

RGGB四基色激光显示系统的研究

朱立全, 姚昕晖, 邓林宵, 杨雨桦, 王贯, 顾春, 许立新

Research of RGGB four-primary laser display system

引用本文:

朱立全, 姚昕晖, 邓林宵, 杨雨桦, 王贯, 顾春, 许立新. RGGB四基色激光显示系统的研究[J]. *激光技术*, 2023, 47(6): 772-777.

ZHU Liqun, YAO Binghui, DENG Linxiao, et al. Research of RGGB four-primary laser display system[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 47(6): 772-777.

您可能感兴趣的其他文章

1. 不同年龄段人眼的视觉感知研究

引用本文: 马佳飞, 王贯, 姚昕晖, 等. 不同年龄段人眼的视觉感知研究[J]. *激光技术*, 2023, 47(2): 260-266.

2. CdTe太阳电池激光诱导微区光谱响应研究

引用本文: 郑雨洁, 周彪, 杨秀涛, 等. CdTe太阳电池激光诱导微区光谱响应研究[J]. *激光技术*, 2023, 47(1): 87-91.

3. 固定光强下组合啁啾波形优化谐波光谱的研究

引用本文: 敬晓丹, 李义, 冯立强. 固定光强下组合啁啾波形优化谐波光谱的研究[J]. *激光技术*, 2022, 46(6): 823-828.

4. 用于光纤激光器光谱组束的外腔反馈研究

引用本文: 刘小溪, 王学锋, 阚宝玺, 等. 用于光纤激光器光谱组束的外腔反馈研究[J]. *激光技术*, 2018, 42(6): 835-839.

5. 光束参量积对半导体激光器光束质量的评估

引用本文: 杨孝敬, 焦清局, 王乙婷. 光束参量积对半导体激光器光束质量的评估[J]. *激光技术*, 2018, 42(6): 859-861.

文章编号: 1001-3806(2023)06-0772-06

RGGB 四基色激光显示系统的研究

朱立全^{1,2,3}, 姚炳晖^{1,2,3}, 邓林宵^{1,2,3}, 杨雨桦^{1,2,3}, 王贯^{1,2,3}, 顾春^{1,2,3}, 许立新^{1,2,3*}

(1. 中国科学技术大学核探测与核电子学国家重点实验室, 合肥 230026; 2. 中国科学技术大学物理学院安徽省光电子科学与技术重点实验室, 合肥 230026; 3. 先进激光技术安徽省实验室, 合肥 230026)

摘要: 为了获得更大的绿色部分色域与超高清显示标准(Rec. 2020)中更高的色域覆盖比例, 在三基色的基础上添加了 532 nm 激光作为第四基色。在 CIEL**a***b** 立体颜色空间中, 系统理论地分析了波长组合为 660 nm, 532 nm, 520 nm, 465 nm 的红绿绿蓝(RGGB)四基色系统, 研究了它在色域体积、色域覆盖率以及在特定颜色区域的颜色渲染能力等方面的表现。结果表明, 其色域体积峰值为 2218900, 与 Rec. 2020 标准的色域覆盖比例最大为 97.51%, 黄色区域的色域增强峰值为 29.75%, 绿色区域的色域增强峰值为 9.58%; 与红绿蓝(RGB)三基色组合和红绿蓝黄(RGBY)四基色组合相比, RGGB 四基色组合在各个参数维度均有优异表现, 可以根据性能需求来灵活选择对应的四基色亮度比例。此研究为实际四基色显示系统的搭建提供了理论指导。

关键词: 激光光学; 激光显示; 立体色域; 色域覆盖率; 色域增强

中图分类号: TN27; TN249 文献标志码: A doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.06.007

Research of RGGB four-primary laser display system

ZHU Liqun^{1,2,3}, YAO Binghui^{1,2,3}, DENG Linxiao^{1,2,3}, YANG Yuhua^{1,2,3},
WANG Guan^{1,2,3}, GU Chun^{1,2,3}, XU Lixin^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2. Anhui Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology, School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230026, China)

Abstract: In order to obtain a larger color gamut in the green region and broader gamut coverage with Rec. 2020, 532 nm laser light was adopted as the fourth primary. The color gamut volume, gamut coverage with Rec. 2020, gamut enhancement in the green region, and gamut coverage in the yellow region of RGGB (red, green, green, blue) wavelength set 660 nm, 532 nm, 520 nm, 465 nm was simulated and analyzed in CIEL**a***b** uniform color space. The result shows that the maximum color gamut volume is 2218900, the maximum gamut coverage with Rec. 2020 standard is 97.51%, and the maximum gamut enhancement in the yellow region and green region is 29.75% and 9.58%, respectively. This RGGB system has excellent performance when compared with RGB three-primary system and RGBY four-primary system, and the luminance ratio can be adjusted according to the actual requirements. This research provides another feasible idea for the construction of a four-primary color display system.

