

基于 Head-Mounted Display 补偿 VR 色温性别差异 光学薄膜的研制

付秀华¹, 陈奕辛^{1*}, 刘冬梅¹, 张静¹, 卢成²

¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

²成都国泰真空设备有限公司, 四川 成都 611130

摘要 Head-Mounted Display(HMD)是实现虚拟现实(VR)的主要技术形式,而可视化VR图像的色温还原还有待解决。为了消除HMD干扰源的感知差异,基于色度学理论分析了OLED(Organic Light-Emitting Diode)光源下的色温与光谱面积比例的关系,研制出了性别差异下补偿色温偏好的光学滤光膜。结合Matlab工程计算软件,利用最小二乘法-高斯牛顿迭代法进行光谱数据离散点函数的曲线拟合,逆向推导出OLED光源下的色温与光谱面积比例之间的转换关系。通过分析材料的光学特性,结合光学薄膜理论,利用Essential Macleod薄膜设计软件对膜层敏感度进行了分析;通过减小误差并优化膜系结构,实现了色温滤光膜的制备。采用电子束加热蒸发的方法制备薄膜,通过晶控精确控制薄层及敏感层的沉积厚度,减小了实验误差。分别对两种膜系进行了光谱、表面粗糙度及环境检测,结果表明,所提滤光片可以将OLED光源下的色温调整至4876 K及9333 K,解决了性别差异下HMD中的色温偏好问题,还原了VR可视化色彩。

关键词 薄膜; 性别色温偏好; 曲线拟合; HMD; 图像色彩还原

中图分类号 O484

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0331001

Development of Optical Films Based on Head-Mounted Display to Compensate for Gender Differences in Color Temperature of VR

Fu Xiuhua¹, Chen Yixin^{1*}, Liu Dongmei¹, Zhang Jing¹, Lu Cheng²

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

²Chengdu Guotai Vacuum Equipment Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 611130, China

Abstract Head-mounted display (HMD) is the main technology to realize virtual reality (VR), however to restore the color temperature of visual virtual reality is still a problem to be solved. In order to eliminate the perceived difference in HMD interference sources, we analyze the relationship between color temperature and spectral area ratio on the basis of colorimetry and develop an optical filter film to compensate for color temperature preference under gender differences. Combined with the Matlab engineering calculation software, the least square method-Gauss Newton iterative method is used to perform curve fitting of the discrete point function of spectral data, and the conversion relationship between color temperature of an OLED light source and spectral area ratio is derived inversely. By analyzing the optical properties of materials and combining the optical film theory, we analyze the sensitivity of the film layer with the Essential Macleod thin film design software. By reducing errors and optimize the film structure, we achieve the preparation of color temperature filter films. The thin films are prepared by the method of electron beam heating double gun co-evaporation. The crystal control and the light control are monitored to accurately control the deposition thickness of the thin layer and the sensitive layer and thus the experimental

收稿日期: 2020-07-31; 修回日期: 2020-08-28; 录用日期: 2020-09-15

基金项目: 吉林省重大科技攻关专项(20190302095GX)

* E-mail: 486393727@qq.com

errors are reduced. The spectra, surface roughness and environment of the two film systems are tested and the results show that the proposed filter can be used to improve the color temperature of an OLED light source to 4876 K and 9333 K, to solve the problem of color temperature preference under the gender difference in HMD, and to restore the VR visual color.

Key words films; gender color temperature preference; curve fitting; HMD; image color restoration

OCIS codes 310.6805; 330.1720; 330.1730; 310.6860

1 引言

Head-Mounted Display(HMD)发出光学信号, 继而人眼接收图像信号是虚拟现实(VR)的主要实现途径。大量数据证明, 人眼在物理现实和虚拟环境中对空间的感知存在差异^[1]。Yu 等^[2]首次验证了女性更倾向于较冷的颜色, 而后 Dalholm 等^[3]提出将真实色彩转换为 VR 时, 由于屏幕动态范围缩小, 必须考虑一些基本的色彩再现问题。Murray 等^[4]证明男性视野在某些颜色的区域比女性更大。Jaint 等^[5-6]发现, 在建立可靠的虚拟模型时, 必须知道真实物体的颜色外观。2007 年, Hurlbert 等^[7]证明了男性和女性对色调值的偏好是显著不同的, 不受饱和度或亮度水平的影响。2019 年, Siess 等^[8]针对感知色温进行了研究, 结果表明, HMD 和 PC 屏幕存在各自的色温偏好, 且男性与女性的偏好有明显差异。

人工三维虚拟环境中的色温与现实世界中的色温并不一致^[9], 消除这种干扰源并使 HMD 呈现逼真的图像色彩是 VR 技术还原物理现实的关键。近些年国内外对 HMD 的视场、像素密度、分辨率和图形刷新率等进行了大量研究。在国内, 针对 VR 中的色温偏好, 通过薄膜进行改善及调节的研究鲜有报道。本文基于性别色温偏好差异, 设计了两种可见波段光学滤光片, 实现了 HMD 中的图像色温补偿。

2 理论分析

HMD 的原理是通过光学菲涅耳透镜对微小的 OLED 屏进行放大, 通过增大视场角, 使发光像素点重新被人眼读取。左右屏幕分别在左右眼中连续交替显示不同图像, 两个单目视场的叠加结果即为双目视场中 3D 物体的立体视觉。

