

基于颜色玻璃的色温变换光学薄膜

饶东升，朱华新，晏荆龙，刘涛，胡立发

引用本文:

饶东升, 朱华新, 晏荆龙, 等. 基于颜色玻璃的色温变换光学薄膜[J]. 液晶与显示, 2021, 36(12): 1630–1636.

RAO Dong-sheng, ZHU Hua-xin, YAN Jing-long, et al. Color temperature conversion optical film based on colored glass[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(12): 1630–1636.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0243>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

实现白光LED阵列色温分布均匀化技术研究

Design of white LED array for uniform correlated color temperature distribution

液晶与显示. 2018, 33(4): 326–337 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183304.0326>

不同屏幕贴膜对显示效果的影响比较

Comparison of display effect for different screen protectors

液晶与显示. 2018, 33(9): 734–742 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183309.0734>

全染料系光刻胶在液晶显示器中的应用

Application of All Dye Blue photoresist in liquid crystal display

液晶与显示. 2020, 35(9): 933–937 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203509.0933>

不同防蓝光眼镜对屏幕显示效果的影响比较

Comparative study of different anti-blue light glasses on the effect of display

液晶与显示. 2019, 34(1): 54–62 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193401.0054>

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>

文章编号:1007-2780(2021)12-1630-07

基于颜色玻璃的色温变换光学薄膜

饶东升¹, 朱华新^{1,2*}, 晏荆龙¹, 刘 涛¹, 胡立发^{1,2}

(1. 江南大学 理学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏省轻工光电工程技术研究中心, 江苏 无锡 214122)

摘要:为了得到不同光源色温的辐射谱,提出了基于颜色玻璃和镀膜相结合的方法进行色温变换。以 3 000 K 色温的卤素灯作为标准光源,将其变换成 4 800 K 标准黑体辐射色温,根据目标色温透辐射光谱,选定 QB11 作为基底,为了进一步修正辐射谱线,选择在 QB11 基底上镀制光学薄膜。使用 Essential Macleod 薄膜设计软件设计了以 TiO_2 和 SiO_2 组合的 5 层膜系,并进行了优化,最终得到膜层厚度为 353 nm。实验结果表明,通过颜色玻璃和光学薄膜相结合的方法可有效将标准卤素灯的 3 000 K 色温变换成标准黑体辐射 4 800 K 色温,光谱偏离度质量指数为 3.67%。最终的光谱偏离质量指数表明,通过上述方法进行色温变换效果良好。

关键词:色温;颜色玻璃;光学薄膜;滤光片

中图分类号:O484 文献标识码:A doi:10.37188/CJLCD.2021-0243

Color temperature conversion optical film based on colored glass

RAO Dong-sheng¹, ZHU Hua-xin^{1,2*}, YAN Jing-long¹, LIU Tao¹, HU Li-fa^{1,2}

(1. School of Science, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Jiangsu Province Research Center of Light Industry Optoelectronic Engineering and Technology Research, Wuxi 214122, China)

Abstract: In order to obtain the radiation spectrum of different light source color temperatures, a method based on the combination of colored glass and coating for color temperature conversion was proposed. The halogen lamp with 3 000 K color temperature was used as the standard light source and transformed it into 4 800 K standard blackbody radiation color temperature. According to the target color temperature transmittance spectrum curve, QB11 was selected as the substrate. In order to further modified the radiation spectrum, the optical film is coated on QB11 substrate. A 5-layer film system composed of TiO_2 and SiO_2 was designed by using Essential Macleod film design software. After optimization, the film thickness was 353 nm. The experimental results show that, the 3 000 K color temperature of standard halogen lamp can be effectively transformed into 4 800 K color temperature of standard blackbody radiation by the combination of color glass and optical film. The spectral deviation

收稿日期:2021-09-18;修订日期:2021-11-03.

基金项目:国家自然科学基金青年基金(No.61605067);江苏省轻工光电工程技术研究中心(No.BM2014402).

Supported by Youth Fund Project of National Natural Science Foundation of China(No.61605067);Jiangsu Province Research Center of Light Industry Optoelectronic Engineering and Technology Research(No. BM2014402)

* 通信联系人, E-mail: zhuhuxin1312@163.com

quality index was 3.67%. From the final spectral deviation quality index, the color temperature transformation method is effective through above method.

