



新型多基色激光显示系统 立体色域特性研究及其应用探索

报告人：朱立全 副研究员

中国科学技术大学物理学院光学与光学工程系

光电子科学与技术安徽省重点实验室

中国科学技术大学激光显示团队简介

核探测与核电子学国家重点实验室

State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics



中国科学技术大学物理学院

School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China



光电子科学与技术
安徽省重点实验室

Anhui Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology

研究方向：光纤激光与显示技术 带头人：许立新教授

团队发表文章八十余篇，形成相应知识产权一百余项

1. 国家重点研发计划 2016-2021

《面向三基色LD激光显示整机关键技术基础研究》

2. 安徽省科技重大专项 2017-2019

《高亮度激光放映机及关键技术研究》

3. 国家重点研发计划 科技冬奥 2021-2022

《大规模复杂表面全色激光投影显示》

4. 国家重大科技专项 创新2030 2025-2028

《超高清投影式样和平板式激光显示研发及应用》



首席科学家

许祖彦 中国工程院院士

中国科学技术大学光学与光学工程系主任

中国科学院功能晶体与激光技术重点实验室学术委员会主任

首先在国内实现激光全色投影显示，推动了我国大色域显示技术的发展。



首席科学家

欧阳钟灿 中国科学院院士

中国科学技术大学物理学院院长

中国科学院理论物理所原所长、研究员

对液晶、生物膜理论、DNA生物大分子弹性性质及蛋白质折叠的研究作出巨大贡献。



技术带头人

许立新 中国科学技术大学教授

国家重点研发计划项目首席专家

中国光学工程学会显示专业委员会常务理事

中国光学学会光电子技术专业委员会常务理事

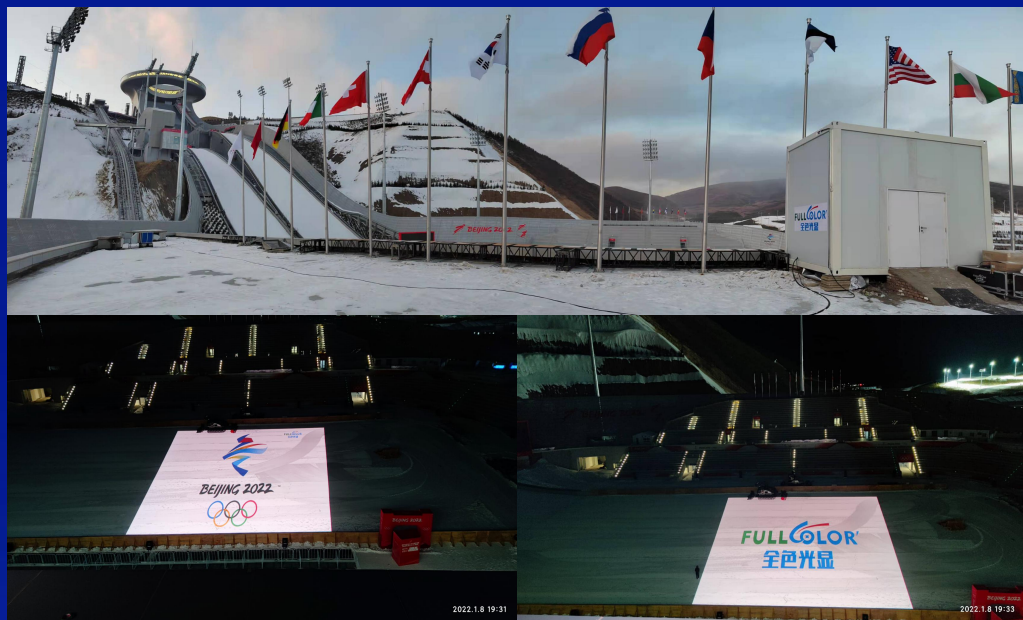
中国科学技术大学光电子科学与技术安徽省重点实验室副主任

成果转化：合肥全色光显

公司简介：合肥全色光显科技有限公司

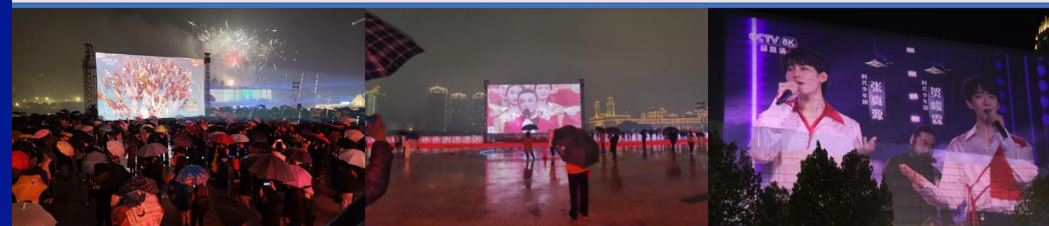


- 国家重点研发计划、省科技重大专项成果转化的高新技术企业；中科大赋权企业
- 中科大激光显示研究团队、安徽省投、合肥高新产业基金共同创立；
- 安徽省人才团队支持；
- 主要从事激光光源模组、激光全色显示整机、光学引擎的研发、生产、销售及相关的软硬件技术服务；
- 致力于发展超高清全色显示共性技术，致力于新一代显示技术研发与应用。