Key words: laser optics; laser display; color gamut volume; gamut coverage; gamut enhancement

引言

作为人机交互的重要界面, 显示设备近年来发展迅猛, 以电脑、平板、手机和投影仪为代表的各种显示

系统相继进入千家万户。随着技术的发展, 人们对显示效果有了更高的要求。对于固定的图像或者视频源, 其显示效果完全由显示系统的性能决定。一般来说, 表征一个显示系统性能的主要参数包括亮度、对比度、分辨率和色域^[1-2]。色域表征着显示系统渲染颜色的能力, 是其最为重要的参数之一。色域包括色域大小和色域覆盖率^[3]两个指标。色域大小即显示系统的色域面积或色域体积^[4], 表征其可以渲染的颜色数量^[5]; 色域覆盖率即显示系统的色域和目标色域的覆盖程度, 影响着该系统色彩还原和色域映射的能力。对

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2021YFF0307804)

作者简介: 朱立全 (1987-), 男, 博士研究生, 主要研究领域为激光显示、多基色显示、色域理论、光纤激光器等。

* 通讯联系人。E-mail: xulixin@ustc.edu.cn

收稿日期: 2022-11-08; 收到修改稿日期: 2022-11-18

于某一个确定的色域标准来说,显示系统色域超出该标准的部分是没有意义的,所以色域覆盖率越高,则显示系统可有效利用的色域越大。因此,研究色域的方向是在增加色域覆盖率的基础上尽可能地增加色域的大小。

色域大小可以通过减小光源的光谱宽度来提升。从早期的氙灯到发光二极管、微发光二极管、量子点,再到窄谱激光^[6],随着光源谱宽的减小,显示系统的色域大小逐渐增大,且接近饱和,进一步减小谱宽对色域大小的影响极低^[4]。由于激光的高单色性^[7],激光显示成为了目前唯一能够达到超高清显示标准 Rec. 2020^[8]的技术。此外,色域大小还可以通过波长优化来最大化^[9]。经过这两种方法的优化,三基色系统^[10-11]已经达到了美国国家电视标准委员会(National Television Standards Committee, NTSC)标准色域的151%。要再进一步扩大色域,就必须增加基色数目,也就是发展多基色显示系统^[12-14]。多基色方面目前已有许多相关研究,根据研究的目的,可以将它们分为两类:第1类是针对宽谱光源,通过增加黄色或青色波段的滤波片来增强亮度的方案^[15-16];第2类是增强色域的方案^[17-18],但也仅局限于研究色域的大小,没有研究色域覆盖率的变化。在给定白点的多基色系统中,其白点的配平拥有无数组解,意味着组成该系统的多种基色存在着无数种的亮度比例^[19],对应的立体色域形状随该比例而变化,与目标色域的覆盖率也随之变化,因此研究其色域覆盖率的变化规律是有重要意义的。相较于三基色显示系统,多基色显示系统的色域体积整体上有明显提升,但在各基色不同亮度比例时,其立体色域形状不同,意味着在不同色调方向的显色能力存在差异,因此显示系统特定颜色区域的色域增强能力的评估和评价愈发重要。此前有不少基于人眼视觉主观判断或者图像的方法^[17,20]。这些定性的心理学实验评估方法有一定的参考价值,但是它们不能直观定量描述其色域增强能力。在之前的工作中,作者提出了在3-D颜色空间 CIEL**a***b** 中定量描述特定颜色区域色域增强的算法^[21],从而可以分析不同显示系统在不同颜色区域的颜色表现能力。

色域覆盖率是色域的重要指标,高色域覆盖率是色彩精确还原和映射的基础。目前,主要考虑与两种目标色域的覆盖率。

第1个目标色域对应显示设备中常用的颜色标准。为了方便不同设备之间的色域映射,美国电影电视工程师协会和国际电信联盟提出了 DCI-P3^[22]、Rec. 709^[23]和 Rec. 2020^[8]等色域标准。显示设备与