Key words: color temperature; colored glass; optics film; filter

1 引言

色温是表示光线中包含颜色成分的一个计量单位。从理论上说,黑体温度指绝对黑体从绝对零度($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$)开始加温后所呈现的颜色。黑体在受热后,逐渐由黑变红,转黄,发白,最后发出蓝色光,所以色温也是一种温度衡量的方法,这个概念基于一个虚构的黑色物体(“黑体”)。色温通常用开尔文温度(K)来表示,而不是用摄氏温度单位,自然界中的太阳可以看成是一个标准的黑体,其色温为 $5\,000\sim 5\,500\text{ K}$,开尔文认为:假定某一纯黑物体,能够将落在其上的所有热量吸收,而没有损失,同时又能够将热量生成的能量全部以“光”的形式释放出来,它产生辐射最大强度的波长随温度变化而变化。因此,任何光线的色温是相当于黑体散发出同样颜色时所受到的“温度”^[1-2]。

基于上述色温的概念,生活中常用的光源都有自己特定的色温,如白炽灯的色温在 $2\,800\text{ K}$ 左右,卤素灯的色温约为 $3\,000\text{ K}$,高压汞灯的色温约为 $6\,000\text{ K}$ ^[3]。标准光源的色温值是恒定值,没有一种光源能得到连续变化的色温值,而实际的光辐射测量中,如显示器的颜色校正、探测器的辐射定标,都需要改变光源的色温或者其光谱能量分布,以满足实际测量的要求^[4],即通过一种光源进行色温变换得到另一种色温的光源。最早是使用液体滤光器,但是液体的浓度以及光线长波的液体深度都对色温变化有较大的影响,逐渐被淘汰。后来我国生产了几种色温变化的滤光片,分别提高和降低色温滤光片(SJB和SSB系列),通过实际的麦尔德值(MRD)差变换光源的色温^[5]。但实际应用过程中,这些升降色温滤光片的变换色温效率一般,一方面可供选择的滤光片不多,另一方面色温变换的值有限,很难满足实际应用的需求。因此,本文提出基于颜色玻璃和镀膜相结合的方法,制作滤光片进行色温变换。首先通过光源色温变换前后的光谱曲线,得到滤光片的透过率曲线,然后再根据该曲线,寻找合适的颜色玻璃进行组合搭配,最后再通过膜系设计,对

颜色玻璃的透过率进行修正,从而达到色温变换的目的^[6]。

2 理论分析

根据普朗克定律,可以得到黑体辐射的辐射率与频率 ν 的关系:

$$M_b(\nu, T) = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (1)$$

根据普朗克定律,可以得到几种典型色温光源的光谱辐射曲线,如图1所示。

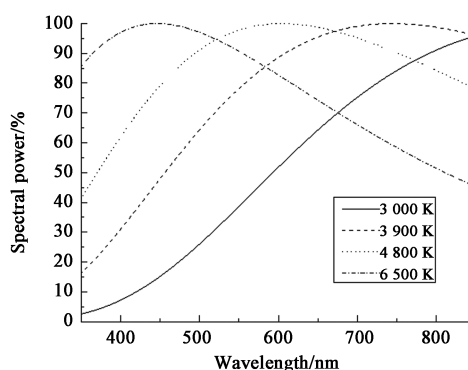


图1 不同色温光源的辐射谱线

Fig.1 Radiation lines of light sources with different color temperatures

从图1可看,不同色温光源的辐射中心波长不同,辐射中心波长满足维恩位移^[7]:

$$T\lambda_m = b \quad (2)$$

按照传统思路,采用在透明玻璃如K9、融石英等透明基底的表面镀制光学薄膜,可实现对应的色温曲线。要实现不同色温光源直接的转换,即通过滤光片去实现,可以通过简单的一个模型结构去表示,如图2所示。

