

微光系统 CMOS 光学调色膜的研制

张静^{1**}, 孙宇勃^{1*}, 付秀华¹, 刘冬梅¹, 母一宁², 李爽³

¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

² 长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022;

³ 光驰科技(上海)有限公司, 上海 200444

摘要 针对微光系统光子数量较少的问题, 研制出符合色度学的光学调色膜, 构成六基色彩色滤镜, 从而提升色彩还原度。通过对光谱特性的分析, 利用 Essential Macleod 膜系设计软件以及 Mathcad 工程计算软件, 建立采点迭代法优化模型, 实现光学调色膜的膜系设计。采用电子束热蒸发方法制备薄膜。利用光控与晶控相结合的方法进行膜厚控制, 以膜堆为单元进行反演分析, 实现光学调色膜的研制。该薄膜通过光谱测试, 满足使用要求。

关键词 薄膜; 彩色微光夜视; 彩色滤镜; 光学调色膜; 膜系设计; 膜厚控制

中图分类号 O484

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.093101

Development of CMOS Optical Color Modulation Films for Low-Light-Level Systems

Zhang Jing^{1**}, Sun Yubo^{1*}, Fu Xiuhua¹, Liu Dongmei¹, Mu Yining², Li Shuang³

¹ College of Photoelectric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

² College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

³ Optorun (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200444, China

Abstract In this study, we develop optical color modulation films in accordance with colorimetry to address the problem of low photon quantity observed in a low-light-level system. This system comprises a six-color filter, promoting color rendition. Further, we develop a data acquisition and iteration method model, which can be used to obtain the film design of the optical color modulation films by analyzing the spectral properties and combining the Essential Macleod film design software with the Mathcad engineering calculation software. The films are deposited via electron beam evaporation. Subsequently, we combine the quartz crystal deposition monitoring technology with the optical deposition monitoring technology to control the film thickness. Furthermore, optical color modulation films can be developed by performing inverse analysis with respect to film stacks. The obtained films pass the spectrum test and satisfy the application requirements.

Key words thin films; low light level color night vision technology; color filters; optical color modulation film; film design; control of film thickness

OCIS codes 310.1620; 310.1860; 310.4165; 310.6860

1 引言

互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感器有着集成性强及可靠性高的特点, 在成像方面具有很广泛的应用^[1]。在 CMOS 图像传感器每个像素点

上镀制光学调色膜, 构成微光系统 CMOS 彩色滤镜, 实现彩色微光夜视^[2-3]。

近年来, 国内外学者在对彩色夜视成像技术和 CMOS 彩色滤镜的研究中取得了一定的成果。在彩色夜视成像技术方面, OKSI 公司于 2007 年通过

收稿日期: 2020-02-10; 修回日期: 2020-02-19; 录用日期: 2020-02-25

基金项目: 吉林省教育厅“十三五”科学研究规划项目(JJKH20181097KJ)

* E-mail: sunyubo_optics@126.com; ** E-mail: zhangjing840225@163.com

在 CMOS 探测器前增加液晶滤光片,提升了色彩还原度,如:陈一超等^[4]于 2015 年研制出基于 CCD 的三基色滤光片,在短波、中波、长波相应波段,其透过率接近或超过 80%;白玉等^[5]于 2017 年基于近红外全透的红、绿、蓝滤光片的电子倍增 CCD(EMCCD)真彩成像方法,结合图像处理,获得了彩色微光图像。在彩色滤镜方面:李宏彦等^[6-8]将 5 种新型的三芳基甲基衍生物作为滤色染料,研制出在 450 nm 处基于化学色原理的透射率为 80% 的彩色滤镜;Wang 等^[9-12]在 CMOS 基础上建立了基于结构色原理的彩色滤镜,有效降低了成像区域的空间串扰。

在微光领域,提升光子接收数量以及保证 CMOS 各像素点接收到的光信号颜色属性更加突出是真彩夜视成像技术的关键。目前针对主流成像技术的研究大多是在 CIE-1931RGB 系统上进行的,但在彩色微光夜视领域的研究较少。本文提出一种用于微光系统 CMOS 的六基色光学调色膜,在保证可见光颜色属性的同时增加光子接收数量,更利于微光条件下的真彩还原。