2022 北京冬奥“雪屏幕”：超高清显示典型应用案例

与央视总台联合举办“央视8K超高清频道”户外直播活动



福州闽江之心中心广场央视春晚户外直播

福州闽江之心中心广场央视元宵晚会户外直播

合肥银泰城外立面央视中秋晚会户外直播

公司入选工业和信息化部、中央宣传部、交通运输部、文化和旅游部、国家广播电视总局、中央广播电视总台等六部委联合推出“百城千屏”超高清显示生产企业名单

2023 央视超高清频道：“百城千屏”超高清显示生产企业名单



2024 央视总台首届“科晚”录制

生产激光全色微型投影机、工程投影机、激光电视、
激光全色光学引擎（光机）、激光光源及相关核心器件。



高亮度激光
工程投影机



激光工程投影机



激光微型投影机



激光显示光学引擎



激光户外投影机



超短焦激光
投影机



激光全色电视机



RGB激光光源



高铁车灯



激光全色未来电视



1. 激光显示与多基色激光显示



2. 多基色激光显示立体色域特性研究



3. RGBC系统及青色特征增强算法



4. 多基色激光显示中的同色异谱研究



5. 与医疗应用的结合

第

1

部分

激光显示与多基色激光显示

显示技术发展历程



第一代 黑白显示

上世纪30年代

图像从无到有



第二代 彩色显示

上世纪50年代

彩色图像问题



第三代 数字显示

上世纪末

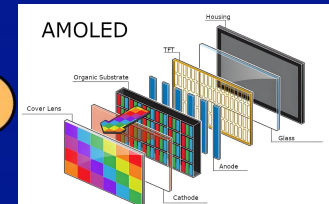
清晰度问题



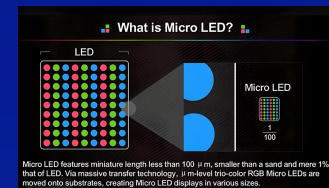
第四代 大色域显示

本世纪初

色度学问题



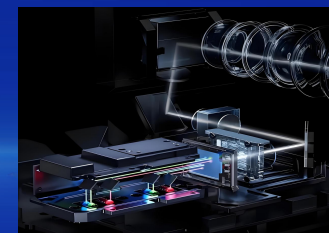
OLED



Micro-LED



QD



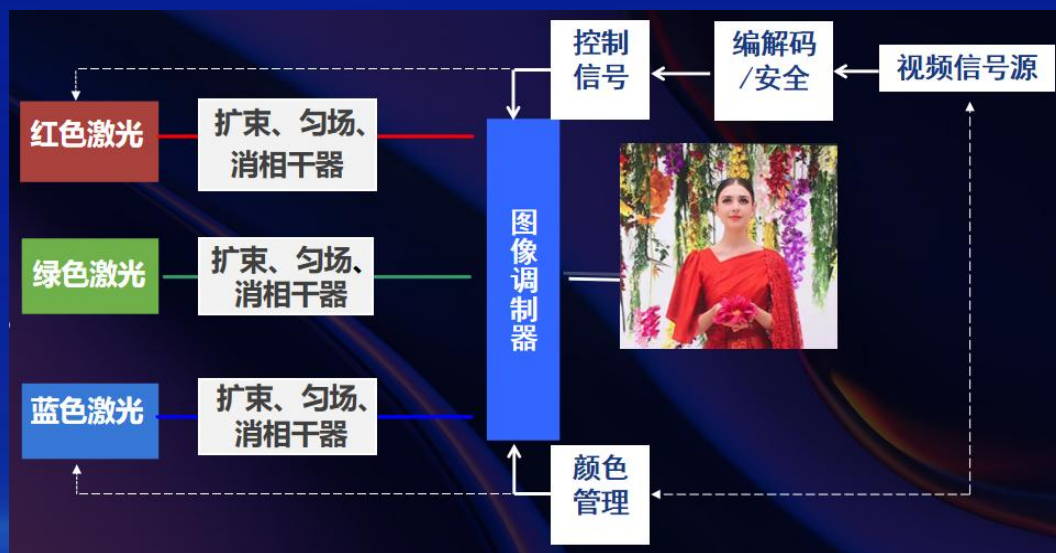
Laser Display

以全色激光作为显示光源，真正实现了几何、色彩双超高清

激光全色显示技术简介

采用激光作为显示光源的一种新型显示技术

在亮度、色彩、清晰度、分辨率、屏幕等方面均发生了革命性的变化，它独特的光谱分离特征和卓越的色彩表现力、超高亮度的输出等优点为全保真图像的再现提供了可靠的技术途径。