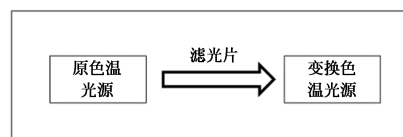


图2 通过滤光片实现色温变换示意图

Fig.2 Schematic diagram of color temperature conversion through filters

根据上述原理,即可推算出目标滤光片的光谱透过率曲线,如我们将 3 000 K 标准色温的卤素灯变换成 4 800 K 的色温光源,可通过 $E_{4\,800\,K}(\lambda)/E_{3\,000\,K}(\lambda)$ 比值得到目标色温滤光片的透射率要求。目标透射率即为我们寻找颜色玻璃和膜系设计的起点,该滤光片可以由一片或多片滤光片组合而成,我们将根据实际选择,图 3 为归一化的目标滤光片的透射率要求。

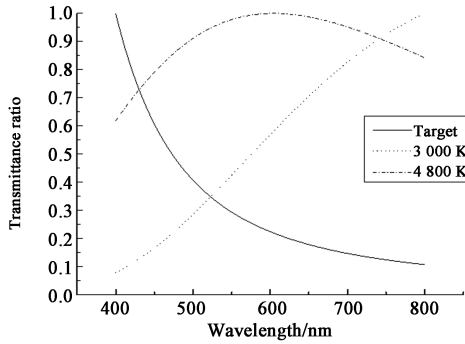


图 3 理想滤光片透射曲线

Fig.3 Transmission curves of ideal filter

从图 3 Target 曲线可以看出,在 K9 或融石英玻璃等透明基底表面实现该膜系透过率显然难度很大。我们无法实现如此宽的过渡带,在 400~800 nm 均为过渡带,且需要从 750 nm 以后开始截止,并且色温在短于 800 nm 波长均是有贡献的,也就是截止区为 750~850 nm。而光学薄膜中截止深度和过渡带是两个矛盾的特性,在要求截止深度较大的情况下,膜系过渡带肯定较小(过渡带较为陡峭),相反要想获得较大的过渡带,无法获得较大的截止深度。因此,直接通过镀膜的方式实现如图 3 Target 的特性较为困难。

3 变色温滤光片模拟与设计

基于上述分析,我们提出了采用颜色玻璃和镀膜相结合的方法来实现。首先建立颜色玻璃库,然后根据图 3 的目标曲线,通过编写 Python 程序寻找适合的颜色玻璃,筛选出曲线相似度大于 60% 的颜色玻璃,使用 Matplotlib 将数据可视化,如图 4 所示。

我们将定义光谱偏离度质量指数函数,检验光谱匹配效果,定义如下:

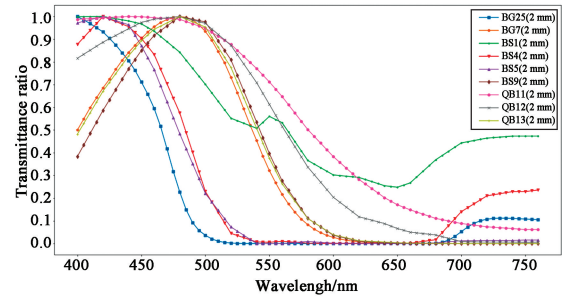


图 4 Python 筛选出的颜色玻璃透射曲线

Fig.4 Transmission curves of color glass screened by Python

$$f_1^* = \frac{\int |s_{rel,mod}^*(\lambda) - X_D(\lambda)| \cdot d\lambda}{\int X_D(\lambda) \cdot d\lambda} 100\% \quad (3)$$

$$s_{rel,mod}^*(\lambda) = \frac{\int X_D(\lambda) \cdot d\lambda}{\int X_R(\lambda) \cdot d\lambda} X_R(\lambda) \quad (4)$$

根据 Python 寻找匹配的颜色玻璃,筛选出 QB5、QB11、QB9、QB13 等 9 种颜色玻璃。经过综合对比,QB11 最为理想,图 5 是 QB11 与理想滤光片的归一化处理后的透过率曲线对比。

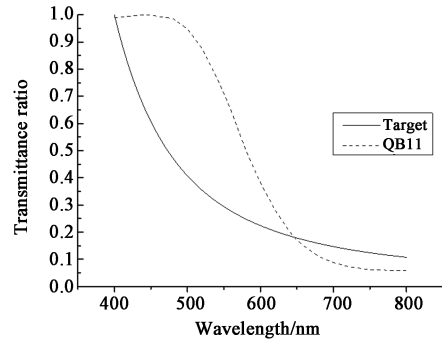


图 5 QB11 与理想滤光片归一化后透过率对比

Fig.5 Comparison of transmittance between QB11 and ideal filter after normalization