2 光学调色膜光谱参数的确定

在生物视觉系统中,两种不同的光感受器是形成彩色视觉的基本要求,基于 3 种光感受器的三基色可复原 0.4~0.8 μm 内所有的彩色信息,因此传统的 CIE-1931 RGB 色度体系在多种成像系统中都有着广泛的应用,但三基色在光子数量较少的微光环境下会浪费掉一定比例的光子,不利于真彩还原^[13-14]。若在三基色的基础上加大各颜色滤光膜带宽,颜色属性中的彩度便会被破坏,易出现伪彩现象。

不同生物用于提取外界色度信息的光感受器在数量上存在差异,目前已知的具有色觉系统的生物大多数拥有 2~4 种光感受器,而虾蛄眼具有 16 种光感受器^[15-17],拥有更为复杂的色觉系统,与只有 3 种光感受器的人眼相比,虾蛄眼可提取更丰富的色彩信息,因此本文依据虾蛄眼色觉系统,提出一种用于彩色微光夜视成像的多谱段光学调色膜。虾蛄眼中 16 种光感受器中的 9 种用于可见光颜色识别,响应范围为 0.3~0.7 μm ,如图 1 所示,图中 R8 至 R3P 表征虾蛄眼中 9 种光感受器的感光细胞。若完全根据虾蛄眼视觉响应曲线^[18],采用 9 种基色还原时,响应波段的中心波长过于接近,分色效果差,且其交叠区域过大,无法获得较高的颜色彩度。

在三基色基础上增加橙色 (orange)、黄色 (yellow)、青色 (cyan) 3 种颜色,构成六基色。人眼

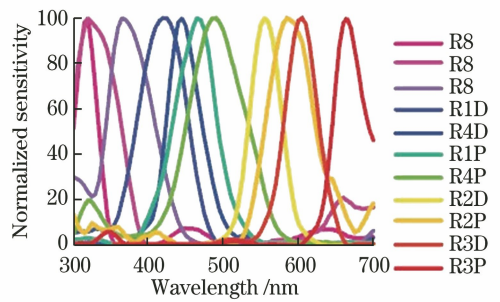


图 1 虾蛄眼视觉响应曲线

Fig. 1 Visual response curves of mantis shrimp

无法探测紫外光,且人眼所能识别的可见光的长波波段大于虾蛄眼,故六基色对应的波段为 0.4~0.8 μm 。CIE-1931RGB 色度体系下^[19],红色对应的波长为 700 nm,绿色对应的波长为 546.1 nm,蓝色对应的波长为 435.8 nm,该色度体系在多种成像系统上都有着广泛的应用,且对六基色光谱的确定有一定借鉴意义。由于六基色长波波段止于 0.8 μm ,波段较宽,在保证每种颜色色调的前提下,红、绿、蓝三色调色膜中心波长在三基色基础上分别红移至 726 nm、564 nm、455 nm。橙、黄、青三色中心波长对应的波段为 590~620 nm,570~590 nm,475~495 nm。橙色与黄色、蓝色与青色的对应波长较为接近,颜色的彩度无法得到保证。因此,为保证颜色彩度,将橙色调色膜的中心波长调整至橙红色波段,对应波长为 672 nm;黄色调色膜的中心波长调整至橙黄色波段,对应波长为 618 nm,青色调色膜的中心波长调整至青绿色波段,对应波长为 510 nm。六基色通带是在虾蛄眼光感受器响应波段基础上适当增加带宽,使通带可覆盖可见光波段。人眼对 550 nm 处的黄绿色光最为敏感,因此将绿色调色膜对应的带宽定为 50 nm,其两侧的黄色、青色调色膜对应的带宽定为 120 nm;人眼对蓝色的敏感度较差,将蓝色调色膜带宽确定为 200 nm;当红色调色膜的通带为 50 nm 时,对应光谱截止于六基色波段红端的 800 nm,最终为保证红色、橙色、黄色调色膜交叠区域适宜,确定橙色调色膜带宽为 70 nm。调整后的六基色光谱在光子接收数量方面有所提升,提高了微光系统 CMOS 的灵敏度。同时,因为带宽的适当增加,任意两种颜色对应的通带在透过率较低的区域存在交叠,交叠的存在可以更好地判定 CMOS 的后期彩色还原效果,提高色彩还原的鲁棒性。