这些标准的覆盖率越高,则其再现图像的能力就越强,颜色表现就越准确。这里以最新、色域最大的超高清显示标准 Rec. 2020 为例。

第2个目标色域对应的是自然界的颜色。1980年, POINTER 采集了4089个真实物体的颜色样本,定义了 Pointer 色域,以之表述自然界颜色的范围^[24]。然而,由于年代久远和采样数量较少的缘故,其色域范围很小,目前的主流显示系统的色域都已经基本实现对其的全覆盖;另一方面,它并未包括新开发的染料和颜料的颜色数据。因此, MASAOKA^[25], WEN^[26]和 SONG^[13]等人均推荐使用标准照明体的麦克亚当极限来作为目标色域。D₆₅是亚洲地区常用的显示器白点,也在摄影中广泛被采用。因此作者将标准照明体 D₆₅的色域作为第2个目标色域,简称为 D₆₅ 标准照明体色域。与 D₆₅ 标准照明体色域的覆盖率越高,则表示还原自然界颜色的能力越强。

在之前的工作中,作者针对不同波长组合的红绿蓝黄(red, green, blue, yellow, RGBY)四基色系统,对色域体积、色域覆盖率和黄区色域增强这3个参数进行了研究,并根据侧重黄区域色域增强的需求,推荐了最佳四基色波长组合(660 nm, 520 nm, 465 nm, 577 nm)^[21]。而对于一个显示系统来说,绿色部分的色域占比最大,且人眼对绿色最为敏感(绿光的视效函数值最大)。因此,如果要获得更大的绿色色域,应考虑在传统红绿蓝三基色的基础上添加绿基色作为第四基色。另一方面, Rec. 2020 是未来一段时间内最重要的超高清显示标准,它采用的绿基色色坐标为(0.170, 0.797),对应波长532 nm。因此,采用532 nm绿光有可能获得与该标准更高的色域覆盖率,实现更精确的色彩还原。目前市场上的577 nm黄光以固体激光器为主,体积大、转换效率低,而体积小、转换效率高的半导体或者光纤黄光激光器还停留在实验室层面,功率低,短期内无法市场化应用,导致实际的 RGBY 的四基色显示系统搭建存在一定难度。而日亚化学(Nichia)公司目前已有单管1 W的半导体二极管绿光上市,为模组集成并应用到显示系统中提供了可能性。因此,对红绿绿蓝(red, green, green, blue, RRGB)四基色显示系统进行研究是有现实意义的。

本文作者通过理论模拟,分析了在传统三基色基础上添加532 nm绿光的 RRGB 四基色组合(660 nm, 532 nm, 520 nm, 465 nm)的表现。结果表明,该系统在色域体积、色域覆盖率、黄区的色域增强及绿区色域增强方面均有优异表现。因此, RRGB 组合可以作为

搭建四基色显示系统的可行方案。

1 四基色立体色域的理论计算方法

众所周知,三基色组合具有唯一的一组解。而四基色具有一个自由度的变量,因此有无数种解。根据YAO等人的理论^[19],可按照如下方法进行四基色的配平和色域体积的计算。

首先,根据给定的红绿蓝(RGB)波长,将显示系统配平至白平衡点^[11] $D_{65}(x=0.3127, y=0.3290)$,得到唯一的一组亮度解(Y_r, Y_g 和 Y_b), Y_r, Y_g 和 Y_b 分别为红光、绿光和蓝光的亮度。设三基色系统的总亮度为 Y_w ,同时它也是四基色系统的总亮度,定义如下:

$$Y_r + Y_g + Y_b = Y_w \quad (1)$$

假设添加的绿基色的初始亮度是常数 $Y_{g,1}$,它可以由原来的RGB三基色表示:

$$Y_r' + Y_g' + Y_b' = Y_{g,1} \quad (2)$$

式中, Y_r', Y_g' 和 Y_b' 分别为表示该绿基色的原三基色亮度。假设 k 为532 nm基色的亮度系数,那么 $kY_{g,1}$ 就是四基色系统中532 nm基色的亮度。联立(1)式和(2)式,可得到:

$$Y_r + Y_g + Y_b + k[Y_{g,1} - (Y_r' + Y_g' + Y_b')] = Y_w \quad (3)$$

整理后可得:

$$\begin{aligned} (Y_r - kY_r') + (Y_g - kY_g') + \\ (Y_b - kY_b') + kY_{g,1} = Y_w \end{aligned} \quad (4)$$

方程等号左边的4项对应于原有的红、绿、蓝和添加的第四基色的亮度 Y_r, Y_g, Y_b 和 $Y_{g,1}$ 。由于实际的四基色系统中4个基色的亮度不可能为负值,所以其约束关系可以写成如下形式:

$$\begin{cases} Y_r - kY_r' \geq 0 \\ Y_g - kY_g' \geq 0 \\ Y_b - kY_b' \geq 0 \\ Y_{g,1} - kY_{g,1} \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