从图 5 可以看出,光谱偏离度质量指数为 33.98%,两者的曲线还存在一定差异。若只采用 QB11 裸片,根据色温计算公式, T_c 只与 x 、 y 色度坐标有关,色温值不变等同于色度坐标不变,由此可知透射光谱中波段波长间的转换系数为:

$$x_{\lambda 1} = \frac{\bar{x}_{\lambda 1} S_{\lambda 1} T_{\lambda 1} \Delta \lambda}{(\bar{x}_{\lambda 1} + \bar{y}_{\lambda 1} + \bar{z}_{\lambda 1}) S_{\lambda 1} T_{\lambda 1} \Delta \lambda} \quad (5)$$

$$y_{\lambda 1} = \frac{\bar{y}_{\lambda 1} S_{\lambda 1} T_{\lambda 1} \Delta \lambda}{(\bar{x}_{\lambda 1} + \bar{y}_{\lambda 1} + \bar{z}_{\lambda 1}) S_{\lambda 1} T_{\lambda 1} \Delta \lambda} \quad (6)$$

$$x_{\lambda 2} = \frac{\bar{x}_{\lambda 2} S_{\lambda 2} T_{\lambda 2} \Delta \lambda}{(\bar{x}_{\lambda 2} + \bar{y}_{\lambda 2} + \bar{z}_{\lambda 2}) S_{\lambda 2} T_{\lambda 2} \Delta \lambda}, \quad (7)$$

$$y_{\lambda 2} = \frac{\bar{y}_{\lambda 2} S_{\lambda 2} R_{\lambda 2} \Delta \lambda}{(\bar{x}_{\lambda 2} + \bar{y}_{\lambda 2} + \bar{z}_{\lambda 2}) S_{\lambda 2} T_{\lambda 2} \Delta \lambda}, \quad (8)$$

$$T_c = \frac{x_{\lambda} - 0.325}{y_{\lambda} - 0.154}, \quad (9)$$

$$K_x = \frac{x_{\lambda 2} - 0.325}{x_{\lambda 1} - 0.325}, \quad (10)$$

$$K_y = \frac{y_{\lambda 2} - 0.154}{y_{\lambda 1} - 0.154}, \quad (11)$$

式中: T_{λ} 为波长 λ 对应的透过率; S_{λ} 为其对应的光源相对光谱功率分布; $\Delta \lambda$ 为步长; T_c 为色温值; $\bar{x} \bar{y} \bar{z}$ 为 1931 CIE-XYZ 标准色度系统对应的光谱三刺激值; $x y z$ 为色度坐标; K_x 、 K_y 分别为 x 、 y 坐标下对应的转换系数。待求等色温线 T_c 的直线斜率为^[8]:

$$A_c = \frac{x - 0.31}{y - 0.22}, \quad (12)$$

则最后的色温 T_c 数值为^[9-14]:

$$T_c = 669 A_c^4 - 779 A_c^3 + 3\,660 A_c^2 - 7\,047 A_c + 5\,652. \quad (13)$$

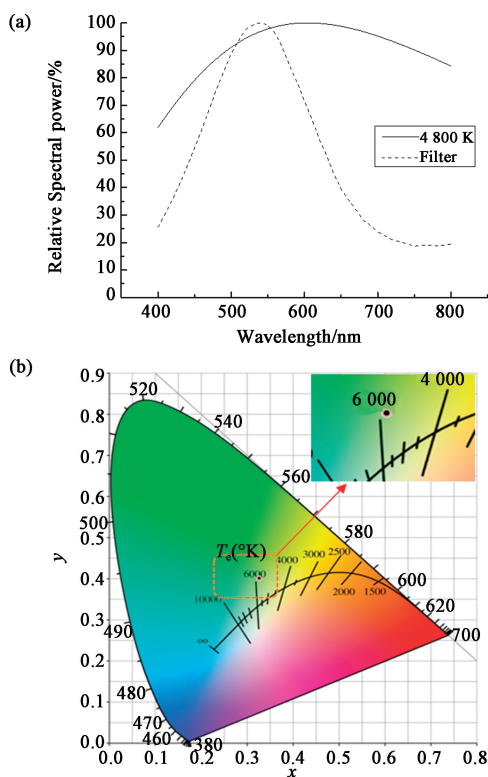


图 6 标准卤素灯光源经过 QB11 后的辐射谱线(a)和对应色温(b)