生物眼的视觉响应曲线呈类高斯分布,因此光学调色膜光谱透射曲线采用高斯线型。在虾蛄眼视觉响应曲线基础上调整得到的六基色光学调色膜透

射光谱如图 2 所示。

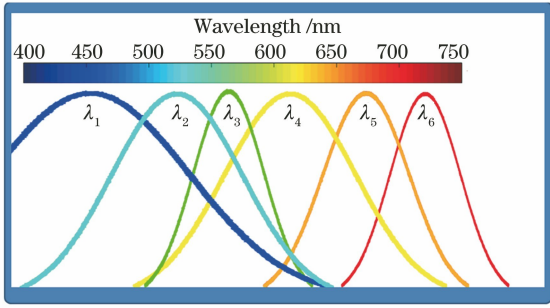


图 2 六基色光谱波段分布

Fig. 2 Six primary colors' spectrum band distribution

六基色 (red, orange, yellow, green, cyan, blue) 光学调色膜的参数如表 1 所示。

表 1 光学调色膜参数

Table 1 Specifications of the optical color modulation film

Parameter	Specification
Substrate	SiO ₂
Spectrum range / nm	380–800
Bandwidth / nm	50(red), 70(orange),
	120 (yellow), 50 (green)
Central wavelength / nm	120 (cyan), 200 (blue)
	726 (red), 672(orange),
	618(yellow), 564 (green),
	510(cyan), 455 (blue)

将光学调色膜按一定规律分布于 CMOS 图像传感器 SiO₂ 钝化层上, 构成六基色彩色滤镜^[20-21], 排列结构如图 3 所示。

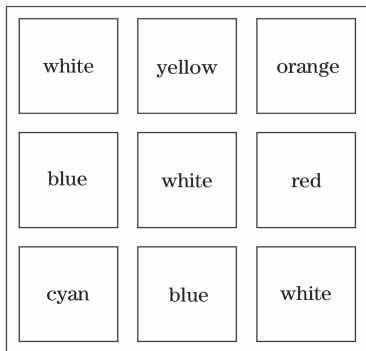


图 3 光学调色膜排列示意图

Fig. 3 Arrangement diagram of the optical color modulation film

3 膜系设计

CMOS 钝化层材料为 SiO₂, 且 SiO₂ 薄膜对光的吸收率很小, 同时 SiO₂ 与 Ti₃O₅ 有较好的结合性, 在较厚的膜厚下不易脱膜, 因此选择 SiO₂ 作为低折射率材料, Ti₃O₅ 作为高折射率材料。

本实验以熔融石英 (SiO₂) 作为基底材料, 其透明区为 0.185~2.5 μm。0.55 μm 处的折射率范围为 1.44~1.48, 在 0.4~0.8 μm 波段的吸收较小。采用 Cary7000 分光光度计对实验中的基底进行测试, 0.55 μm 处透射率为 93.27%, 反射率为 6.72%。

光学调色膜的功能与带通滤光膜类似, 但其色彩明度、彩度、饱和度都优于带通滤光膜。当中心波长 λ₀ 与半峰全宽 Δ 的比值大于 15% 时^[22], 通带宽度较大, 不适宜用带通滤光膜系进行设计。经计算, 要求中黄色 (yellow)、青色 (cyan)、蓝色 (blue) 的 λ₀/Δ 分别为 19.42%、23.53%、43.96%, 因此这三种颜色不适宜采用带通滤光膜系。本文采用长、短波通叠加的结构, 选择 Sub|β₁(0.5H L 0.5H)^sβ₂(0.5L H 0.5L)^s|Air 作为宽带光学调色膜的基础膜系, 其中 s 为对称膜系结构数, β₁、β₂ 均为干涉截止滤光膜的匹配系数。