特别是当(5)式中任意等式成立时,四基色系统将退化为三基色;当 $k=0$ 时,四基色系统退化为原来的红绿蓝三基色系统。利用上述方法,可以确定 k 的取值范围,其中每一个 k 的取值都对应着一组唯一确定的四基色亮度比例。因此,可以计算出所有组合对应的四基色亮度比例,进而绘制出所有组合对应的色立体的形状并计算出色域体积。

以在(660 nm, 520 nm, 465 nm)的三基色组合的基础上添加532 nm为例(如表1所示),为了简化计算,假设 Y_w 和 $Y_{g,1}$ 为100,这样可得:

$$\begin{cases} Y_r = 26.7459, Y_g = 68.3505, Y_b = 4.9036 \\ Y_r' = 5.1623, Y_g' = 95.1446, Y_b' = -0.3069 \end{cases} \quad (6)$$

表1 RGGB四基色的色坐标

Table 1 Coordinates of the four primary colors of RGGB

wavelength/nm	line width/nm	coordinate x	coordinate y
465	1	0.1354	0.0399
520	1	0.0743	0.8336
660	1	0.7300	0.2700
532	1	0.1704	0.7964

4种基色的亮度比例为:

$$\begin{cases} Y_R = 26.7459 - 5.1623 \times k \\ Y_G = 68.3505 - 95.1446 \times k \\ Y_B = 4.9036 + 0.3069 \times k \\ Y_{G,1} = 100 \times k \end{cases} \quad (7)$$

所得 k 的取值范围为 $0 \leq k \leq 0.71$ 。为了说明色域体积和覆盖率等参数随 k 的变化,按0.01的间隔,选取从0~0.71的72个点,遍历 k ,可以得到所有的组合对应的参数情况。

2 RGGB四基色显示系统的性能分析

根据上面所介绍的算法,依次对RGGB四基色组合(660 nm, 532 nm, 520 nm, 465 nm)的色域体积、色域覆盖率和色域增强等参数进行了研究。如果不作特殊说明,下文中所指RGGB即为红、绿、绿、蓝四基色组合(660 nm, 532 nm, 520 nm, 465 nm),RGBY组合即为此前工作中得到的红、绿、蓝、黄四基色的最佳组合(660 nm, 577 nm, 520 nm, 465 nm),三基色组合即为(660 nm, 520 nm, 465 nm)。

2.1 立体色域体积

本文作者计算了RGGB组合不同的 k 对应的色域体积,结果如图1所示。可以看到,其色域体积随着 k 的增加而增加,在 $k=0.28$ 时达到峰值2218900。此时对应的4种基色的亮度比例可由(7)式得到,为25.30:

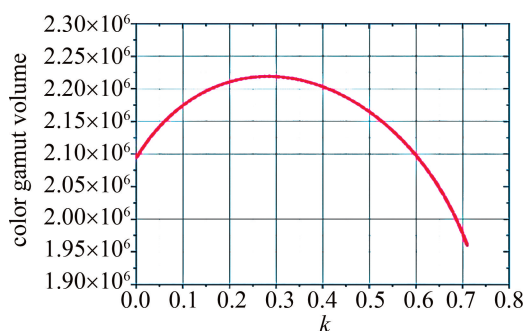


图1 色域体积随 k 的变化曲线

Fig. 1 Curve of color gamut volume with k

28.00 : 41.71 : 4.99, 其立体色域如图 2 所示。在 CIEL* a* b* 颜色空间中, L* 为亮度, a* 轴正负分别代表红绿色, b* 轴正负分别代表黄蓝色。之后, 色域体积随着 k 的增加而逐渐减小, 当 k 超过 0.6 后, 其色域体积开始低于三基色组合。

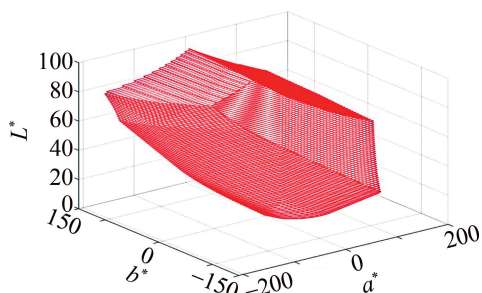


图 2 k=0.28 时 CIEL* a* b* 空间中的四基色系统色立体

Fig. 2 Color solid of four-primary system with k=0.28 in CIEL* a* b* space

2.2 与 Rec. 2020 和 D₆₅ 标准照明体的色域覆盖率

本文作者计算了 RRGB 四基色组合在不同 k 时与 Rec. 2020 标准和 D₆₅ 标准照明体色域的覆盖率, 结果如图 3 和图 4 所示。从图 3 可以看到, 它与 Rec. 2020 的覆盖率先随 k 的增加而单调递增, 并在 k=0.66 时达到峰值 97.51%, 其后出现小幅下降, 峰值对应的 4 种基色的亮度比例为 23.34 : 66.00 : 5.56 : 5.10。这是