2.1 HMD 中 VR 的色温偏好

由于人类的色彩感知是一个认知过程^[10], 不同光谱的感知非均匀地分布在人类视场(FOV)上。图 1 为人眼对颜色的感知随光源入射角度的变化及 HMD 视野, 可以看出, 颜色的感知随着光源撞击眼睛的角度的变化而变化。HMD 典型视野仅能覆

盖人眼 FOV 的一部分, 局部超过覆盖边界。研究者基于人眼提出了色温这一概念, 其是光线中包含的颜色成分的计量单位, 计量单位为“K”。HMD 内部结构及光线路径如图 2 所示, 其中 F 为焦点。图 3 所示为菲涅耳透镜的成像光路, 其中 ρ_k 为光圈半径, R 为菲涅耳透镜半径, r_0 为焦距。当发光源被放大且颜色刺激的大小改变时, 感知将偏移, 与现实相比动态范围缩小, 人眼对颜色刺激属性的感知被破坏, 将图像真实色彩转换为 VR 时, 感知的多彩性增加^[11], 可视化的色彩再现不能被人眼调整, 从而导致色温偏好无法自动调节, 因此 HMD 可视化的虚拟现实与物理现实的感知是不同的。

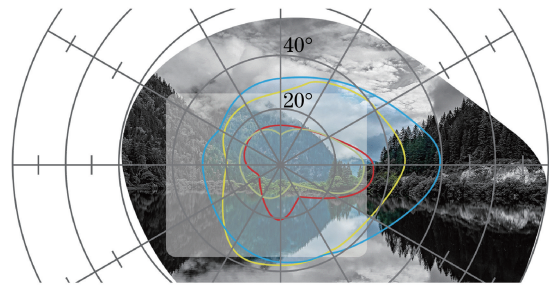


图 1 人眼对颜色的感知随光源入射角度的变化及 HMD 视野
Fig. 1 Color perception of human eye versus incident angle of light source as well as HMD field of view

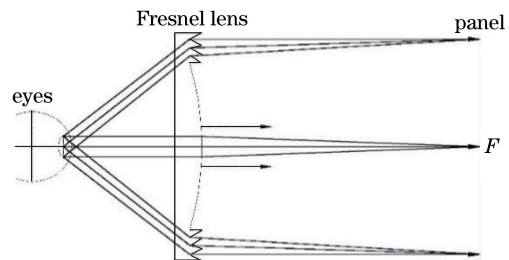


图 2 HMD 内部结构及光线路径

Fig. 2 HMD internal structure and light path

2.2 色温与光谱面积比例关系的推导

由于 HMD 中的光源为 OLED(Organic Light-Emitting Diode)面光源, 因此本文所有色温及面积比例的计算都选用 OLED 光源的相对光谱功率分布、透过率光谱数据及标准色度系统 1931 CIE-XYZ 的三刺激值。图 4 为 OLED 光源的相对光谱功率分布^[12], 图 5 为 1931 CIE-XYZ 色度图^[13]。

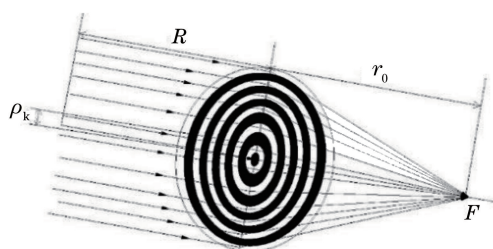


图 3 菲涅耳透镜的成像光路
Fig. 3 Imaging optical path of Fresnel lens

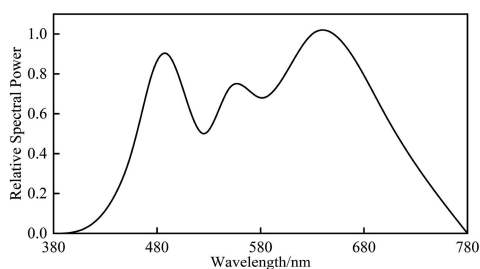


图 4 归一化处理后的 OLED 相对光谱功率分布^[12]
Fig. 4 OLED relative spectral power distribution after normalization^[12]

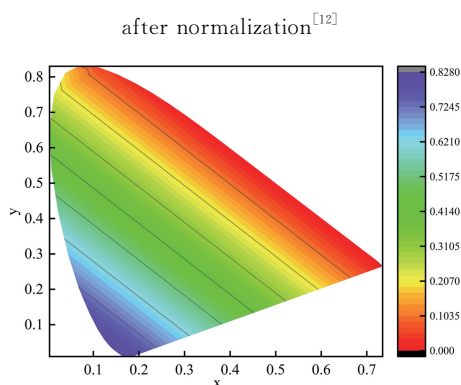


图 5 1931 CIE-XYZ 色度图^[13]
Fig. 5 1931 CIE-XYZ chromaticity diagram^[13]
透射光谱的三刺激值为

$$\begin{cases} X = k \sum_{\lambda} S(\lambda) T(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \\ Y = k \sum_{\lambda} S(\lambda) T(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \\ Z = k \sum_{\lambda} S(\lambda) T(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda \end{cases}, \quad (1)$$

$$k = \frac{100}{\sum_{\lambda} S(\lambda) T(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda}$$

三刺激值对应的色度坐标为

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

$$x + y + z = 1, \quad (3)$$

式中: $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ 为 1931 CIE-XYZ 标准色度系统对应的光谱三刺激值; $T(\lambda)$ 为波长 λ 对应的透过率; $S(\lambda)$ 为波长 λ 对应的 OLED 相对光谱功率分布; $\Delta\lambda$ 为步长; k 为调整因数, 它是 OLED 光源 Y 值被调整为 100 时得出的; X, Y, Z 分别为光谱三刺激值; x, y, z 为光谱对应的色度坐标^[13]。

