

基于金属-电介质-金属结构的滤波器提升LCD色域的研究

孙岩, 张弛, 李小帅, 杨艳灵, 马红梅, 孙玉宝

引用本文:

孙岩, 张弛, 李小帅, 等. 基于金属-电介质-金属结构的滤波器提升LCD色域的研究[J]. 液晶与显示, 2020, 35(1): 19-25.

SUN Yan, ZHANG Chi, LI Xiao-shuai, et al. Improving the color gamut of LCD by a filter based on metal-dielectric-metal structure[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(1): 19-25.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203501.0019>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于分布式布拉格反射器的量子点彩膜

Quantum dot color filter on distributed Bragg reflector

液晶与显示. 2019, 34(3): 229-235 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193403.0229>

量子点背光源白平衡特性的研究

White-balance characteristic of quantum-dot backlight

液晶与显示. 2017, 32(2): 77-83 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173202.0077>

超高色域图案化量子点彩膜的研究

Ultra-high color gamut and patterned color filter based on quantum dot photoresist

液晶与显示. 2017, 32(3): 169-176 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173203.0169>

宽色域液晶显示系统的研究

Wide color gamut liquid crystal display system

液晶与显示. 2018, 33(7): 606-614 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183307.0606>

模板化蓝相液晶多波长滤波器

Multi-wavelength filters of templated blue phase liquid crystal

液晶与显示. 2019, 34(9): 835-840 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193409.0835>

文章编号:1007-2780(2020)01-0019-07

基于金属-电介质-金属结构的滤波器提升 LCD 色域的研究

孙 岩,张 弛,李小帅,杨艳灵,马红梅,孙玉宝*

(河北工业大学 应用物理系,天津 300401)

摘要:为了拓宽 LCD 的色域,提出了在背光系统中添加基于 $\text{TiO}_2\text{-Ag-TiO}_2\text{-Ag-Glass}$ 膜层结构的滤波器来优化背光源光谱。所提出的滤波器在可见光范围内可以仅通过红、绿和蓝 3 种颜色的光,而反射其他颜色的光。利用 TechWiz 1D 软件模拟了滤波器对于 LCD 色域的影响。当所提出的滤波器分别与黄色荧光粉(pc-WLED)、新红粉(KSF-LED)以及量子点(QD)背光源相结合时,LCD 的色域分别从 72% 提升至 102.6% NTSC,从 92.3% 提升至 113.8% NTSC,从 104.3% 提升至 119.9% NTSC。当入射光的角度从 0° 增加到 40° 时,3 种背光源的色域变化都很小。模拟结果表明:基于金属-电介质-金属(MDM)膜层结构的滤波器拥有小的角度依赖性,因此对实现宽色域 LCD,是一种非常有效的方法。但其光利用率很低,3 种背光源的光效率分别为 26.5%、35.4% 以及 40.7%。

关 键 词:MDM 结构;滤波器;色域

中图分类号:TN27 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20203501.0019

Improving the color gamut of LCD by a filter based on metal-dielectric-metal structure

SUN Yan, ZHANG Chi, LI Xiao-shuai, YANG Yan-ling, MA Hong-mei, SUN Yu-bao*

(Department of Applied Physics, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: In order to improve color gamut of the LCD, a filter based on $\text{TiO}_2\text{-Ag-TiO}_2\text{-Ag-glass}$ structure is added in the backlight unit to optimize the backlight spectra. The proposed filter can only transmit the red, green and blue light in visible light range, while reflecting other color light. The effect of a filter on the color gamut of LCD is simulated by TechWiz 1D software. When the proposed filter integrated with pc-WLED, KSF-LCD and QD backlight, the color gamut of LCD can be improved from 72% to 102.6% NTSC, from 92.3% to 113.8% NTSC, and from 104.3% to 119.9% NTSC, respectively. When the incident angle of light increases from 0° to 40° , the color gamut with three backlight changes a little. The simulation results show that the filter based on MDM structure has a smaller angle dependence, so it is a very effective method to realize wide color gamut LCDs. However, the light utilization rate is very low, and the light efficiency of the three backlights is

收稿日期:2019-07-19;**修订日期:**2019-09-29.