针对调色膜的光谱要求, 提出基于采点迭代法的膜系优化方法, 用符合光谱数学分布的离散目标对基础膜系进行优化。使用工程计算软件 Mathcad 编程, 根据高斯函数的基础形式, 通过计算获得步长为 1 nm 时每个波长所对应的透过率值, 并进行采点。Mathcad 软件中采点过程可表示为

$$\begin{cases} x = 400, 401, \dots, 800 \\ a = 100 \\ b = \lambda \\ c(\Delta) = \Delta / 2.355 \\ y(x) = a \cdot \frac{(x - b)^2}{\exp\{2 [c(\Delta)]^2 \times (-1)\}} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: x 为所取对应波段步长为 1 nm 的点; λ 为光学调色膜的中心波长; Δ 为半峰全宽; a 为高斯函数的峰值; b 为峰值对应的横坐标; c 为标准差, 在数值上与高斯函数的半峰全宽相关。根据选取函数得到对应的横、纵坐标值, 即获得透射光谱所需的波长及透射率值, 采点部分完成。将从 Mathcad 软件获得的波长和透射率值输入膜系设计软件, 使其作为离散优化目标, 采用针插法对膜系进行优化, 即可获得所需的高斯曲线。

以红色调色膜为例, 其基础结构为: Sub|0.45(0.5H L 0.5H)⁵0.62(0.5H L 0.5H)⁷0.95(0.5L H 0.5L)⁷|Air, 优化后的结构为: Sub|0.10H 0.12L 0.12H 0.13L 0.10H 0.12L...0.18H 0.26L 0.26H 0.11L|Air; 参考波长为 930 nm。

其余调色膜结构与红色调色膜相似, 光谱如图 4 所示。

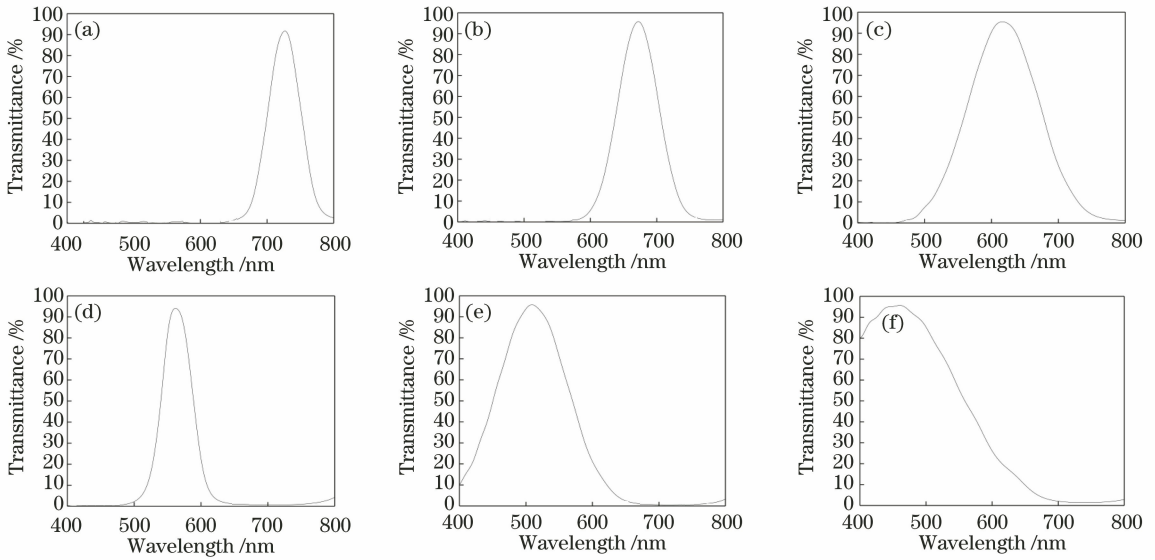


图4 光学调色膜设计曲线。(a)红色;(b)橙色;(c)黄色;(d)绿色;(e)青色;(f)蓝色

Fig. 4 Design curves of the optical color modulation film. (a) Red; (b) orange; (c) yellow; (d) green; (e) cyan; (f) blue