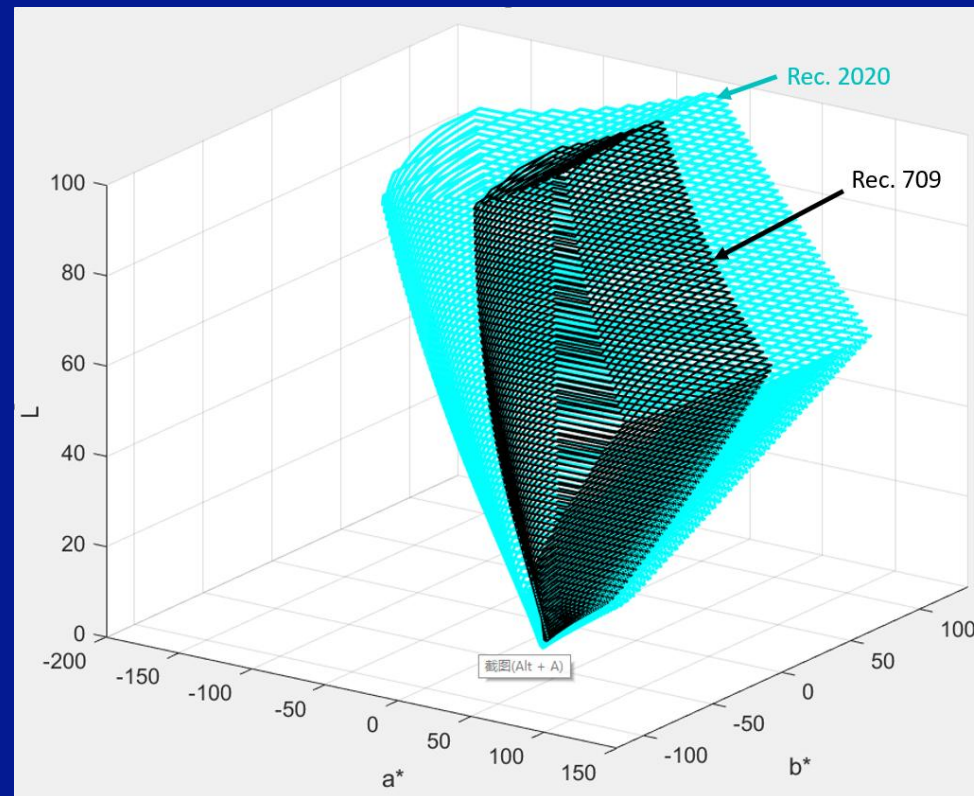
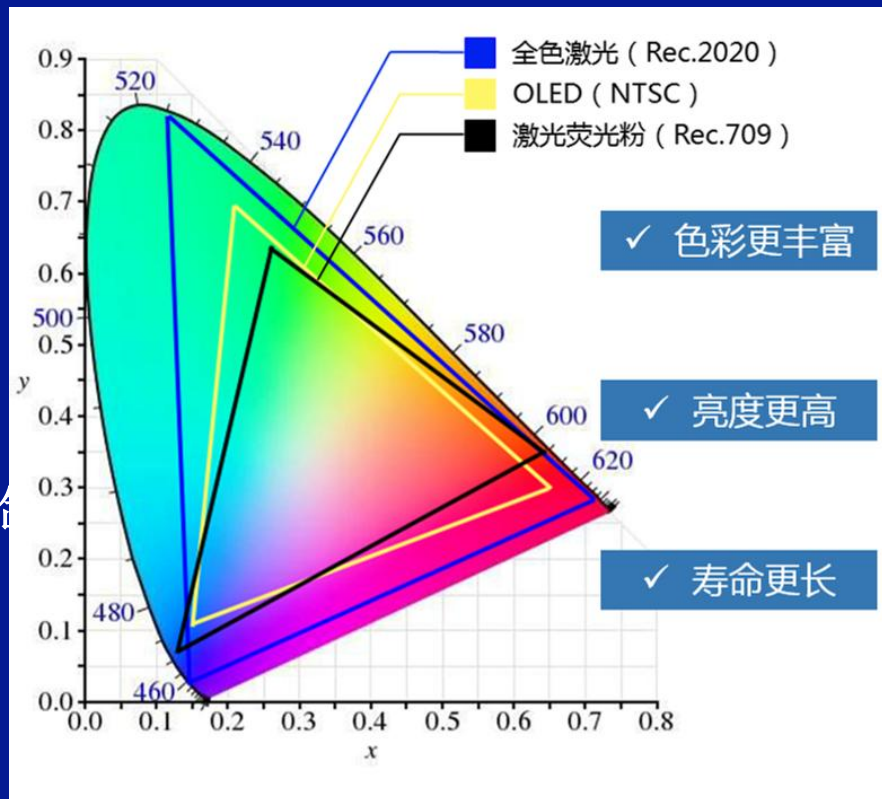


激光显示系统原理



三基色激光显示结构

激光全色显示技术优势



普通液晶显示：30%，激光荧光粉：40%，OLED：44%，**激光全色显示：超过90%**

目前唯一能达到超高清显示色域标准Rec. 2020的显示技术 (110%~130%)

激光全色显示优势

✓色彩更丰富

覆盖BT. 2020超高清色域

✓健康护眼

1. 亮度可控，避免光污染
2. 窄波长，规避有害蓝光
3. 漫反射，光线柔和
4. 大尺寸，缓解视疲劳

✓寿命更长

≥2万小时

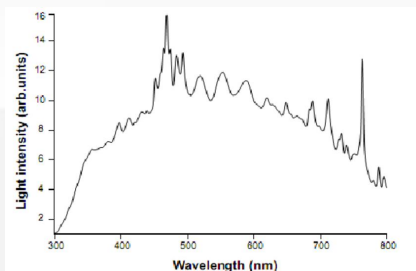
✓功耗更低

同等亮度LED的1/6

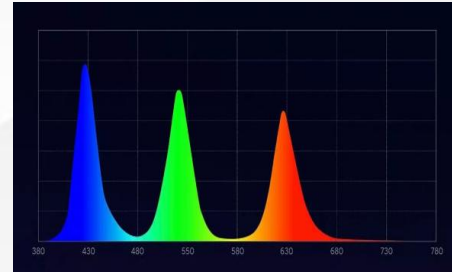
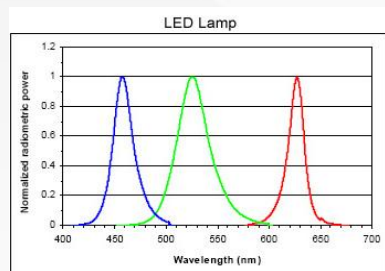
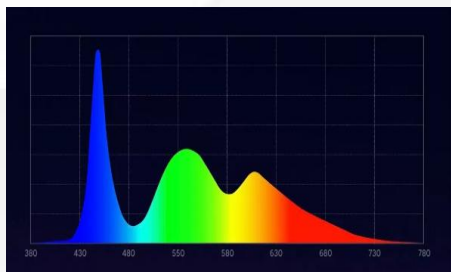
✓万物皆“屏”