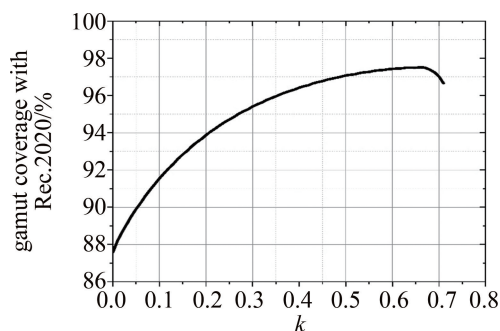


图 3 RRGB 四基色与 Rec. 2020 标准的色域覆盖率随 k 的变化曲线

Fig. 3 Curve of color gamut coverage of RRGB four-primary system with Rec. 2020 at different k

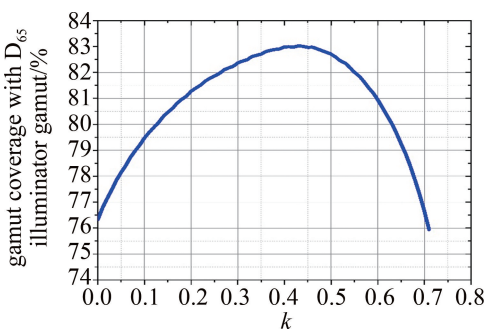


图 4 RRGB 四基色与 D₆₅ 标准照明体色域的覆盖率随 k 的变化曲线

Fig. 4 Curve of color gamut coverage of RRGB four-primay system with D₆₅ illuminator gamut at different k

因为 Rec. 2020 标准中规定的绿光波长正好是 532 nm, 因此添加 532 nm 基色后, 其覆盖率随着基色强度的增加而单调增加。由图 4 可知, RRGB 四基色系统与 D₆₅ 标准照明体色域的覆盖率先随着 k 的增加而增加, 在 k=0.43 时达到峰值 83.02%, 然后逐渐下降。峰值时对应的 4 种基色的亮度比例为 24.53 : 43.00 : 27.44 : 5.03。

2.3 黄色区域和绿色区域的色域增强

人眼对于黄色和绿色波长的响应最高, 对其颜色分辨能力也最强。因此, 在显示系统中, 绿色和黄色的颜色渲染能力有非常重要的意义, 也对之进行了研究。参照此前对黄区颜色增强的定义, 可将其推广到绿区。分别计算 RRGB 四基色组合在黄色区域 (560 nm ~ 600 nm) 和绿色区域 (500 nm ~ 560 nm) 的色域增强比例, 结果如图 5 所示。可以看到, 随着 k 的增加, 黄色区域的色域增强比例迅速上升, 在达到峰值 29.75% 后小幅回落, 峰值处 k=0.51, 对应基色亮度比例为 24.11 : 51.00 : 19.83 : 5.06; 绿色区域的色域增强为 9.58%, 达到峰值后迅速下降, 峰值处 k=0.27, 对应基色亮度比例为 25.35 : 27.00 : 42.66 : 4.99。

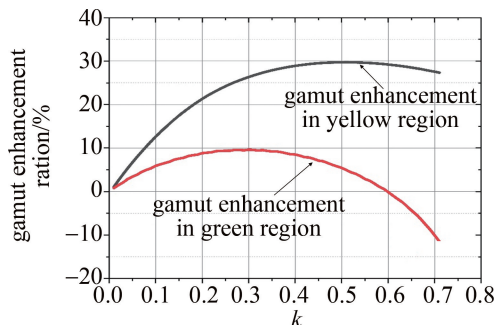
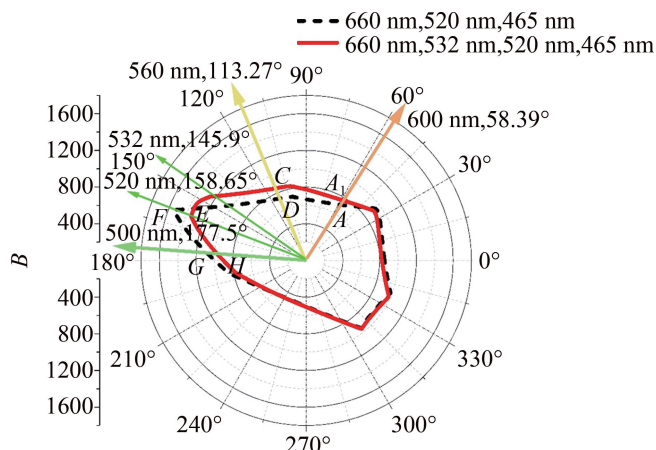