4 薄膜制备

本实验所用的沉积设备为 OPTORUN 公司生产的 OTFC-1800-DBI-PX 箱式真空镀膜机。采用电子束热蒸发的方法进行薄膜制备。

镀膜前,用无水乙醇和无水乙醚按 3:1 体积比混合溶液清洁基片。使用去离子水清除醇醚混合液,用氮气吹干。行星盘角度调整至伞片行进角 45° ,伞片倾角 62° ,在真空度为 2.0×10^{-3} Pa 时用射频源轰击基片,以达到清洗基片、增加基片表面活性的目的。通过光电极值法对薄膜的光学厚度进行监控,通过石英晶控对成膜速率进行监控。具体工艺

参数如表 2 所示。

表 2 Ti_3O_5 和 SiO_2 的蒸镀工艺参数

Table 2 Evaporation process parameters of Ti_3O_5 and SiO_2

Material	Deposition rate / $(nm \cdot s^{-1})$	Temperature / $^\circ C$	Vacuum degree / $(10^{-3} Pa)$
Ti_3O_5	0.35	120	2.0
SiO_2	0.60	120	2.0

采用高能离子源辅助成膜,以增加膜层的致密性,从而获得光学性能及力学性能较好的光学调色膜。离子源参数如表 3 所示,其中: E 为中和器电流值, B 为离子源电流值; ACC 为离子源加速电压; $gas1$ 为 O_2 , $gas2$ 、 $gas3$ 均为 Ar。

表 3 离子源参数表

Table 3 Parameter table of ion source

Material	Voltage /V	Current /mA	ACC /V	$\frac{E}{B}$ /%	Volume flux / $(mL \cdot min^{-1})$		
					Gas1	Gas2	Gas3
Ti_3O_5	1400	1400	800	150	75	10	12
SiO_2	1200	1200	600	150	60	0	12

光学调色膜的层数较多,优化后属于非规整膜系,膜厚的控制是影响制备结果的关键因素。采用光学极值法^[23]可以很好地控制薄膜的光学厚度,有利于获得所需的高斯型透射光谱,采用晶控方法可以控制每一层薄膜的物理厚度,因此如何利用光控和晶控相结合的方法精确控制薄膜厚度是本实验的关键。

以红色光学调色膜为例,设计结构为:Sub|0.45 $(0.5H L 0.5H)^5 0.62(0.5H L 0.5H)^7 0.95(0.5L H$

$0.5L)^7 | Air$,其中心波长和带宽决定了调色膜的颜色属性,由于设计过程中通过调整长、短波通的堆叠来获取所需的中心波长和带宽,故在设置控制参数时按照 $0.45(0.5H L 0.5H)^5$ 、 $0.62(0.5H L 0.5H)^7$ 、 $0.95(0.5L H 0.5L)^7$ 三个膜堆分别进行设置。

根据不同膜堆对应的层数进行分组:1~10 层的高、低折射率材料分别记为 H1、L1;11~24 层的高、低折射率材料分别记为 H2、L2;25~40 层的高、低折射率材料分别记为 H3、L3。光学极值法是依

据极值点数 (peak number) 以及光控停止点 (aim value) 对薄膜光学厚度进行监控, 膜层的光学厚度及设置的监控波长决定了极值点数和光控停止点值, 依据膜堆设置三个监控波长, 很大程度上减少了监控波长的更换次数, 降低了控制误差。但同一膜堆厚度差异较大的膜层需单独设置监控波长, 并保证光控停止点值在 5~95 之间, 超出该范围将导致终止光量位于极值点附近, 控制精度较低。若设置的监控波长过多, 应对膜层的最大厚度或最小厚度进行适当限制, 以减小相邻两层物理厚度的差值。