窄谱视觉感知差异

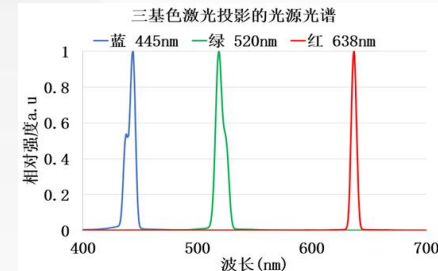
连续宽谱



逐级窄化



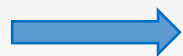
分立窄谱



与宽光谱相比，窄光谱下人眼的颜色响应具有明显差异

1. 获得极致纯度色彩感知，甚至感知到超出自然界色域的特殊色彩，如 2025年发现的“olo”；
2. 对比敏感度提升，色觉辨别能力增加；
3. 同色异谱失配现象加剧；
4. 不同饱和度色彩感知亮度差异放大；
5. 个体观察者与标准观察者的差异导致“千人千色”，难以统一。

单纯的色域拓展



实现色彩还原与人眼视觉感知特性的精准匹配

拓展色域--探索色域边界

基础色彩管理--实现精准还原

高阶色彩管理--结合人眼视觉感知特性



扩展色域的技术路径之一：

减小谱宽

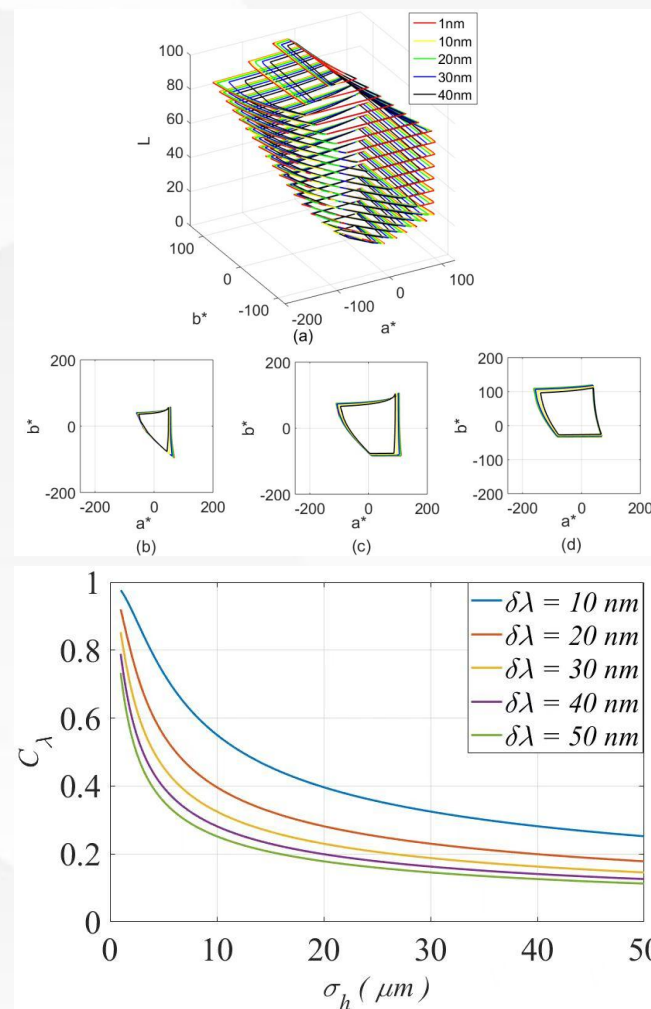
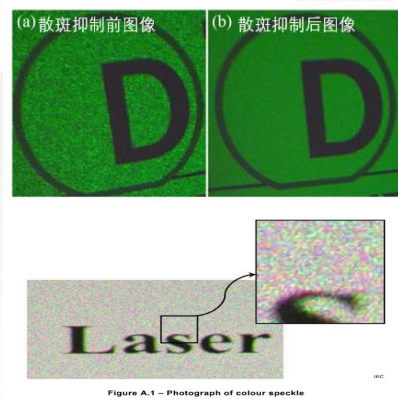
LED >40 nm