基金项目:国家重点研发计划(No. 2018YFB0703701);国家自然科学基金(No.61475042)

Supported by National Key R&D Program of China (No.2018YFB0703701); National Natural Science Foundation of China (No.61475042)

* 通信联系人, E-mail:sun_yubao@163.com

26.5%, 35.4%, and 40.7%, respectively.

Key words: MDM structure; filter; color gamut

1 引言

对于显示设备而言,色域是一个非常重要的参数。色域,也可称为色彩空间,是对色彩进行编码的方法,也指一个技术系统能够产生的色彩总和。色域越高,显示的畫面越丰富,色彩表现能力越好。目前,显示器常见的色域标准有:NTSC、sRGB、Adobe RGB、DCI-P3 和 Rec. 2020^[1]等。对于宽色域液晶显示(Liquid Crystal Display, LCD)来说,常使用量子点(QD)技术来获得宽广的色域。含镉的量子点因其具有非常窄的发射带宽和可控的发射峰,可以使 LCD 的色域达到 110% NTSC^[2-4]。然而,镉是一种有毒的重金属,它的使用受到严格的控制。无镉的量子点又存在光转换效率较低和光谱分布较宽的问题^[5]。钙钛矿量子点(PQD)可以使 LCD 的色域达到 120% NTSC,是目前和未来量子点背光技术发展的重要方向^[6-7],但其中含有的铅是一种有毒的重金属,它的使用同样受到严格的控制。背光源光谱的控制对实现宽色域 LCD 来说变得尤为重要。为了提升 LCD 的色域,人们提出了在背光系统中添加多层薄膜滤波器^[8-10]来优化背光源光谱,提高红绿蓝三色的色彩纯度,进而提升 LCD 的色域。基于干涉效应的多层薄膜滤波器虽然可以实现较高的透过率,但是角度依赖性是一个很严重的问题。为了减小角度依赖性问题,人们尝试了各种方法,提出了多种结构的滤波器,比如:基于二氧化硅-非晶硅结构的滤波器^[11]、基于二氧化钛-铬-非晶硅-银多层膜结构的滤波器^[12]、基于金属-电介质-金属结构的滤波器^[13-15]以及基于金属-电介质结构的滤波器^[16-17]等。以上提及的滤波器可以透过某一波长范围内光,而反射剩余波长的光,可以通过调节参数来确定透射光的颜色,在实现单一颜色透过的情况下,具有非常小的角度依赖性,但其作为彩色显示器的彩色滤色膜需要控制器件中的介质膜呈现出 3 种厚度,在制作方面增加了制备难度。

本文对基于金属-电介质-金属(MDM)结构

的滤波器进行了优化,使其同时通过红绿蓝 3 种颜色的光,并反射其他颜色的光。使用 TechWiz LCD 1D 软件,模拟研究了基于 TiO_2 -Ag- TiO_2 -Ag-Glass 膜层结构的滤波器对于 LCD 色域的影响,同时也研究了光的入射角度从 0° 增加到 40° 时, LCD 色域的变化。

2 滤波器的结构和分析

图 1 为基于金属-电介质-金属膜层结构的滤波器的结构示意图。所提出的滤波器由 Ag- TiO_2 -Ag 膜层结构和一层 TiO_2 抗反射层组成。银(Ag)因其在可见光范围内具有最高的反射率和最低的光学吸收,被选择作为金属层;二氧化钛(TiO_2)因其较低的光学损耗和相对较高的折射率,被用于光学腔和抗反射层。我们可以通过调节中间电介质 TiO_2 膜层的厚度来确定透射带的数量及其位置。