Fig.6 Radiation spectra (a) and color temperature (b) of standard halogen light source after QB11

经过计算, 3 000 K 的标准卤素灯经过 QB11 颜色玻璃后, 其色温变为 5 677 K, 显然与要求的 4 800 K 的目标还存在一定的差距, 其辐射谱线和色温如图 6 所示。

为了达到 4 800 K 的辐射谱线, 需要以 QB11 颜色玻璃为基底镀制光学薄膜进行修正, 通过光学薄膜设计来修正辐射谱线。根据图 6 的 QB11 经过标准卤素灯的辐射曲线与标准的 4 800 K 的标准黑体辐射曲线对比, 得到我们需要设计的光学薄膜透过率曲线, 如图 7 所示。

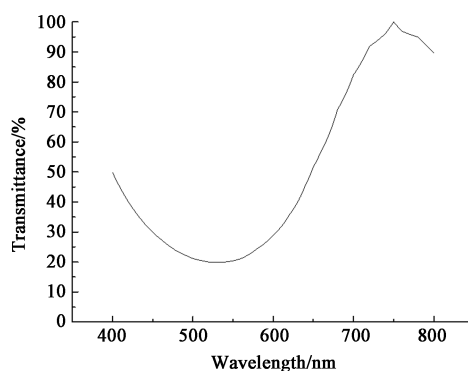


图 7 光学薄膜设计透过率目标

Fig.7 Optical film design transmittance target

根据目标透过率曲线, 通过 Essential Macleod 薄膜设计软件采用 SiO_2 和 TiO_2 的组合以 Substrate | H L H L H | Air 5 层结构作为初始结构, 中心波长为 590 nm。将目标值输入薄膜设计软件中的 target 中进行优化设计, 最终的膜系结构及各层厚度定为: Substrate | 0.33H 0.18 L 0.2H 0.23L 0.2H | Air, 膜层总厚度为 353 nm, 优化过程没有增加膜层数量^[15-16], 并将该膜系与 QB11 结合, 归一化后透过率曲线如图 8 所示。

从图 8 可知, 通过膜系设计后的 QB11, 其透过率曲线与理想目标值吻合较好, 光谱偏离度质量指数达 4.59%, 并将其通过标准 3 000 K 的卤素灯, 得到其整体辐射曲线及色温, 如图 9 所示。

通过图 9 得到归一化后的辐射谱线和标准 4 800 K 黑体辐射曲线的相似度极高, 最终的光谱偏离度质量指数达到 3.67%, 这点从色品图中也明显的体现出来, 其色坐标 $x=0.350\,6$ 、 $y=0.348\,2$, 通过色温计算得到 $T_c=4\,782\text{ K}$, 在色品图中与标准的 4 800 K 的标准黑体辐射几乎重合。

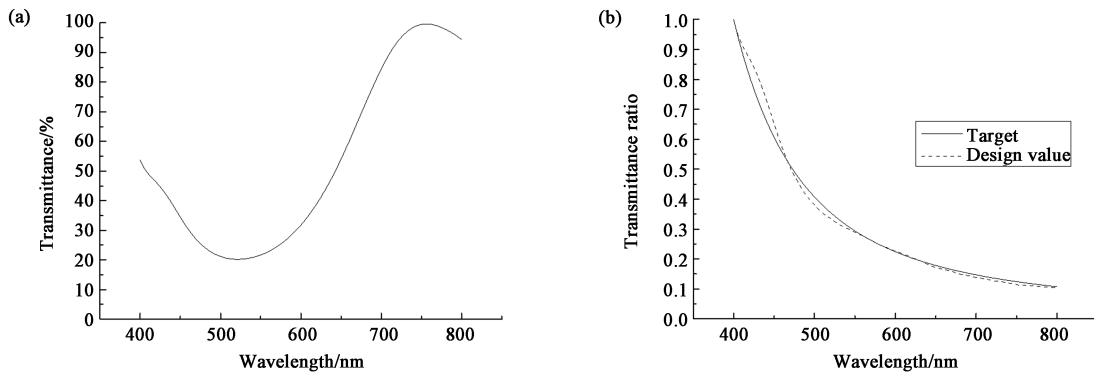


图 8 归一化后设计的光学薄膜在透明 K9 基底(a)和 QB11 基底(b)的透过比曲线

Fig.8 Transmittance ratio curve of the designed optical film on the transparent K9 substrate (a) and QB11 substrate (b) after normalization