OLED $\approx$ 30 nm

Mirco-LED $\approx$ 20 nm

量子点 10~15 nm

激光 5~10 nm



博士论文《新型显示中的立体色域理论》
王贯 2019 中国科学技术大学

扩展色域的技术路径之二：

调节色温

传统显示 三基色 6500 K

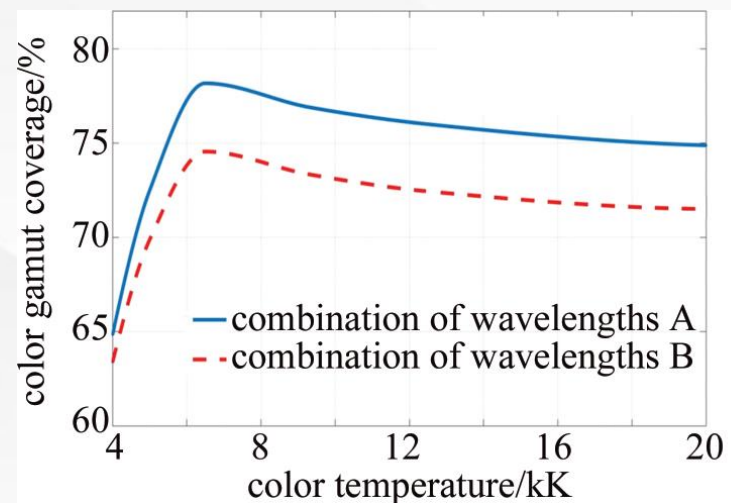
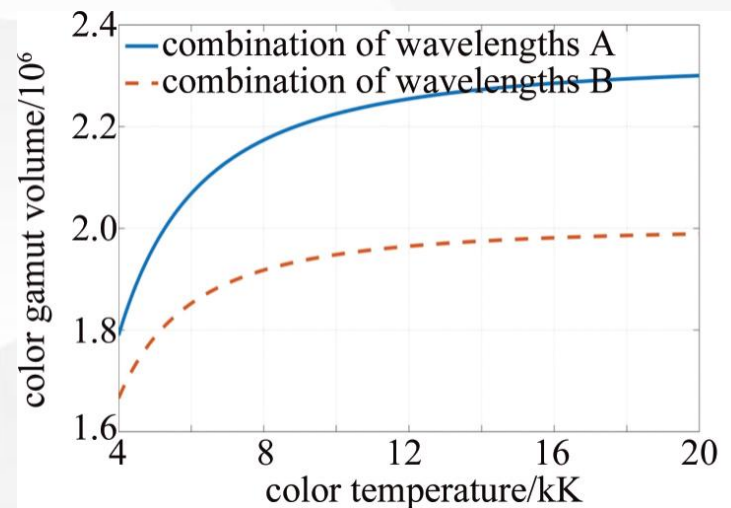