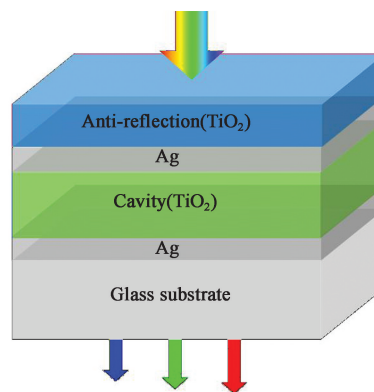


图 1 基于金属-电介质-金属结构的滤波器结构

Fig.1 Schematic diagram of filter based on metal-dielectric-metal structure

在本文模拟中,所使用的 Ag 和 TiO_2 的折射率如图 2 所示,Ag 层的厚度为 20 nm, TiO_2 光学腔的厚度为 550 nm, TiO_2 抗反射层的厚度为 520 nm,滤波器的透过率光谱如图 3 所示,透射带的峰值波长分别为 454, 524, 646 nm。

图 4 为 MDM 堆叠结构的原理图,基于法布里-珀罗腔的 MDM 膜层结构,它的透过率表达式

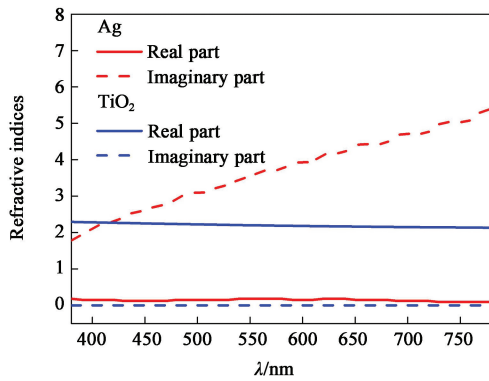
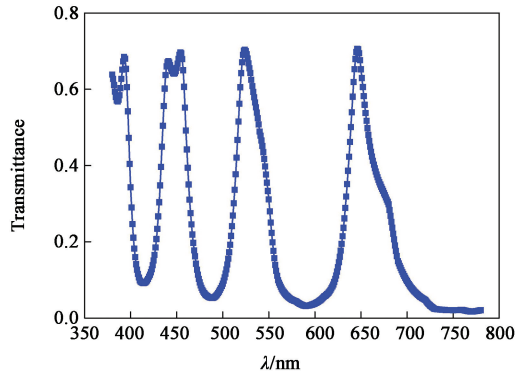
图 2 Ag 和 TiO₂ 的折射率Fig.2 Refractive index of Ag and TiO₂

图 3 滤波器在垂直入射时的光谱透过率曲线

Fig.3 Spectral transmittance curve of the filter at normal incidence

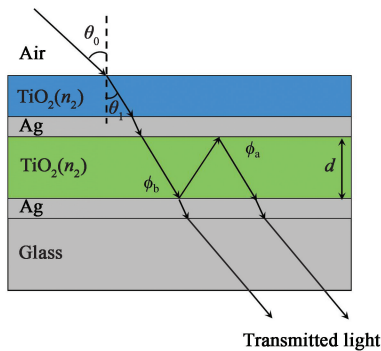
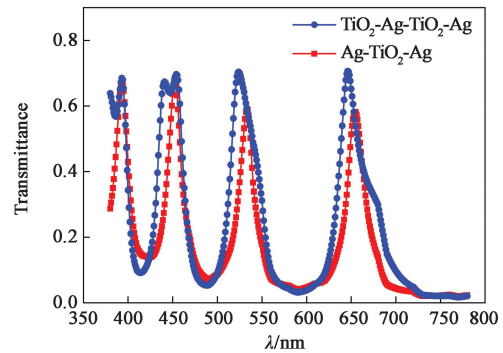