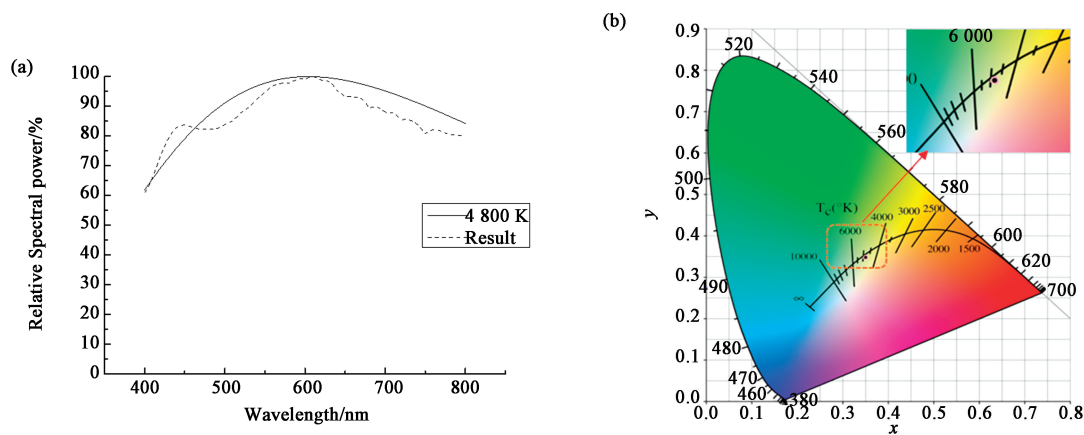


图 9 镀膜后 QB11 通过 3 000 K 光源照射的辐射谱线(a)和色温(b)

Fig.9 Radiation spectra (a) and color temperature (b) of QB11 irradiated by 3 000 K light source after coating

4 结 论

本文从色温的理论分析,以目标滤光片的光谱曲线为出发点。通过建立颜色玻璃库后使用计算机程序筛选出与目标滤光片的光谱相近的颜色玻璃,再在颜色玻璃上镀制光学薄膜。颜色玻璃 QB11 可将 3 000 K 光源色温转为 5 677 K,增加膜系后二者结合可将 3 000 K 光

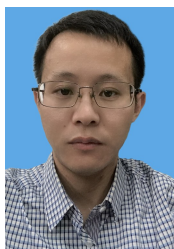
源色温变为 4 782 K,两者有效补偿,满足从 3 000 K 色温变换成 4 800 K 标准黑体辐射色温的目标。最终得到了目标光谱辐射曲线与标准 4 800 K 黑体辐射光谱曲线的偏离度极小,达到 3.67%。通过此方法使色温变化过程更为简单,也可形成共用方法,其他相关色温变换也同样适用,可以解决一些市场中的色温滤光片的色温变换值固定的问题,在实际应用中具有较好的前景。

参 考 文 献:

- [1] 金伟其,王霞,廖宁放,等.辐射度光度与色度及其测量[M].2版,北京:北京理工大学出版社,2016.
JIN Q W, WANG X, LIAO N F, et al. *Photometry, Radiometry, Colorimetry & Measurement* [M]. 2nd ed. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2016. (in Chinese)
- [2] 何国兴.颜色科学[M].上海:东华大学出版社,2004.
HE G X. *Color Science* [M]. Shanghai: Donghua University Press, 2004. (in Chinese)