在图 5 中, 等色温线的延长线都会聚于一点, 该点色度坐标为 (0.31, 0.22), 如图 6 所示^[13]。待求等色温线的直线斜率^[14-16]为

$$A_c = \frac{x - 0.31}{y - 0.22}, \quad (4)$$

$$T_c = 669A_c^4 - 779A_c^3 + 3660A_c^2 - 7047A_c + 5652, \quad (5)$$

式中: A_c 为等色温线斜率; T_c 为色温值^[17]。

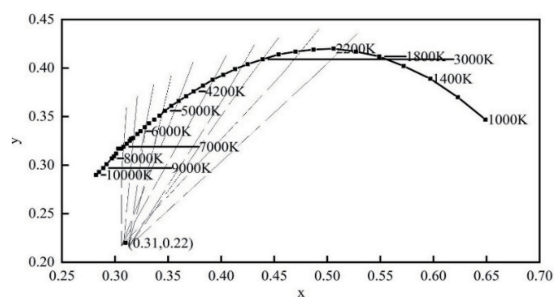


图 6 色度图中黑体辐射轨迹上的等色温线及其交点^[13]
Fig. 6 Isochromatic temperature lines and intersection points on blackbody radiation trajectory in chromaticity diagram^[13]

选取三组在可见波段内透过率 (T) 为 96%、48%、4% 的理论光谱数据, 其分别代表不考虑制备因素的典型增透、分光及高反膜光谱, 如图 7 所示。将可见光分为 380~550 nm、550~640 nm、640~780 nm 三个波段范围, 计算三组光谱三波段的面积比例 ($A_{380-550} : A_{550-640} : A_{640-780}$), 并将数据代入 (1)~(5) 式计算对应色温值, 结果如表 1 所示。

对表 1 中三组数据的面积比例进行归一化, 得

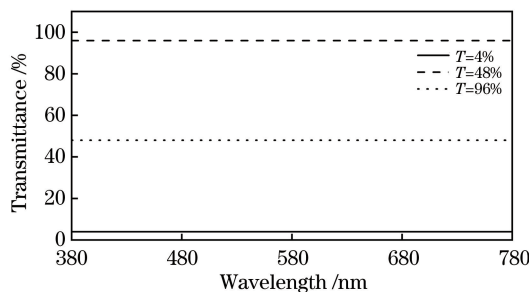


图 7 不同透过率下的光谱
Fig. 7 Spectrum at each transmittance

出三组比例相同,均为 1.89:1.00:1.56。由上述分析可知,三波段面积比相等,即色温相等,色温的数

值大小取决于归一化后的三波段面积比例,并非某一波段的面积值。

表 1 不同透过率对应的三波段面积比例及色温

Table 1 Three-band area ratio and color temperature corresponding to each transmittance

Transmittance /%	$A_{380-550} : A_{550-640} : A_{640-780}$	Color temperature /K
96	16.32:8.64:13.44	6086.42
48	8.16:4.32:6.72	6086.42
4	0.68:0.36:0.56	6086.42

选取六组滤光片的实际透过率光谱数据,由于实际数据并不是可以直接计算的直线光谱,先基于 Matlab 软件,通过高斯-牛顿迭代法,采用泰勒级数展开式代替非线性回归模型,对已知的六组光谱透过率数据曲线进行拟合;再对拟合后的函数进行积分,得到对应三波段的面积比例,进而推导出曲线面积比例与色温之间的关系。

图 8 是六组滤光片测试光谱数据的曲线图,其拟合结果的高斯函数表达式为

$$f(\lambda) = \sum_{i=1}^n a_i \exp\{-[(\lambda - b_i)/c_i]^2\}, \quad (6)$$

式中: n 为系数个数; i 为系数编号; a_i 、 b_i 、 c_i 为高斯

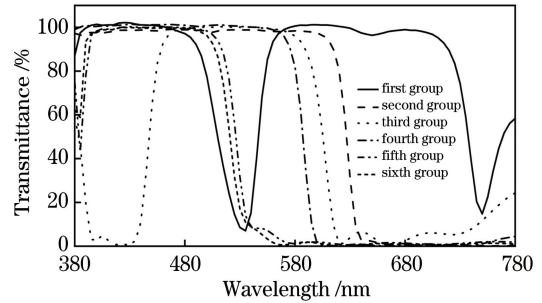


图 8 六组滤光片的透射光谱测试曲线

Fig. 8 Transmission spectral test curves for six groups of filters

函数的三个系数。六组系数的数值如表 2、3 所示。

表 2 $i=1\sim 3$ 时光谱数据曲线拟合后的高斯函数系数值

Table 2 Gaussian function coefficient values after spectral curve fitting for $i=1-3$

Group No.	a_i			b_i			c_i		
	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=1$	$i=2$	$i=3$
First group	8.40	-40.90	-169.50	702.00	707.30	770.00	15.05	30.55	45.40
Second group	30.19	14.05	18.38	403.80	616.70	715.50	53.50	76.91	119.20
Third group	105.80	57.45	-2.05	410.90	574.00	680.00	69.00	19.00	0.50
Fourth group	48.90	48.50	95.50	504.00	608.70	387.80	63.80	14.90	125.10
Fifth group	42.84	19.81	31.40	389.60	488.70	785.70	26.89	29.82	99.55
Sixth group	99.80	55.30	51.90	395.80	539.30	565.10	92.50	30.80	17.50