在反演分析时, 分别设置三个膜堆不同的光控工具 (optical tooling) 因子。根据膜堆拟合测试结果, 每个膜堆对应的光控工具因子变化不宜过

大。同一测试曲线在反演时可能产生多个反演结果, 仅根据光控工具因子无法得到唯一的反演结果, 因此需要在光控工具因子的基础上引入晶控工具 (crystal tooling) 因子, 以晶控显示厚度为光控的反演分析提供参考。按膜堆分组, 反演后重新调整光控工具因子与晶控工具因子。由于成膜过程是一个非平衡过程, 需要引入晶控工具因子^[24]来控制薄膜材料的蒸发速率, 以保证镀膜状态的稳定^[25]。

采用 Cary7000 分光光度计测试六基色光学调色膜 400~800 nm 的透射光谱, 对测试结果逆向反演。经调整晶控工具因子与光控工具因子, 最终样品测试曲线如图 5 所示, 测试曲线具体参数如表 4 所示。

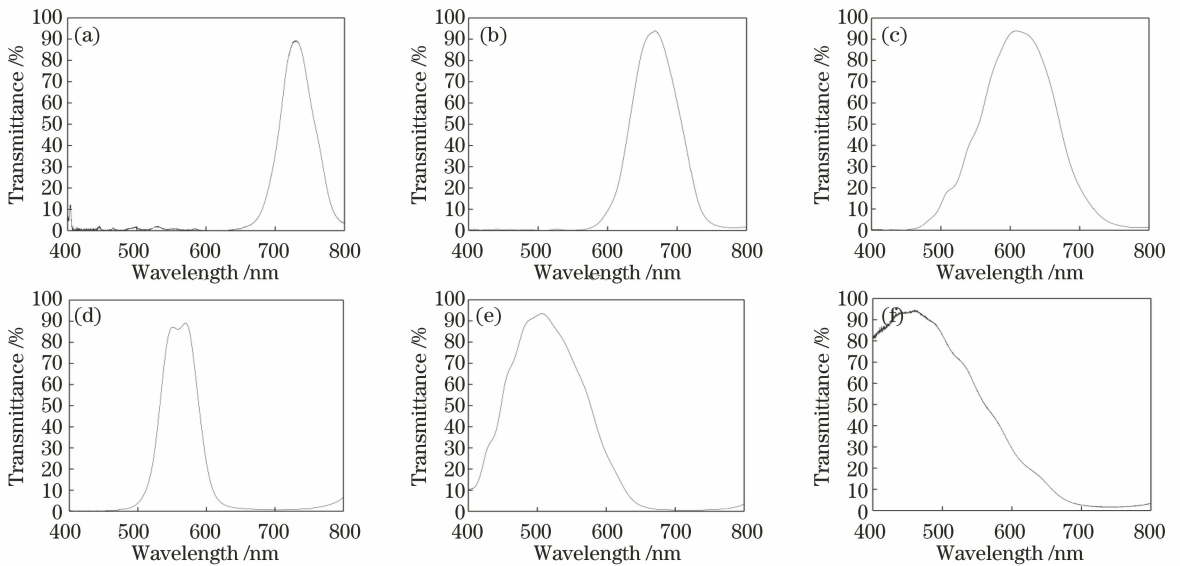


图 5 光学调色膜测试曲线。(a)红色;(b)橙色;(c)黄色;(d)绿色;(e)青色;(f)蓝色

Fig. 5 Test curves of the optical color modulation film. (a) Red; (b) orange; (c) yellow; (d) green; (e) cyan; (f) blue

表 4 测试结果具体参数

Table 4 Specifications of test results

Parameter	Red	Orange	Yellow	Green	Cyan	Blue
Peak transmittance / %	89.93	94.06	93.76	89.93	93.45	94.71
Bandwidth / nm	51	76	118	57	130	200
Central wavelength / nm	728	668	613	570	505	459