图 4 MDM 堆叠结构的原理图

Fig.4 Schematic diagram of MDM stack structure

为: $T = \frac{T_a T_b}{1 + R_a R_b - 2\sqrt{R_a R_b} \cos \delta}$, 其中 T_a 和 T_b 分别为顶部和底部 Ag-TiO₂ 界面的透过率, R_a 和 R_b 分别为相应的反射率。在腔内单次往返的总相位为: $\delta = \phi_{\text{prop}} - (\phi_a + \phi_b)$, 其中 ϕ_a 和 ϕ_b 分

别表示为顶部和底部 Ag-TiO₂ 界面处的反射相移。正入射时, 往返传播相移的表达式为: $\phi_{\text{prop}} = \frac{4\pi}{\lambda} n_2 d$, 其中, n_2 和 d 分别表示为腔的折射率和厚度。当总相位 δ 满足: $\delta = 2m\pi$ (m 为整数) 时, 有最大透过率。图 5 显示了没有和有 TiO₂ 抗反射层时的透过率光谱, 从图中可以看出: TiO₂ 抗反射层增加了透射带的峰值透过率, 同时降低了反射带的透过率。

图 5 没有和有 TiO₂ 抗反射层的透过率曲线Fig.5 Transmittance curves without and with TiO₂ anti-reflection layer

3 模拟结果

我们将基于 TiO₂-Ag-TiO₂-Ag-Glass 结构的滤波器分别与黄色荧光粉 (pc-WLED)、新红粉 (KSF-LED) 以及量子点 (QD) 背光源相结合, 它们的透射光谱如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 滤波器优化了背光源光谱, 使得光谱中红绿蓝三色对应的发光峰变窄, 同时消除了光谱中的杂光部分, 提高了红绿蓝三色的色彩纯度。然后, 利用 TechWiz 1D 软件模拟了 LCD 的色域^[18]。当 pc-WLED 背光源与彩色滤光片相结合时, 其色域在 CIE1931 色彩空间为 72% NTSC。图 7 为没有和有滤波器时 LCD 的色域图。从图 7 中可以看出: 对于 pc-WLED 背光源, LCD 的色域从 72% 提升至 102.6% NTSC, 提升了 30.6% NTSC; 对于 KSF-LED 背光源, LCD 的色域从 92.3% 提升至 113.8% NTSC, 提升了 21.5% NTSC; 对于 QD 背光源, 色域从 104.3% 提升至 119.9% NTSC, 提升了 15.6% NTSC。由于 QD 背光源其本身的发射光谱较窄, 因此滤波器对其光源光谱的优化相比

于 pc-WLED 和 KSF-LED 两种背光源较小,从而 LCD 色域提升的幅度也相对较小。表 1 和表 2 给出了没有和有滤波器时 LCD 详细的色度坐标。