传统显示 三基色 10000 K

激光显示 三基色 6500 K



激光显示 三基色 10000 K



Selection of white balance point in three primaries laser display

王聪 2021 中国科学技术大学

扩展色域的技术路径之三：

多基色体制

传统显示 三基色 33%

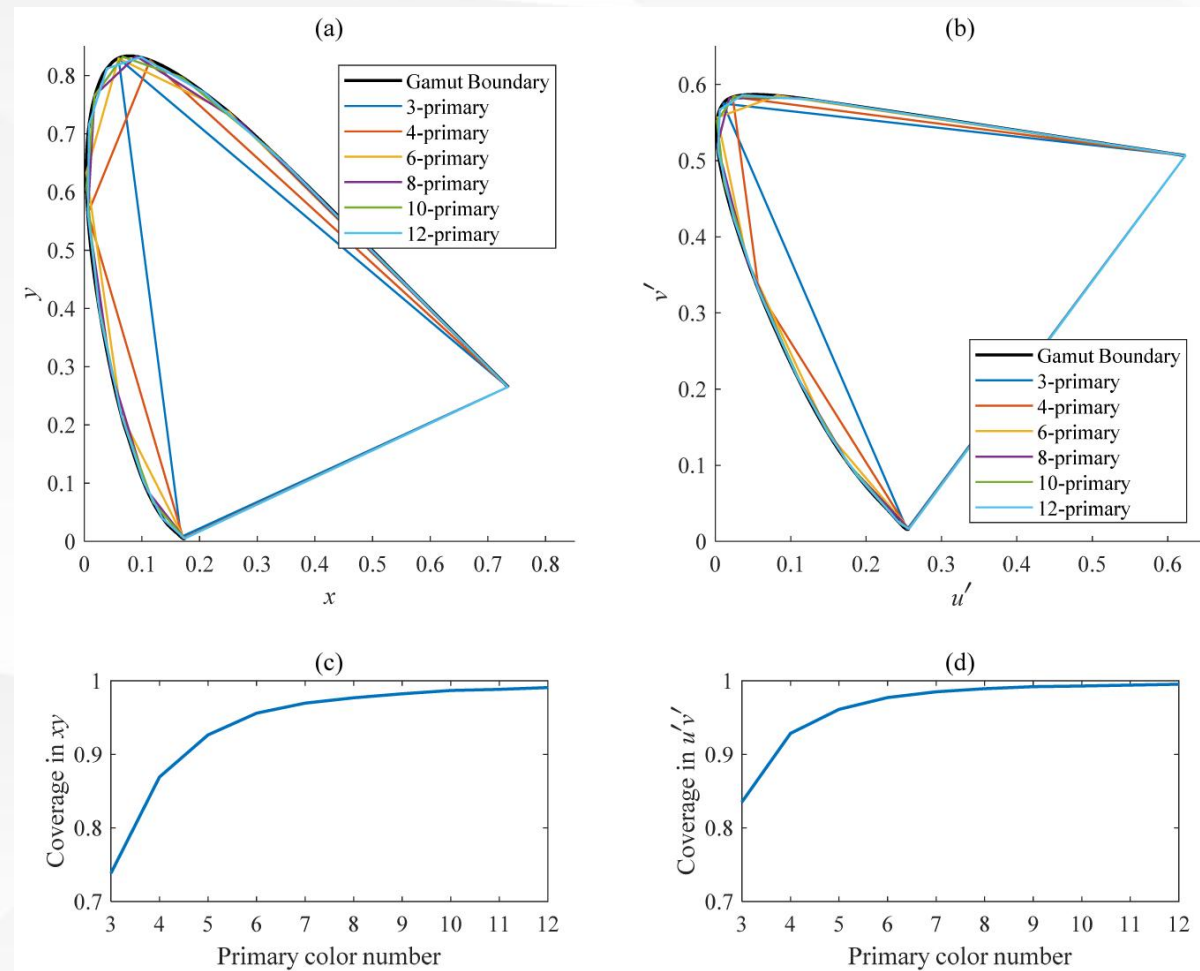


传统显示 多基色 <50%

激光显示 三基色 70%



激光显示 多基色 96.6%

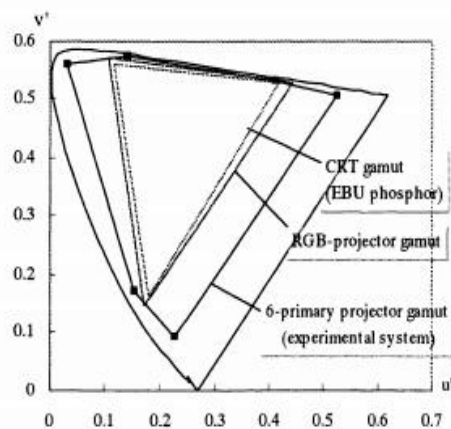


Studies on different primaries for a nearly ultimate gamut in a laser display

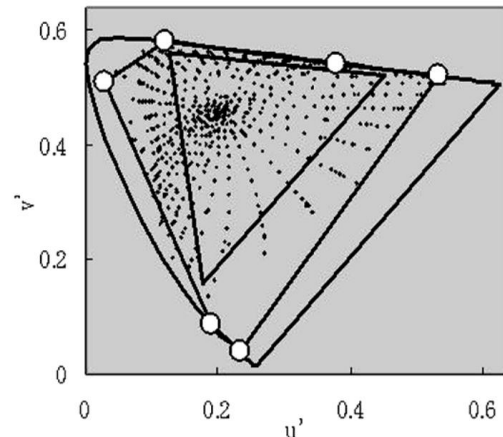
宋洪亚 刘旭* 2018 浙江大学

1990s, 日本专利提出 MPDs 的概念, RGB+W

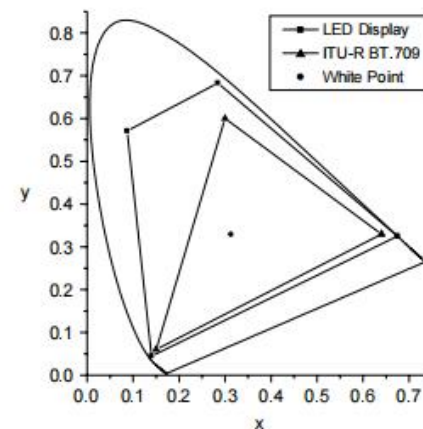
2001~2007, 日、美, 基于LCD和LED的多基色色域研究
基数小, 提升不明显



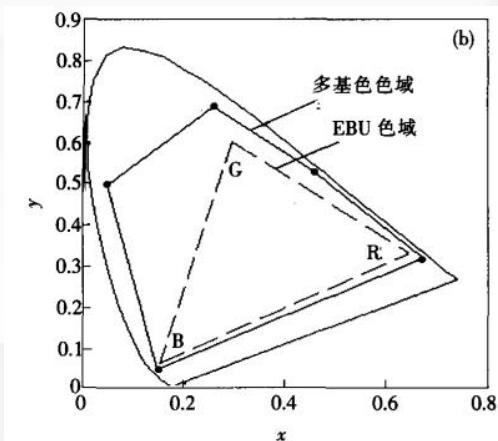
Takeyuki Ajito, 2000, Expanded color gamut reproduced by six-primary projection display



Hideto Motomura, 2003, Color conversion for a multi-primary display using linear interpolation on equi-luminance plane method (LIQUID)

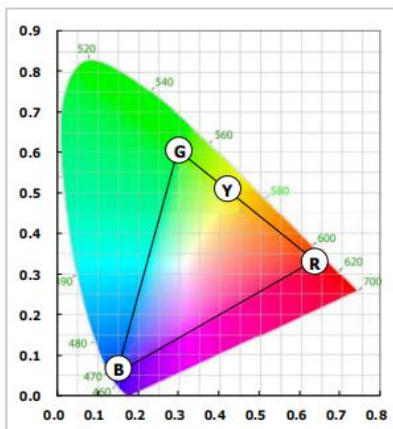


Senfar Wen*, 2005, Design of relative primary luminances for four-primary displays

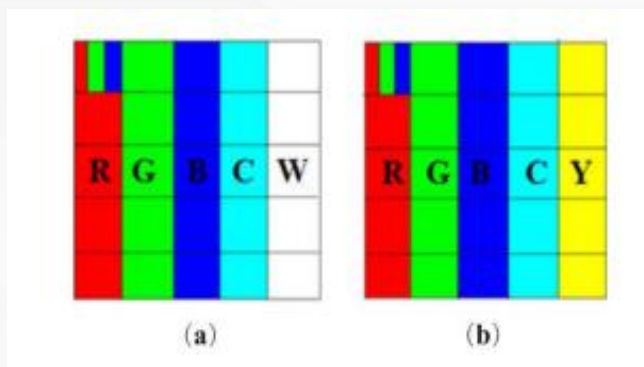


邹静燕, 2007, 基于单片LCoS四基色时序彩色显示的模拟

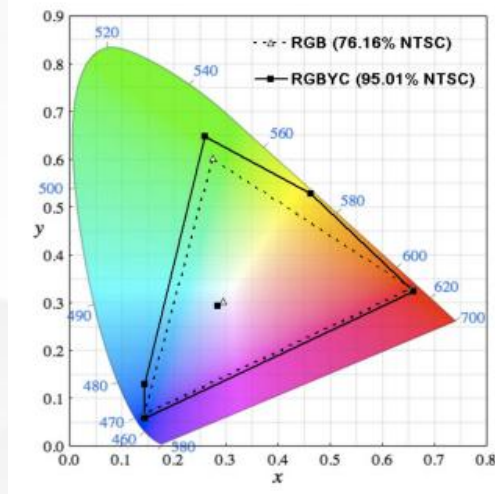
2007~2015, 日、韩, 多基色显示在光效和分辨率的提升效果显著, 三星、夏普、索尼分别推出了PenTile (RGBW)、Quad-Pixel (RGBCY) 以及White Magic (RGBW)