表 3 $i=4\sim 6$ 时光谱数据曲线拟合后的高斯函数系数值

Table 3 Gaussian function coefficient values after spectral curve fitting for $i=4-6$

Group No.	a_i			b_i			c_i		
	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=1$	$i=2$	$i=3$
First group	12.20	1700.00	-1100.00	617.60	526.00	856.00	23.23	829.50	50.15
Second group	6.54			556.80			51.79		
Third group	-1.20	51.10	101.00	626.00	556.00	680.00	1.50	10.90	81.20
Fourth group	48.30	38.40	49.30	588.60	621.60	556.40	24.00	9.30	39.80
Fifth group	9.58	26.67	10.96	689.70	527.00	462.50	60.43	46.93	19.40
Sixth group	61.30	42.80		494.20	580.50		51.80	10.40	

表 4 为三波段积分后的面积比例,对六组函数在 380~550 nm 波段的面积进行归一化处理。结果表明,随着色温的升高,550~640 nm 及 640~780 nm 两波段的面积依次减小,相比 640~780 nm 波段,二者面积减小的趋势更明显。再对六组数据在 640~

780 nm 波段的面积进行归一化处理,结果表明,随着色温的降低,380~550 nm 及 550~640 nm 两波段的面积依次减小,相比 380~550 nm 波段,二者面积减小的趋势更明显。当色温在 10000 K 以上时,640~780 nm 波段的峰值基本消失;而当色温在 2300 K 以

下时,380~550 nm 波段的峰值基本消失。由上述分析可知,色温与 640~780 nm 波段面积呈反比:色温越高,该波段的光谱透过率越低;色温越低,该波段的

光谱透过率越高。色温与 380~550 nm 波段面积成正比:色温越高,该波段的光谱透过率越高;色温越低,该波段的光谱透过率越低。

表 4 六组函数的面积比例及其对应归一化色温

Table 4 Area ratios of six groups of functions and their corresponding color temperatures

Group No.	$A_{380-550} : A_{550-640} : A_{640-780}$	Normalized result	Color temperature/K
First group	9.71:32.31:96.51	1:3.33:9.94	2300.2
Second group	26.68:20.24:29.46	1:0.76:1.1	3724.2
Third group	15.90:15.02:10.60	1:0.94:0.67	5164.5
Fourth group	16.70:7.48:0.06	1:0.45:0.004	7160.1
Fifth group	45.20:7.72:33.68	1:0.17:0.74	9644.6
Sixth group	17.10:3.6:0.002	1:0.21:0.0001	11528.5

为了方便计算,将变量控制为两个,保持其中一个的波段面积不变,改变其余两波段的面积比例以实现控制色温的目的。如表 4 所示,低色温时,全光谱增透曲线在 640~780 nm 波段的面积已经达到最大值;高色温时,全光谱增透曲线在 640~780 nm 波段的面积已经达到最小值,即 640~780 nm 波段的面积为不变量。由 380~550 nm 和 550~640 nm 波段内平均三刺激值函数可知,两波段面积比例的过渡呈线性,色度坐标比值也就是线性方程的斜率 K 。

由(5)式的色温公式可知, 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两波段波长间的转换系数为

$$\begin{cases} x_{\lambda_1} = \frac{\bar{x}_{\lambda_1} S_{\lambda_1} T_{\lambda_1} \Delta\lambda}{(\bar{x}_{\lambda_1} + \bar{y}_{\lambda_1} + \bar{z}_{\lambda_1}) S_{\lambda_1} T_{\lambda_1} \Delta\lambda} \\ y_{\lambda_1} = \frac{\bar{y}_{\lambda_1} S_{\lambda_1} T_{\lambda_1} \Delta\lambda}{(\bar{x}_{\lambda_1} + \bar{y}_{\lambda_1} + \bar{z}_{\lambda_1}) S_{\lambda_1} T_{\lambda_1} \Delta\lambda} \\ x_{\lambda_2} = \frac{\bar{x}_{\lambda_2} S_{\lambda_2} T_{\lambda_2} \Delta\lambda}{(\bar{x}_{\lambda_2} + \bar{y}_{\lambda_2} + \bar{z}_{\lambda_2}) S_{\lambda_2} T_{\lambda_2} \Delta\lambda} \\ y_{\lambda_2} = \frac{\bar{y}_{\lambda_2} S_{\lambda_2} R_{\lambda_2} \Delta\lambda}{(\bar{x}_{\lambda_2} + \bar{y}_{\lambda_2} + \bar{z}_{\lambda_2}) S_{\lambda_2} T_{\lambda_2} \Delta\lambda} \end{cases}, \quad (7)$$

$$T_c = \frac{x_{\lambda} - 0.325}{y_{\lambda} - 0.154}, \quad (8)$$

$$\begin{cases} K_x = \frac{x_{\lambda_2} - 0.325}{x_{\lambda_1} - 0.325} \\ K_y = \frac{y_{\lambda_2} - 0.154}{y_{\lambda_1} - 0.154} \end{cases}, \quad (9)$$

式中: T_{λ_1} 、 T_{λ_2} 分别为波长 λ_1 、 λ_2 对应的透过率; S_{λ_1} 、 S_{λ_2} 分别为 λ_1 、 λ_2 对应的 OLED 的相对光谱功率分布; \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。