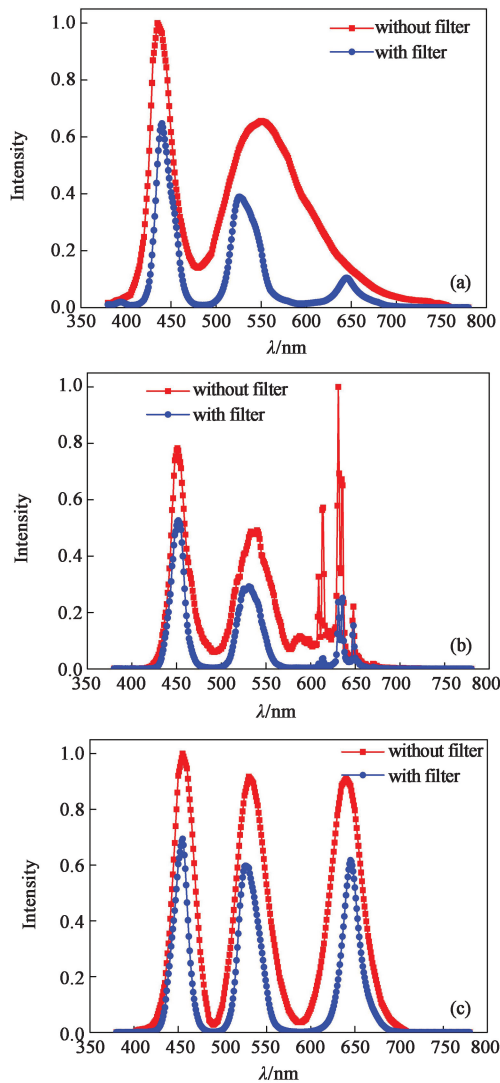


图 6 不同背光源在有和没有滤波器情况下的透射光谱。(a)黄色荧光粉;(b)新红粉;(c)量子点。

Fig.6 Transmission spectra of backlight with/without filter. (a) pc-WLED; (b) KSF-LED; (c) Quantum dots.

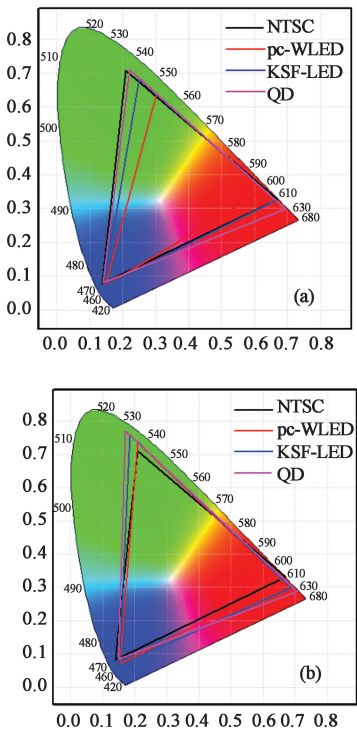


图 7 LCD 的色域图。(a)没有加滤波器;(b)加滤波器。

Fig.7 Color gamut of LCD. (a) With filter; (b) Without filter.

与传统的多层薄膜滤波器一样,基于 MDM 结构的滤波器也有角度依赖性问题。当光线倾斜入射时,透过率曲线会向短波长方向移动。如图 8 所示,光线的入射角度越大,透过率曲线蓝移的就会越明显。当光的入射角度为 10° 时,3 个透射带均向短波长区域移动了 1 nm,随着入射角度的继续增加,3 个透射带移动的距离不再一致。当光的入射角度增加到 40° 时,透射带的峰值波长分别位于 438,505,621 nm 处,与垂直入射时相比,3 个透射带分别移动了 16,19,25 nm。图 9 显示了光的入射角在 $0^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 范围内,3 种背光源的色域变化。当光的入射角度从 0° 增加到 40° 时,对于 pc-WLED 背光源,LCD 的色域从 102.3% 增加到 104.9%

表 1 不同背光源下没有添加滤波器时 LCD 的色域

Tab.1 Color gamut of LCD without the filter for various backlight

	pc-WLED		KSF-LED		Quantum dots	
	x	y	x	y	x	y
R	0.628 0	0.356 7	0.663 5	0.325 8	0.693 8	0.300 7

续 表

	pc-WLED		KSF-LED		Quantum dots	
G	0.303 4	0.641 4	0.250 9	0.685 2	0.222 2	0.713 2
B	0.149 3	0.074 5	0.145 2	0.071 7	0.143 1	0.082 6
Color gamut	72.0%		92.3%		104.3%	

表 2 不同背光源下添加滤波器后 LCD 的色域

Tab.2 Color gamut of LCD with the filter for various backlight

	pc-WLED		KSF-LED		Quantum dots	
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>x</i>	<i>y</i>
R	0.648 1	0.294 6	0.681 2	0.290 4	0.707 6	0.282 3
G	0.206 2	0.742 4	0.191 6	0.756 5	0.180 4	0.766 0
B	0.155 8	0.058 6	0.151 7	0.058 8	0.149 4	0.074 4
Color gamut	102.6%		113.8%		119.9%	