- [3] 庄金迅.光源的色温及其在照明设计中的应用[J].灯与照明,2007,31(3):36-38,55.
ZHUANG J X. The application of the color temperature of luminaries in the lighting design [J]. *Light & Lighting*, 2007, 31(3): 36-38, 55. (in Chinese)
- [4] 徐达,岳世新,张国玉,等.Offner型凸面光栅宽动态范围辐射定标光源设计[J].中国光学,2020,13(5):1085-1093.
XU D, YUE S X, ZHANG G Y, *et al.* Design of an Offner convex grating radiation calibration light source with a wide dynamic range [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(5): 1085-1093. (in Chinese)
- [5] 施克孝.怎样变换光源的色温[J].演艺设备与科技,2004(5):95-96.
SHI K X. How to change the color temperature of the light source [J]. *Entertainment Technology*, 2004(5): 95-96. (in Chinese)
- [6] 曹轶,赵帅锋,王银河,等.手术灯用调色温显色隔热滤光片的设计[J].中国医疗设备,2013,28(2):18-20,116.
CAO Y, ZHAO S F, WANG Y H, *et al.* Design of filters of color temperature adjusting, color rendering and heat insulation for surgical lights [J]. *China Medical Devices*, 2013, 28(2): 18-20, 116. (in Chinese)
- [7] 许景峰.基于辐射度学的隧道洞外亮度及色温动态变化规律研究[D].重庆:重庆大学,2018.
XU J F. Research on dynamic changes of tunnel adaptation luminance and color temperature based on radiometry [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018. (in Chinese)
- [8] 付秀华,陈奕辛,刘冬梅,等.基于 Head-Mounted Display 补偿 VR 色温性别差异光学薄膜的研制[J].光学学报,2021,41(3):0331001.
FU X H, CHEN Y X, LIU D M, *et al.* Development of optical films based on Head-Mounted Display to compensate for gender differences in color temperature of VR [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(3): 0331001. (in Chinese)
- [9] 吴志峰,代彩红,李玲,等.相关色温测量不确定度分析[J].光学学报,2020,40(2):0212002.
WU Z F, DAI C H, LI L, *et al.* Evaluation of correlated color temperature uncertainty [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(2): 0212002. (in Chinese)
- [10] LI C J, CUI G H, MELGOSA M, *et al.* Accurate method for computing correlated color temperature [J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 14066-14078.
- [11] 胡莹,苏宙平,曹晶辉.实现白光 LED 阵列色温分布均匀化技术研究[J].液晶与显示,2018,33(4):326-337.
HU Y, SU Z P, CAO J H. Design of white LED array for uniform correlated color temperature distribution [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(4): 326-337. (in Chinese)
- [12] 王安祥,翟学军,刘汉臣,等.光源相关色温计算方法的研究[J].西安工程科技学院学报,2006,20(4):490-493.
WANG A X, ZHAI X J, LIU H C, *et al.* Study on the calculating methods for correlated color temperature of light source [J]. *Journal of Xi'an University Engineering Science and Technology*, 2006, 20(4): 490-493. (in Chinese)
- [13] 朴大植.实用颜色温度测量方法的研究[J].现代计量测试,1999(1):48-53.
PIAO D Z. Practical measuring method for color temperature [J]. *Modern Measurement and Test*, 1999(1): 48-53. (in Chinese)
- [14] LI C J, LUO M R, MELGOSA M, *et al.* Testing the accuracy of methods for the computation of CIE tristimulus values using weighting tables [J]. *Color Research and Application*, 2016, 41(2): 125-142.
- [15] 唐晋发,顾培夫,刘旭,等.现代光学薄膜技术[M].杭州:浙江大学出版社,2006:96-113.
TANG J F, GU P F, LIU X, *et al.* *Modern Optical Thin Film Technology* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 96-113. (in Chinese)
- [16] 周晟,王凯旋,刘定权,等.3.2~3.8 μm 和 4.9~5.4 μm 红外双色滤光片的研制[J].中国光学,2021,14(3):536-543.
ZHOU S, WANG K X, LIU D Q, *et al.* Research on infrared dual-color filters with 3.2~3.8 μm and 4.9~5.4 μm bands [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 536-543. (in Chinese)

作者简介:



饶东升(1990—),男,安徽安庆人,硕士研究生,2014 年于巢湖学院获得学士学位,主要从事光学薄膜设计、制备及检测方面的研究。E-mail: raokeith@sina.com



朱华新(1983—),男,江苏无锡人,博士,副教授,2011 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学薄膜设计、制备及检测方面的研究。E-mail: zhuhuaxin1312@163.com