由于 550~640 nm 的区间大小为 90 nm,380~550 nm 区间大小也只需取 90 nm 就能充分满足转化波段的需求,即 380~470 nm。由此推出,当同一色温下 380~470 nm 波段光转换为 550~640 nm 波段光时,按照步长 $\Delta\lambda = 5$ nm 为间隔,可计算出单色光转换的系数 K_x 、 K_y 的值。图 9 和图 10 分别为两波段 K_x 、 K_y 值的数据曲线图。为了使曲线更直观,将 380~470 nm 设为纵坐标轴刻度,以图 10 中的点(-0.281,380)为例,该点表示 380 nm 的光转化为 550 nm 的光所需的 K_y 值等于 -0.281。

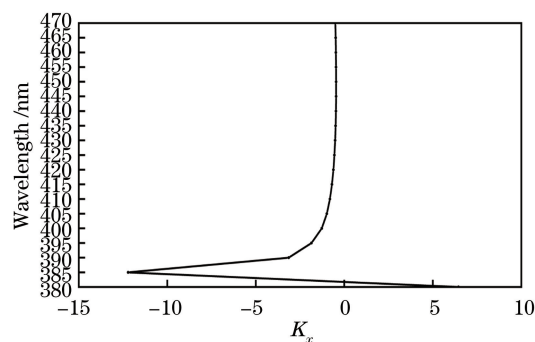


图 9 两波段单色光的转换系数 K_x 的值

Fig. 9 Value of conversion coefficient K_x of two-band monochromatic light

3 色温滤光片膜系的模拟

3.1 基底选择

HMD 中所用的菲涅耳透镜即基板的材质分为三种:聚酯板(PC)、有机玻璃(PMMA)和 K9 玻璃。在可见光范围内的正入射条件下,三种材料基板的平均透过率如表 5 所示,其中 n' 为基板折射率。

图 11 是不同折射率基底上的单面增透膜的光谱透过率曲线。表 6 是不同折射率基底上的单面增

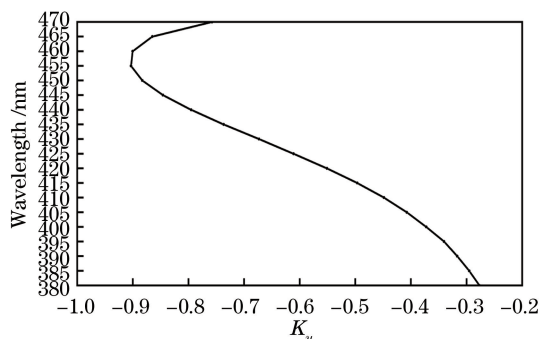


图 10 两波段单色光的转换系数 K_y 的值
Fig. 10 Value of conversion coefficient K_y of two-band monochromatic light

透膜的平均透过率、三波段面积比及归一化色温值。由图 11 及表 6 可知,在 OLED 光源下,三个不同基底增透膜的透过率光谱色温误差为 ± 10 K,可忽略不同基底对膜系色温的影响,为了方便讨论,设计膜系时采用最常见的 K9 作为基底。

表 6 不同折射率基底上的单面增透膜的平均透过率、三波段面积比及归一化色温值

Table 6 Average transmittance, three-band area ratios, and normalized color temperatures of single-sided antireflection coatings on bases with different refractive indexes

n	Transmittance /%	$A_{380-550} : A_{550-640} : A_{640-780}$	Color temperature /K
1.591	99.53	1.91:1:1.53	3279.7
1.490	99.47	1.93:1:1.55	3289.5
1.516	99.51	1.93:1:1.54	3285.9

3.2 4876 K/9333 K 下的光谱要求

根据文献[8]可知,在 HMD 中,男性偏好色温的平均值为 4876 K,女性偏好色温的平均值为 9333 K。通过比例关系推导出 4876 K 和 9333 K 下对应波段的透过率光谱曲线,表 7 和表 8 列出了两个色温下的光谱面积比例及对应的光谱透过率比例($T_{380-550} : T_{550-640} : T_{640-780}$)。

表 7 4876 K/9333 K 下三波段对应的归一化光谱面积比例
Table 7 Normalized spectral area ratios corresponding to three bands for 4876 K/9333 K

Color temperature /K	$A_{380-550} : A_{550-640} : A_{640-780}$
4876	1:2.38:3.85
9333	1.44:1.05:1

表 8 4876 K/9333 K 下三波段对应的光谱透过率比例
Table 8 Spectral transmittance ratios corresponding to three bands for 4876 K/9333 K

Color temperature /K	$T_{380-550} : T_{550-640} : T_{640-780}$
4876	40.9:86.5:89.9
9333	52.3:33.6:20.7

3.3 不同入射角下色温滤光片的光谱

HMD 中的光源为面光源,光线不会全部垂直

表 5 不同折射率基底对应的平均透过率

Table 5 Average transmittance corresponding to bases with different refractive indexes

Substrate material	n'	Transmittance /%
PC	1.591	90.11
PMMA	1.490	92.54
K9	1.516	91.92

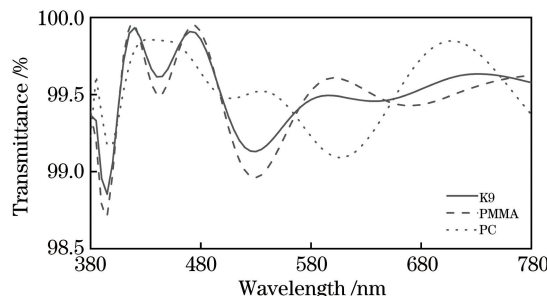


图 11 不同折射率基底上的单面增透膜的光谱透过率曲线
Fig. 11 Spectral transmittance curves of single-sided antireflection coatings on bases with different refractive indexes