图 5 黄色区域和绿色区域的色域增强随 k 的变化曲线

Fig. 5 Curve of color gamut enhancement in yellow and green regions with k

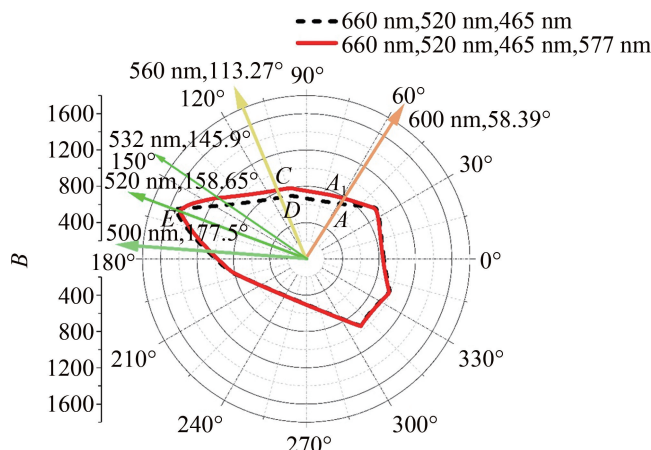
同样地, 为了方便研究不同色调角方向的色域体积, 并直观比较黄色区域和绿色区域的色域增强, 利用色域环算法^[27], 将 3-D 立体色域转换到 2-D 极坐标平面图中处理, 绘制出了四基色显示系统和三基色显示系统在极坐标下的图形, 如图 6 和图 7 所示。其中 B 代表在某一色调角方向的色域体积, 其具体定义计算可详见参考文献[27]。图中的线条所围形状的面积即为对应系统的色域体积, 径向半径的长度代表了该色调角方向的色域体积。

图 6 为 k=0.51 时的色域环, 黑色线条所围成的面积代表了三基色组合的色域体积, 红色线条围成的面积代表了 RRGB 四基色组合的色域体积, 由原点出发的箭头分别标示了不同色调角的方向。两个环在

图6 $k=0.51$ 时黄色区域和绿色区域的色域增强示意图Fig. 6 Gamut enhancement in yellow and green regions with $k=0.51$

560 nm 和 600 nm 之间的差额部分,也就是多边形 AA_1CD 的面积即为黄色区域的增强。两个环在 500 nm 和 560 nm 之间的差额部分,也就是多边形 CDE 和 $EFGH$ 的面积差即为绿色区域的增强。可以看到,此时黄色区域的增强最大,而绿色部分在 532 nm 方向有一定增强,但在 520 nm 方向也有较大幅度的减弱。这是因为此时 k 值较大,532 nm 基色的强度较高,导致 520 nm 基色的强度减弱,从而色域相应变化。

图 7 为 $k=0.27$ 时的色域环,同样的,多边形 AA_1CD 的面积为黄色区域的增强。由于两个环在 520 nm 和 500 nm 之间几乎重合,因此多边形 CDE 的面积约等于绿色区域的增强。可以看到绿色部分在 532 nm 方向有一定增强,在 520 nm 方向有微小减弱。

图7 $k=0.27$ 时黄色区域和绿色区域的色域增强示意图Fig. 7 Gamut enhancement in yellow and green regions with $k=0.27$

这是因为此时 k 值较小,520 nm 基色的强度减弱不明显。

3 讨论与分析

将前面得到的分析结果汇总到表 2 中。可以发现,RGBG 四基色组合的色域体积在 $k=0.28$ 时取得最大值 2218900,比三基色组合增加了 5.96%,比 RGBY 组合增加了 2.79%;与 Rec. 2020 色域标准的覆盖率在 $k=0.66$ 时取得最大值 97.51%,比三基色的 87.56% 提升了 11.36%,比 RGBY 四基色系统提升了 4.86%;与 D_{65} 标准照明体的覆盖率在 $k=0.43$ 时取得最大值 83.02%,比三基色组合的 76.32% 提升了 8.07%,相较于 RGBY 四基色的 82.45% 仅有小幅提升。