NTSC,增加了 2.3%;对于 KSF-LED 背光源, LCD 的色域从 113.8%降到 112.7% NTSC,减少了 1.1%;对于 QD 背光源, LCD 的色域从 119.9%降到 114.9% NTSC,减少了 5%。

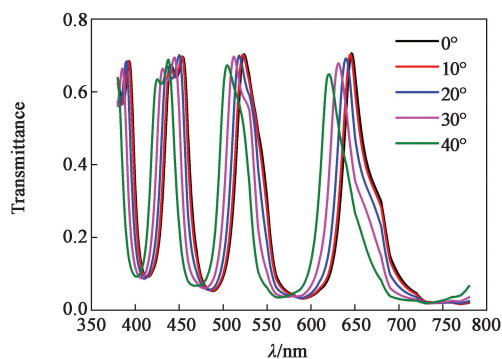


图 8 不同入射角度下滤波器的透过率光谱

Fig.8 Transmittance spectra of filter for different incident angle

如图 3 所示,基于 MDM 结构滤波器的通带呈三角形,透射光仅在中心波长附近有较高透过率,当入射波长偏离中心波长时,滤波器的透过率会迅速降低,一半左右的透射能量位于半高宽之外,光损失较大。同时金属膜由于具有较高的吸收,使得峰值透过率大大降低。表 3 给出了添加滤波器后 LCD 的光效率。pc-WLED、KSF-LED 以及量子点 3 种背光源的光效率分别为 26.5%、35.4%以及 40.7%。

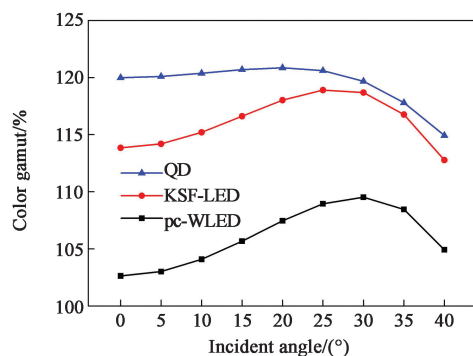


图 9 3 种背光源在不同入射角度下 LCD 的色域

Fig.9 Color gamut of LCD of different incident angle for three backlight

表 3 不同背光源下添加滤波器后 LCD 的光效率

Tab.1 Optical efficiency of LCD with the filter for various backlight

	pc-WLED	KSF-LED	Quantum dots
Efficiency	26.5%	35.4%	40.7%

4 结 论

本文研究了基于 $\text{TiO}_2\text{-Ag-TiO}_2\text{-Ag-Glass}$ 膜层结构的滤波器对 LCD 色域的影响。通过模拟发现,所提出的滤波器可以使 LCD 的色域分别

从 72% 提升至 102.6% NTSC (pc-WLED 背光源), 从 92.3% 提升至 113.8% NTSC (KSF-LED 背光源), 从 104.3% 提升至 119.9% NTSC (QD 背光源)。当光的入射角度从 0° 增加到 40° 时, 显示器的色域变化较小。模拟结果表明, 对于实现宽

色域 LCD, 基于 MDM 结构的滤波器是一种有效的方法, 但是该方法在光损失方面很大, pc-WLED、KSF-LED 以及量子点, 3 种背光源的光损失分别为 73.5%、64.6% 以及 59.3%, 后面的研究工作将关注于光损失的降低。

参 考 文 献:

- [1] CHEN H W, LEE J H, LIN B Y, *et al.* Liquid crystal display and organic light-emitting diode display: present status and future perspectives [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(3): 17168.
- [2] LUO Z Y, CHEN Y, WU S T. Wide color gamut LCD with a quantum dot backlight [J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 26269-26284.
- [3] KANG Y Y, SONG Z C, JIANG X F, *et al.* Quantum dots for wide color gamut displays from photoluminescence to electroluminescence [J]. *Nanoscale Research Letters*, 2017, 12: 154.
- [4] AKAHANE K, SHIBATA Y, ISHINABE T, *et al.* Wide-viewing-angle band-pass reflective polarizer for wide-color-gamut LCDs [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2017, 48(1): 988-991.
- [5] CHEN H W, ZHU R D, TAN G J, *et al.* Enlarging the color gamut of liquid crystal displays with a functional reflective polarizer [J]. *Optics Express*, 2017, 25(1): 102-111.
- [6] 季洪雷, 周青超, 潘俊, 等. 量子点液晶显示背光技术[J]. 中国光学, 2017, 10(5): 666-680.
- [7] JI H L, ZHOU Q C, PAN J, *et al.* Advances and prospects in quantum dots based backlights [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(5): 666-680. (in Chinese)
- [8] 王巍, 李一, 宁平凡, 等. 广色域钙钛矿量子点/荧光粉转换白光 LED[J]. 发光学报, 2018, 39(5): 627-632.
- [9] WANG W, LI Y, NING P F, *et al.* Perovskite quantum dot/powder phosphor converted white light LEDs with wide color gamut [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(5): 627-632.
- [10] ASGHAR M H, KHAN M B, NASEEM S. Modeling thin film multilayer broad-band-pass filters in visible spectrum [J]. *Czechoslovak Journal of Physics*, 2003, 53(12): 1209-1217.
- [11] SHOU C H, LUO Z Y, WANG T, *et al.* Investigation of a broadband TiO₂/SiO₂ optical thin-film filter for hybrid solar power systems [J]. *Applied Energy*, 2012, 92: 298-306.
- [12] FAN J, HSIAO K, LEE Y J, *et al.* A new solution without quantum dots for LCD to achieve more than 90% BT. 2020 [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2018, 49(1): 949-952.
- [13] SHRESTHA V R, LEE S S, KIM E S, *et al.* Non-iridescent transmissive structural color filter featuring highly efficient transmission and high excitation purity [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 4921.
- [14] 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.
- [15] PARK C S, SHRESTHA V R, LEE S S, *et al.* Omnidirectional color filters capitalizing on a nano-resonator of Ag-TiO₂-Ag integrated with a phase compensating dielectric overlay [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 8467.
- [16] PARK C S, SHRESTHA V R, LEE S S, *et al.* Trans-reflective color filters based on a phase compensated etalon enabling adjustable color saturation [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 25496.
- [17] YANG C Y, MAO K N, SHEN W D, *et al.* Tunable, omnidirectional structural color on reflection based on metal-SiO_x-metal structure [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(24): 241104.
- [18] LEE K T, HAN S Y, PARK H J. Omnidirectional flexible transmissive structural colors with high-color-purity and high-efficiency exploiting multicavity resonances [J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(14): 1700284.
- [19] ZHENG X W, YANG C Y, ZHAO K, *et al.* High-color-purity transmissive colors with high angular tolerance based on metal/dielectric stacks [J]. *Optics Communications*, 2019, 434: 70-74.
- [20] 张建青, 姜中敏, 黄清明, 等. 普通 LCD 显示器色域边界的准确计算[J]. 发光学报, 2019, 40(1): 130-136.
- [21] ZHANG J Q, JIANG Z M, HUANG Q M, *et al.* Accurate calculation of color gamut boundary of normal LCD

display screen[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(1): 130-136. (in Chinese)

作者简介:



孙 岩(1994—),女,河北秦皇岛人,硕士研究生,2017 年于邢台学院获得学士学位,主要从事液晶器件方面的研究。Email: 1253393983@qq.com



孙玉宝(1975—),男,河北沧州人,博士,教授,2010 年于河北工业大学获得博士学位,主要从事液晶显示器件方面的研究。E-mail:sun_yubao@163.com