入射进入眼。薄膜的基础理论是基于光的干涉,由于光偏振现象的存在,当光线倾斜入射时,也就是入射角不为 0° 时,有效相位厚度和有效折射率会发生改变,从而光谱曲线发生偏移。

经过计算,入射角对不同基底的色温影响可以忽略不计,本文只分析 K9 为基底的情况。OLED 光源的相对光谱功率分布如图 4 所示,不同色温时入射角对理论透射光谱曲线的影响如图 12 所示,其中 θ 为入射角。不同色温时入射角对理论光谱曲线色温的影响如图 13 所示。可以看出,当 $\theta=0$ 时,两个光谱曲线对应的色温值刚好达到 4876 K 和 9333 K,而随着光线入射角的增大,光谱会逐渐向短波方向移动。对于 4876 K,640~780 nm 波段内的光谱面积增大,色温值会在 200 K 范围内降低;对于 9333 K,380~550 nm 波段内的光谱面积增大,色温值会在 400 K 范围内升高。

4 薄膜的制备与测试

4.1 膜料的选择

色温这一概念只存在于可见光波段。对于可见

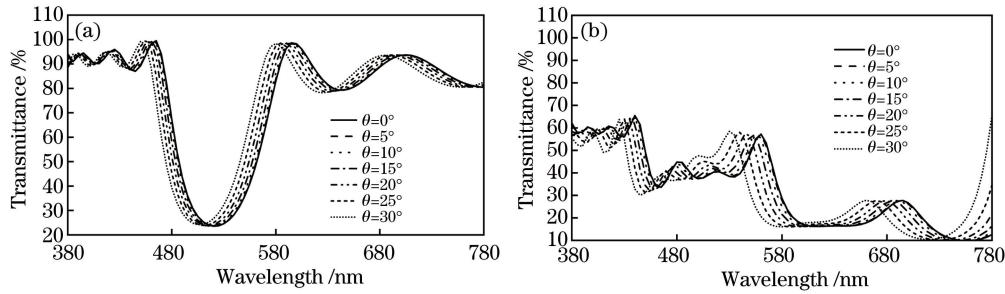


图 12 不同色温时入射角对理论透射光谱曲线的影响。(a) 4876 K; (b) 9333 K

Fig. 12 Influence of incident angle on theoretical transmission spectral curve for each color temperature.

(a) 4876 K; (b) 9333 K

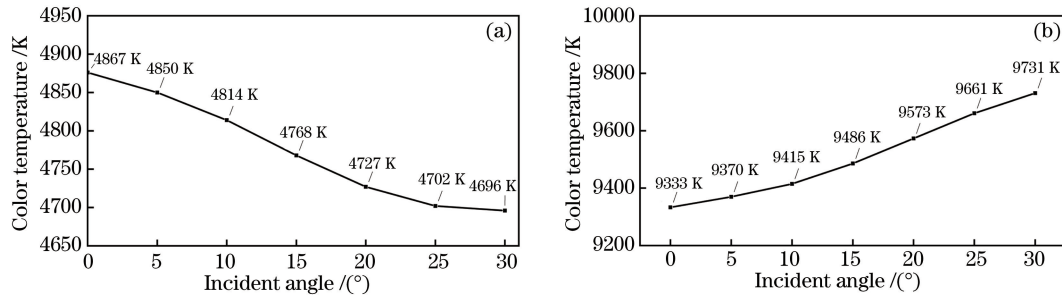


图 13 不同色温时入射角对理论光谱曲线的影响。(a) 4876 K; (b) 9333 K

Fig. 13 Influence of incidence angle on theoretical spectral curve for each color temperature. (a) 4876 K; (b) 9333 K

光波段,低折射率材料一般采用 SiO_2 、 Al_2O_3 和 MgF_2 。 MgF_2 会因为镀膜过程中预熔不充分或蒸发束流过大而发生喷溅,产生白色喷点; Al_2O_3 的折射率受真空度和蒸发速率的影响较大,且蒸发过程中产生的 Al 分子会降低膜层透过率; SiO_2 具有良好的光学性能,折射率稳定,可见波段内基本无吸收,选择 SiO_2 作为低折射率材料,其折射率在 1.6 左右。常见的高折射率材料有两种即 Ti_3O_5 和 TiO_2 , TiO_2 在蒸镀过程中会产生 TiO_2 、 Ti_2O_3 、 TiO 和 Ti 等,过于不稳定,而 Ti_3O_5 的不稳定性较小,故选用 Ti_3O_5 作为高折射率材料。

4.2 膜系设计

膜系设计的理论基础为:将多层膜等效为单层膜,继而用等效膜层与基底进行导纳匹配^[18]。有以下关系:

$$\begin{cases} \eta = \frac{H_t^+}{S_0 \times E_t^+} = -\frac{H_t^-}{S_0 \times E_t^-} \\ Y = \frac{C}{B} \end{cases}, \quad (10)$$

应用边界条件,基底与 M 层薄膜组合的特征矩阵为

$$E_0 \begin{bmatrix} 1 \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^M \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{M+1} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