表2 RGBG 组合、RGBY 组合与三基色组合的性能比较

Table 2 Comparison of the parameters of RGBG, RGBY and RGB sets

wavelength set	maximum color gamut volume	gamut coverage with Rec. 2020/%	gamut coverage with D_{65} illuminator/%	gamut enhancement in yellow region	gamut enhancement in green region
RGB three-primary	2094000	87.56	76.32	229335	659415
RGBG four-primary	2218900 ($k=0.28$)	97.51 ($k=0.66$)	83.02 ($k=0.43$)	68204 ($k=0.51, 29.74\%$)	63172 ($k=0.27, 9.58\%$)
RGBY four-primary	2158700 ($k=0.13$)	92.99 ($k=0.21$)	82.45 ($k=0.33$)	99668 ($k=0.51, 43.46\%$)	19584 ($k=0.09, 2.97\%$)

黄色区域的色域增强在 $k=0.51$ 时取得最大值 68204 (色域增强峰值为 29.74%),相较于 RGBY 四基色的 99668 (色域增强峰值为 43.46%) 有降低。绿色区域的色域增强在 $k=0.27$ 时取得最大值 63172 (色域增强峰值为 9.58%),相较于 RGBY 四基色在 $k=0.09$ 时的 19584 (色域增强峰值为 2.97%) 有明显提升。

综上所述,与 RGBY 四基色组合相比,RGBG 四基色组合在色域体积、色域覆盖率和绿色区域色域增强等各个参数维度均有显著提升;在黄区的色域增强方面有一定幅度减弱,但较之三基色组合,其提升依然很可观。在实际使用中,可以根据对显示系统性能的需求

来灵活调整要应用的 4 种基色的亮度比例,即 k 的取值。如果侧重整体颜色表现能力,追求最大的色域体积,则设定为 $k=0.28$,亮度比例 25.30:28.00:41.71:4.99;如果侧重与 Rec. 2020 标准的色域兼容能力,追求最大的色域覆盖,则设定为 $k=0.66$,亮度比例 23.34:66.00:5.56:5.10;如果侧重绿色部分的色域动态范围,则设定为 $k=0.27$,亮度比例为 25.35:27.00:42.66:4.99。

4 结论

本文中研究了添加绿色 532 nm 的 RGBG 四基

色组合在立体色域体积、色域覆盖率、黄区色域增强以及绿区域色域增强这几个方面的表现。与之前工作中优化后的 RGBY 组合 (660 nm, 532 nm, 520 nm, 465 nm) 相比较, RRGB 除了和黄区色域增强方面有一定幅度减弱外, 其余各个参数上均有更佳表现, 与超高清显示标准 Rec. 2020 的覆盖率高达 97.51%。结合高功率黄色激光器的获取难度, 推荐采用添加 532 nm 波长的 RRGB 组合来作为实际四基色激光显示系统搭建的选择, 根据性能的需求来采用不同的亮度比例。本工作为四基色激光显示系统的搭建提供了强有力的理论指导。