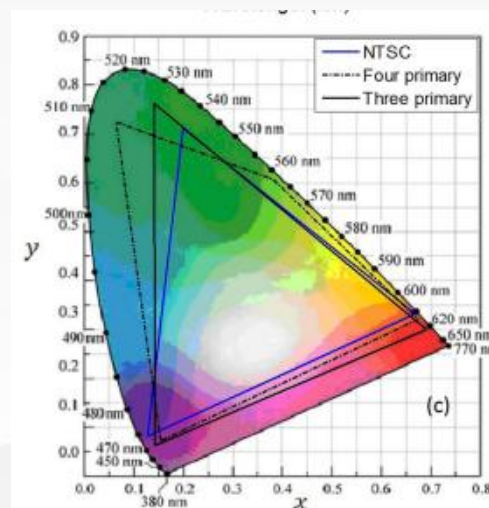
Sang Hoon Han, LG Display Co. Ltd, Korea, Luminance Enhancement by Four-Primary-Color (RGBCY), 2010
对色域无贡献, 但提升了18%的亮度效率



Yen-Chin Wang, 2013, Comparative Evaluation of the Imaging Performance of Multi-Primary Color LCDs With RGBCW and RGBCY Pixel Units by Simulation
RGBCY提升色域, RGBCW提升亮度

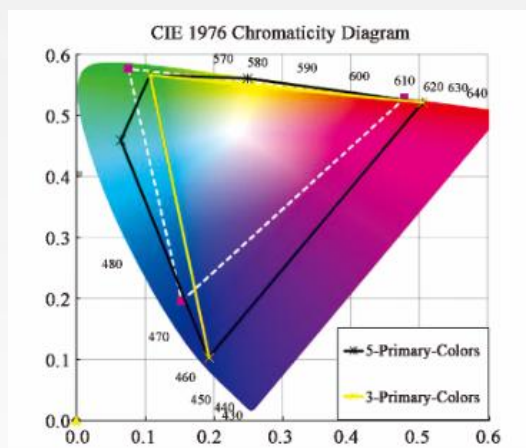


Hui-Chuan Cheng and Shin-Tson Wu*, 2010, Five-Primary-Color LCDs
色域提升25%, 亮度增加20%

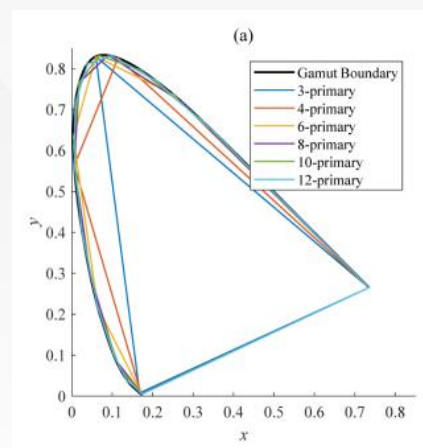


Zhenyue Luo and Shin-Tson Wu*, 2014. A Spatiotemporal Four-Primary Color LCD With Quantum Dots
色域小幅提升, 光效提高一倍

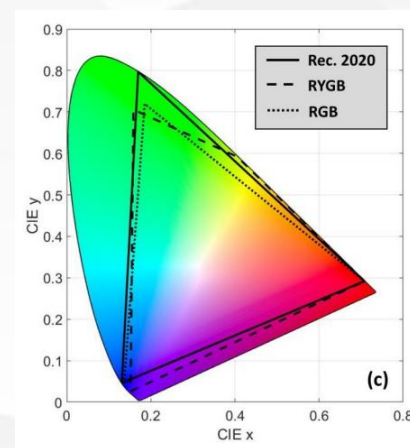
2016~今，Rec. 2020标准对高端显示设备的高要求，以及激光显示、量子点显示等技术的兴起，推动了多基色显示技术研究的又一次热潮。



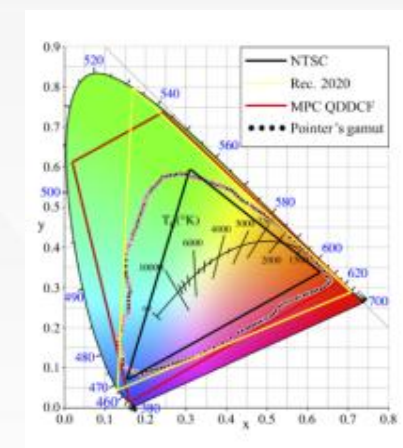
孟宪芹*, 2019, 京东方, 光子晶体滤色实现五基色显示 143% NTSC



宋洪亚、刘旭*, 2018, 浙江大学, Studies on different primaries for a nearly_x0002_ultimate gamut in a laser display