膜层整体的透过率为

$$T = \frac{4\eta_0 \eta_{M+1}}{(\eta_0 B + C)(\eta_0 B + C)^*}, \quad (12)$$

式中: B 、 C 为特征矩阵; $*$ 表示取伴随矩阵; E_0 为初始电场; η_j 为第 j 层的有效导纳,对于 P 分量有 $\eta_j = n_j / \cos \theta_j$,对于 S 分量有 $\eta_j = n_j \cos \theta_j$,其中 n_j 为第 j 层介质的折射率, θ_j 为光在第 j 层介质中的折射角; H_t 为磁场强度切向分量; E_t 为电场强度切向分量;符号+、-代表反向和正向波; S_0 为能流密度; Y 为膜层和基底组合的导纳; M 为膜层数; δ_j 为第 j 层的相位厚度。

本文所研究的色温滤光片属于带通模型,因此根据 (10)~(12) 式选择 $\text{Sub} | (0.5H L 0.5H)^s (0.5L H 0.5L)^s | \text{Air}$ 为基础膜系单元,其中 Sub 代表基底材料,H 代表高折射率材料 Ti_3O_5 ,L 代表低折射率材料 SiO_2 , s 代表周期数,Air 代表空气;再用 Essential Macleod 进行膜层的优化。最终 4876 K 的膜系结构及各层厚度定为 $\text{Sub} | 3.45H 0.28L 1.9H 1.08L 0.67H 0.58L 1.81H 0.66L 1.67H 0.55L 0.83H L 1.75H 0.28L 3.69H | \text{Air}$,9333 K 的膜系结构及各层厚度定为 $\text{Sub} | 0.38H 3.34L 0.89H 0.55L 1.39H 2.76L 3.66H 1.92L 2.2H 6.78L 2.11H 2.53L 1.96H 4.62L 3.12H | \text{Air}$ 。将两光谱数据代入色温及比例公式进行反向

推导,验证结果均满足要求。

4.3 膜系的制备

本文用 ZZS-1350 箱式真空镀膜机制备薄膜,设备配有双 e 型电子枪,采用考夫曼离子源进行辅助沉积,并配有 INFICON XTC-3S 晶控膜厚监控仪。

表 9 Ti₃O₅/SiO₂ 的镀膜工艺参数

Table 9 Coating process parameters for Ti₃O₅/SiO₂

Material	Substrate temperature /°C	Degree of vacuum /Pa	Evaporation rate /(nm·s ⁻¹)	Flow rate of O ₂ /(mL·min ⁻¹)	Screen voltage of ion source /V	Current of ion beam /mA
Ti ₃ O ₅	95	2.0×10 ⁻³	0.3	22	400	200
SiO ₂	95	8.0×10 ⁻³	0.7	20	400	200

4.4 测试

使用 UV-3150 分光光度计对基底为 K9 的实验样品进行透射光谱测试,结果如图 14 所示。可以看出,实际测试的透射光谱与理论透射光谱存在一定偏差。这主要是由于五氧化三钛是一种非化学计

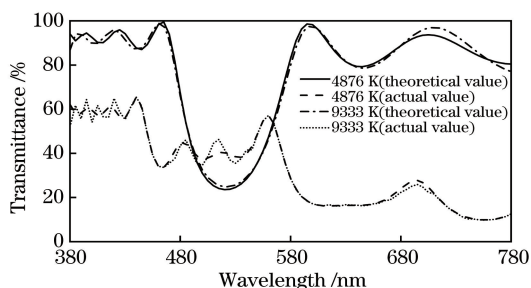


图 14 以 K9 为基底时不同色温下的理论与实际透过率曲线
Fig. 14 Theoretical and actual transmittance curves under different color temperatures when K9 is used as substrate

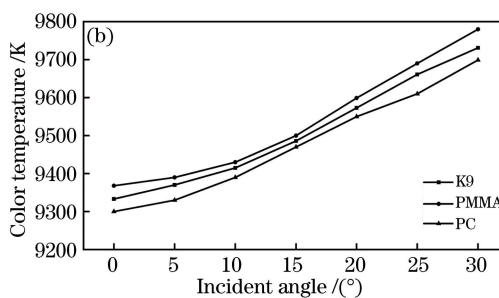
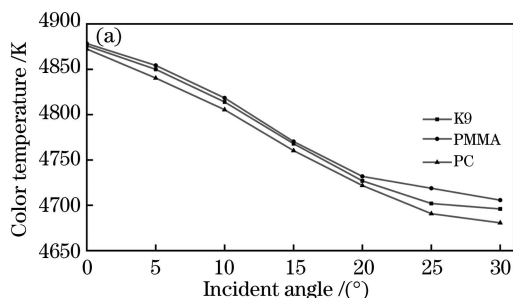


图 15 不同色温时入射角对测试光谱曲线的影响。(a) 4876 K;(b) 9333 K

Fig. 15 Influence of incident angle on test spectral curve under different color temperatures.