参 考 文 献

- [1] LIU Q E. Gamut and gamut coverage[J]. Video Engineering, 2004 (11): 49-51 (in Chinese).
刘全恩. 色域及色域覆盖率[J]. 电视技术, 2004(11): 49-51.
- [2] WANG K, LÜ Y J, GAO Y L, *et al.* 3-D color gamut measurement of LCD monitor and evaluation in different color spaces[J]. Electro-Optic Technology Application, 2011, 26 (6): 18-21 (in Chinese)
王凯, 吕毅军, 高玉琳, 等. LCD 显示器三维色域测量和不同色空间应用对比[J]. 光电技术应用, 2011, 26(6): 18-21.
- [3] MASAOKA K, NISHIDA Y. Metric of color-space coverage for wide-gamut displays[J]. Optics Express, 2015, 23(6): 7802-7808.
- [4] WANG G, YANG Y, DONG T, *et al.* Macadam's theory in RGB laser display[J]. Chinese Physics, 2019, B28(6): 064209.
- [5] ZHU R, LUO Z, CHEN H, *et al.* Realizing Rec. 2020 color gamut with quantum dot displays [J]. Optics Express, 2015, 23 (18): 23680-23693.
- [6] GAO W N, XU Z Y, BI Y, *et al.* Present development and tendency of laser display technology [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22 (3): 85-91 (in Chinese)
高伟男, 许祖彦, 毕勇, 等. 激光显示技术发展的现状和趋势 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 85-91.
- [7] CHELLAPPAN K V, ERDEN E, UREY H. Laser-based displays: A review[J]. Applied Optics, 2010, 49(25): 79-98.
- [8] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION-RADIOCOMMUNICATION SECTOR. Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange [EB/OL]. [2022-11-18]. <https://glenwing.github.io/docs/ITU-R-BT.2020-1.pdf>.
- [9] BUCKLEY E. Laser wavelength choices for pico-projector applications [J]. Journal of Display Technology, 2011, 7(7): 402-406.
- [10] YAO A Y, HOU W, LIN X Ch, *et al.* The projection display experiment in large screen by three primary colors from all solid state laser [J]. Physics, 2004, 33(2): 133-136 (in Chinese).
姚爱云, 侯玮, 林学春, 等. 全固态三基色激光大屏幕投影显示实验[J]. 物理, 2004, 33(2): 133-136.
- [11] WANG C, YAO B H, MA J F, *et al.* Selection of white balance point in three primaries laser display[J]. Laser Technology, 2021, 45(4): 411-416 (in Chinese).
王聪, 姚炳晖, 马佳飞, 等. 三基色激光显示中白平衡点的选择研究[J]. 激光技术, 2021, 45(4): 411-416.
- [12] OUYANG M, HUANG S W. Design considerations between color gamut and brightness for multi-primary color displays[J]. Journal of Display Technology, 2007, 3(1): 71-82.
- [13] SONG H, LI H, LIU X. Studies on different primaries for a nearly-ultimate gamut in a laser display [J]. Optics Express, 2018, 26 (18): 23436-23448.
- [14] TERAGAWA M, YOSHIDA A, YOSHIYAMA K, *et al.* Multi-primary-color displays: The latest technologies and their benefits[J]. Journal of the Society for Information Display, 2012, 20(1): 1-11.
- [15] LEE B, PARK C, KIM S, *et al.* TFT-LCD with RGBW color system [J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2003, 34(1): 1212-1215.
- [16] KWAK Y S, JU Y P, PARK D S. RGB to RGBW color decomposition method and system; US 8049763 B2[P]. 2011-11-01.
- [17] ROTH S, CALDWELL W. 64.4: Four primary color projection display [J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2005, 36 (1): 1818-1821.
- [18] KISHINO K, SAKAKIBARA N, NARITA K, *et al.* Two-dimensional multicolor (RGBY) integrated nanocolumn micro-LEDs as a fundamental technology of micro-LED display[J]. Applied Physics Express, 2019, 13(1): 014003.
- [19] YAO B H, ZHU L Q, DENG L X, *et al.* General solution to the calculation of peak luminance of primaries in multi-primary display systems[J]. Optics Express, 2022, 30(2): 1036-1055.
- [20] WANG Y C, HUANG B S, HSIEH K S, *et al.* Comparative evaluation of the imaging performance of multi-primary color LCDs with RGBCW and RGBCY pixel units by simulation[J]. Journal of Display Technology, 2014, 10(9): 729-736.
- [21] ZHU L Q, YAO B H, DENG L X, *et al.* Evaluation of gamut enhancement in yellow regions and a choice of optimal wavelength for a RGBY four-primary laser display system[J]. Optics Express, 2022, 30(21): 38938-38952.
- [22] THE SOCIETY OF MOTION PICTURE AND TELEVISION ENGINEERS. RP 431-2: 2011-SMPTE recommended practice-D-cinema quality-reference projector and environment [EB/OL]. (2011-04-06) [2022-11-18]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7290729>.
- [23] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION-RADIOCOMMUNICATION SECTOR. Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange [EB/OL]. [2022-11-18]. https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/207457/mod_resource/content/1/R-REC-BT.709-5.pdf.
- [24] POINTER M R. The gamut of real surface colours [J]. Color Research & Application, 2010, 5(3): 145-155.
- [25] MASAOKA K, NISHIDA Y, SUGAWARA M. Designing display primaries with currently available light sources for UHDTV wide-gamut system colorimetry [J]. Optics Express, 2014, 22 (16): 19069-19077.
- [26] WEN S. A method for selecting display primaries to match a target color gamut [J]. Journal of the Society for Information Display, 2012, 15(12): 1015-1022.
- [27] MASAOKA K, FU J, FAIRCHILD D, *et al.* 2D representation of display color gamut [J]. SID International Symposium: Digest of Technology Papers, 2018, 49(2): 1048-1051.