. Large-area structural color filtering capitalizing on nanoporous metal-dielectric-metal configuration[J]. Nanoscale Research Letters, 2018, 13(1): 217.
- [27] Luo S S, Yang J B, He X, et al. Design and application research of all-dielectric nanostructure colorful display[J]. Applied Sciences, 2019, 9(14): 2937.
- [28] Vashistha V, Vaidya G, Hegde R S, et al. All-dielectric metasurfaces based on cross-shaped resonators for color pixels with extended gamut[J]. ACS Photonics, 2017, 4(5): 1076-1082.