(a) 4876 K; (b) 9333 K

考虑到 HMD 中菲涅耳透镜的应用环境,对薄膜样品进行了牢固度及环境测试。牢固度测试:使用 3M 胶带对两种滤光片样品进行牢固度测试,结果显示无脱膜现象。环境测试:将样品分别放置在 90 °C、-40 °C 环境下,进行 168 h 的高温、低温、高湿试验,重复两个周期,没有出现脱膜及裂膜现象。

当真空度为 3×10⁻³ Pa 时开启离子源,在不加温的状态下对基底进行离子轰击,以达到清洗基底的目的。由于 PC 及 PMMA 基板在 150 °C 时开始形变,在镀膜过程中需严格控制温升,具体工艺参数如表 9 所示。

量比的化合物,O与Ti的分子个数比可在1.66~1.70之间变化,引起了折射率的变化,从而产生误差。不同基底下的测试光谱曲线的色温如表 10 所示,不同色温时入射角对测试光谱曲线的影响如图 15 所示。误差控制在±5 K 内,仍可以用于解决 HMD 色温偏好问题。

表 10 不同基底色温的实际色温值及对比误差

Table 10 Spectral actual color temperature value and contrast error for each substrate

Substrate	Color temperature of 4876 K		Color temperature of 9333 K	
	Actual value /K	Error /K	Actual value /K	Error /K
K9	4876.33	+0.33	9333.00	1.30
PMMA	4878.01	+2.01	9337.18	+4.18
PC	4872.43	-3.90	9332.29	-0.71

5 结 论

从色温的理论计算、薄膜的模拟仿真和实验制备三方面对 HMD 中男/女人眼的色温偏好进行了分析与讨论,并以常见的三种菲涅耳透镜材料作为基底,制备了色温滤光膜。设计出色温分别为 4876 K、9333 K 的两种滤光片。与普通菲涅耳透镜

相比,镀有两种色温滤光膜的透镜在中心视场角范围内解决了 HMD 中 VR 的性别色温偏好问题,还原了图像可视化色彩。但对于大角度入射(入射角大于 30°)时的色温滤光膜,还需要进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Saleeb N. Effects of the differences between virtual and physical perception of space on Building Information Modelling [C] // Building Information Modelling (BIM) in Design, Construction and Operations, September 9-11, 2015, Bristol, UK. Southampton, UK: WIT Press, 2015: 21-32.
- [2] Yu L, Westland S, Li Z, et al. The role of individual colour preferences in consumer purchase decisions [J]. *Color Research & Application*, 2017, 43(2): 258-267.
- [3] Dalholm E, Rydbergmitchell B, Davies R, et al. The experience of space in full-scale models and virtual reality [C] // 7th European Full Scale Modelling Association Conference, February 18-20, 1999, Florence, Italy. [S.l.:s.n.], 1999: 67-74.
- [4] Murray I J, Parry N R A, McKeefry D J, et al. Sex-related differences in peripheral human color vision: a color matching study[J]. *Journal of Vision*, 2012, 12(1): 18.
- [5] Jain N, Verma P, Mittal S, et al. Gender based alteration in color perception [J]. *Indian Journal of Physiology and Pharmacology*, 2010, 54(4): 366-370.
- [6] Fider N A, Komarova N L. Differences in color categorization manifested by males and females: a quantitative World Color Survey study [J]. *Palgrave Communications*, 2019, 5(1): 142.
- [7] Hurlbert A C, Ling Y Z. Biological components of sex differences in color preference [J]. *Current Biology*, 2007, 17(16): R623-R625.
- [8] Siess A, Wölfel M. User color temperature preferences in immersive virtual realities [J]. *Computers & Graphics*, 2019, 81: 20-31.
- [9] Fleming B. 3D photorealism toolkit [M]. New Jersey: Wiley, 1998: 159-198.
- [10] Ou L C, Luo M R, Woodcock A, et al. A study of colour emotion and colour preference [J]. *Color Research & Application*, 2004, 29(5): 381-389.
- [11] Bodrogi P, Khan T. Illumination, color and imaging: evaluation and optimization of visual displays [EB/OL]. (2012-09-19) [2020-05-11]. <https://www.wiley.com/en-us/Illumination%2C+Color+and+Imaging%3A+Evaluation+and+Optimization+of+Visual+Displays-p-9783527410408>.
- [12] Yu H Y, Cao G Y, Zhang J H, et al. Solar spectrum matching with white OLED and monochromatic LEDs [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(10): 2659-2666.
- [13] Jing Q C, Jiao S L, Yu B L, et al. *Chromatics* [M]. Beijing: Science Press, 1979: 217-272. 荆其诚, 焦书兰, 喻柏林, 等. 色度学 [M]. 北京: 科学出版社, 1979: 217-272.
- [14] Piao D Z. Practical measuring method for color temperature [J]. *Modern Measurement and Test*, 1999, 7(1): 3-5. 朴大植. 实用颜色温度测量方法的研究 [J]. *现代计量测试*, 1999, 7(1): 3-5.
- [15] Xu D S, Chen X, Zhu X, et al. A dimming lighting source based on cold and warm white LEDs [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0123004. 徐代升, 陈晓, 朱翔, 等. 基于冷暖白光 LED 的可调色温可调光照明光源 [J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0123004.
- [16] Dai C H, Yu J L, Yu J, et al. Uncertainty analysis of the colour temperature and the correlated colour temperature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(4): 547-552. 代彩红, 于家琳, 于靖, 等. 颜色温度和相关色温的不确定度评定方法 [J]. *光学学报*, 2005, 25(4): 547-552.
- [17] Tamaru S, Ohno Y, Matsuba T, et al. Measurements of colour temperature—a simple and reliable method [J]. *Journal of the Illuminating Engineering Institute of Japan*, 1981, 65(4): 158-162.
- [18] Tang J F, Gu P F, Liu X. *Modern optical thin film technology* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 96-113. 唐晋发, 顾培夫, 刘旭. 现代光学薄膜技术 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006: 96-113.