从表 4 可以看出, 测试曲线满足光谱要求, 但与设计曲线之间在光谱的平滑程度上存在一定差异。经分析, 其主要为监控误差所致。中心波长较小的黄色、绿色、青色、蓝色调色膜的膜层厚度较薄。在光控监控过程中会有极少数膜层不存在极值点, 需根据拟合的虚拟极值点进行监控, 因此存在一定监控误差。在镀膜过程中, 折射率及消光系数存在的微小变化会引入微小误差。

采用 Surfcoorder ET 4000A 型轮廓仪对镀膜前、后的基板曲率进行测量, 根据曲率变化计算薄膜应力 σ , 即

$$\sigma = \frac{E_{\text{sub}} t_{\text{sub}}^2}{6(1 - \nu_{\text{sub}}) \Delta R t_{\text{film}}}, \quad (2)$$

式中: E_{sub} 为基板杨氏模量; t_{sub} 为基板厚度; ν_{sub} 为基板泊松比; ΔR 为镀膜前、后基板曲率的变化量; t_{film} 为薄膜物理厚度。六基色光学调色膜应力数据如

表 5 所示。

表 5 光学调色膜应力

Table 5 Stress of the optical color modulation film

Type of optical color modulation film	Thickness / nm	Stress /MPa
Red	3452.95	45
Orange	2988.20	39
Yellow	2182.17	84
Green	2244.45	80
Cyan	1659.24	79
Blue	1511.44	69

5 结 论

结合色度学与微光系统的应用环境,研制出红、橙、黄、绿、青、蓝六基色光学调色膜。提出一种适用于优化特殊光谱分布的采点迭代法,实现了膜系设计;根据膜堆设置监控波长,以光控和晶控相结合的方法反演分析测试结果,提高膜厚控制精度,完成了薄膜制备。所研制的六基色光学调色膜通带在可见光波段覆盖范围更广,且较滤光膜颜色属性更加突出,同时具有较小的应力。本研究结果对提高微光夜视色彩的饱和度、还原度具有一定的理论意义和实用价值。

参 考 文 献

- [1] Li J J, Du Y G, Zhang L H, et al. Research progress on CMOS image sensors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(4): 45-52.
李继军, 杜云刚, 张丽华, 等. CMOS 图像传感器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, 46(4): 45-52.
- [2] Gao W, Zhu M, Hao Z C. Survey of color night vision technology [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(12): 1168-1179.
高文, 朱明, 郝志成. 彩色夜视技术的研究进展[J]. *液晶与显示*, 2016, 31(12): 1168-1179.
- [3] Hogervorst M A, Toet A. Fast natural color mapping for night-time imagery [J]. *Information Fusion*, 2010, 11(2): 69-77.
- [4] Chen Y C, Hu W G, Wu D S, et al. Triple-band low light level color night vision technology [J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(3): 430-434.
陈一超, 胡文刚, 武东生, 等. 三波段微光彩色夜视方法研究[J]. *应用光学*, 2015, 36(3): 430-434.
- [5] Bai Y, Chen Y J, Zhang M J, et al. Method and demonstration of true-color imaging by EMCCD [J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(4): 329-340.

- 白玉, 陈远金, 张猛蛟, 等. EMCCD 真彩色成像方法与验证 [J]. *红外技术*, 2017, 39(4): 329-340.
- [6] Li H Y, Yang J X, Lü Y Y, et al. Color filter for TFT-LCD [J]. *Advanced Display*, 2005(6): 41-44.
李宏彦, 杨久霞, 吕艳英, 等. TFT-LCD 用彩色滤光片 [J]. *现代显示*, 2005(6): 41-44.
- [7] Kim J Y, Chun S K, Choi S A, et al. The effect of fluorescence of perylene red dyes on the contrast ratio of LCD color filters [J]. *Dyes and Pigments*, 2016, 131: 293-300.
- [8] Qin G B, Yang J X, Li H Y, et al. Research of pigment-minimize technology for color filter [J]. *Advanced Display*, 2006(10): 41-44, 24.
秦国斌, 杨久霞, 李宏彦, 等. 彩色滤光片用颜料细化工艺研究 [J]. *现代显示*, 2006(10): 41-44, 24.
- [9] Wang W L, Rong X H. Design of color filter based on dielectric thin film with nano-scale grating structure [J]. *Optik*, 2016, 127(4): 1937-1939.
- [10] Zhou Y, Ye Y, Shen S, et al. Research on the characteristics of sub-wavelength grating color filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0123003.
周云, 叶燕, 申溯, 等. 亚波长光栅结构彩色滤光片研究 [J]. *光学学报*, 2011, 31(1): 0123003.
- [11] Kong W J, Zheng B B, Yun M J, et al. Guided-mode resonance filter with narrow waveband for three primary colors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 57-60.
孔伟金, 郑饼斌, 云茂金, 等. 基于导模共振效应三基色窄带滤光片的研究 [J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 57-60.
- [12] 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.
- [13] Sun Y P, Lou C, Jiang Z W, et al. Experimental research of representative wavelengths of tricolor for color CCD camera [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science Edition)*, 2009, 37(2): 108-111.
孙亦鹏, 娄春, 姜志伟, 等. 彩色 CCD 摄像机三基色代表波长的试验研究 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(2): 108-111.
- [14] Tang X, Yao L F. Design of optical filters for three primary colors [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(2): 274-277.
唐雄, 姚兰芳. 三基色滤光片的设计 [J]. *激光技术*, 2014, 38(2): 274-277.
- [15] Cronin T W, Bok M J, Marshall N J, et al. Filtering

- and polychromatic vision in mantis shrimps: themes in visible and ultraviolet vision [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2014, 369(1636): 20130032.
- [16] Chiao C C, Cronin T W, Marshall N J. Eye design and color signaling in a stomatopod crustacean *Gonodactylus smithii* [J]. *Brain, Behavior and Evolution*, 2000, 56(2): 107-122.
- [17] Cronin T, Marshall N. Multiple spectral classes of photoreceptors in the retinas of gonodactyloid stomatopod crustaceans [J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 1989, 166(2): 261-275.
- [18] Thoen H H, How M J, Chiou T H, et al. A different form of color vision in mantis shrimp [J]. *Science*, 2014, 343(6169): 411-413.
- [19] Zhu M, Zhang H. Analysis of CIE colorimetry system in printing colorimetry teaching [J]. *Printing Quality & Standardization*, 2017(3): 10-14.
朱明, 张浩. 印刷色彩学教学中对 CIE 色度学体系的分析 [J]. *印刷质量与标准化*, 2017(3): 10-14.
- [20] Batistell G, Zhang V C, Sturm J. Color recognition sensor in standard CMOS technology [J]. *Solid-State Electronics*, 2014, 102: 59-68.
- [21] Chen Q, Chitnis D, Walls K, et al. CMOS photodetectors integrated with plasmonic color filters [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(3): 197-199.
- [22] Li Z Z. *Thin optical thin film and coating technology* [M]. 8th ed. Taipei: Yixuan Book Publishing House, 2016.
李正中. *薄膜光学与镀膜技术* [M]. 8 版. 台北: 艺轩图书出版社, 2016.
- [23] Zhuang Q H, Wang S Q. Monitoring method of optical film thickness [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(10): 103102.
庄秋慧, 王三强. 光学膜厚的监控方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(10): 103102.
- [24] Liu D M, Li W Y, Fu X H, et al. Fabrication of high-reflective cavity mirrors for 457 nm laser based on intracavity frequency doubling [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(11): 1103001.
刘冬梅, 李五一, 付秀华, 等. 基于腔内倍频的 457nm 激光器高反射腔镜的研制 [J]. *中国激光*, 2018, 45(11): 1103001.
- [25] Chang M, Hua B, Zhang X D, et al. Study on film monitoring based on the photoelectric extreme value method combined with heterodyne interferometry [J]. *Optical Technique*, 2017, 43(2): 184-186.
常敏, 华博, 张学典, 等. 光电极值法结合外差干涉法监控膜厚的研究 [J]. *光学技术*, 2017, 43(2): 184-186.