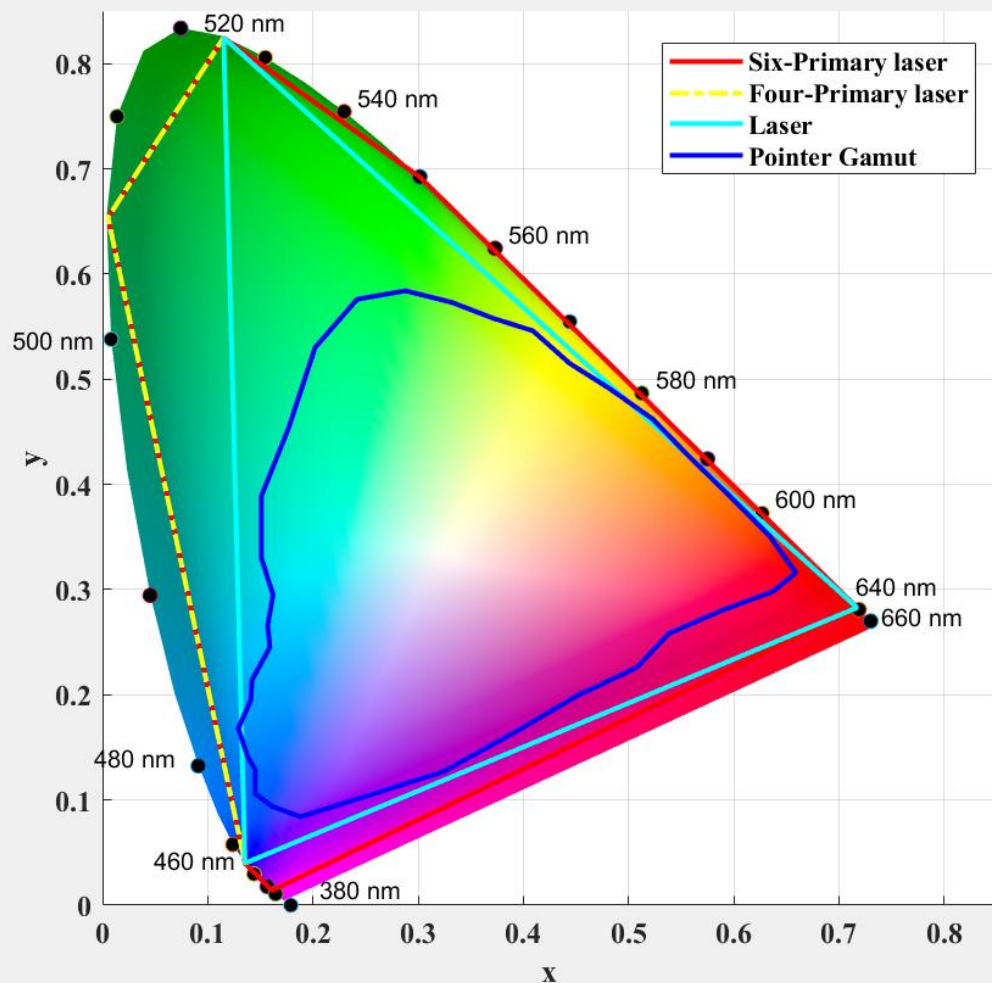


Ziqian He and Shin-Tson Wu*, 2020, Design and Simulation of Low Circadian Action Micro-LED Displays with Four Primary Colors



SHUYAN LIN and ENGUAO CHEN*, 2019, Multi-primary-color quantum-dot down-converting films for display applications

多基色显示+激光显示=多基色激光显示



三基色: $GC_{D65} \approx 70\%$ $GC_{Pointer} \approx 100\%$

多基色: $GC_{D65} \approx 90\%+$ $GC_{Pointer} = 100\%$

(1) $Pointer < ISORCG < \text{实际物体色色域}$

(2) 艺术作品富含高饱和度青色、黄色

(3) 人眼偏好高饱和度颜色

第

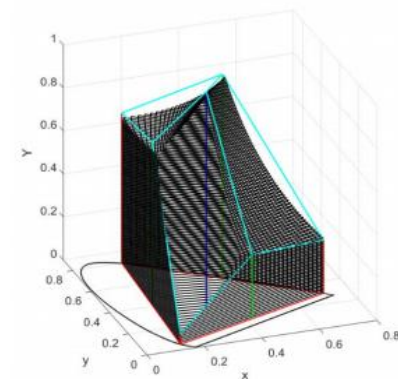
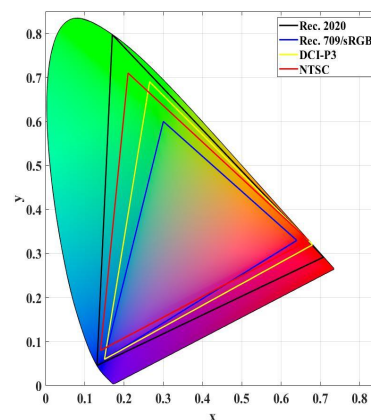
2

部分

多基色激光显示立体色域特性研究

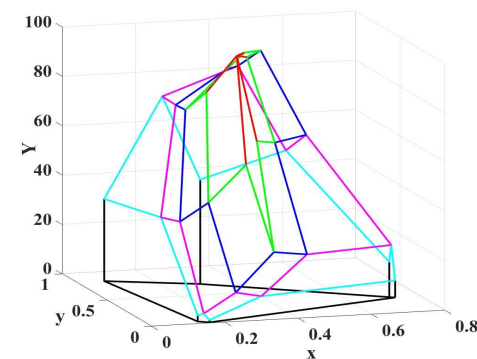
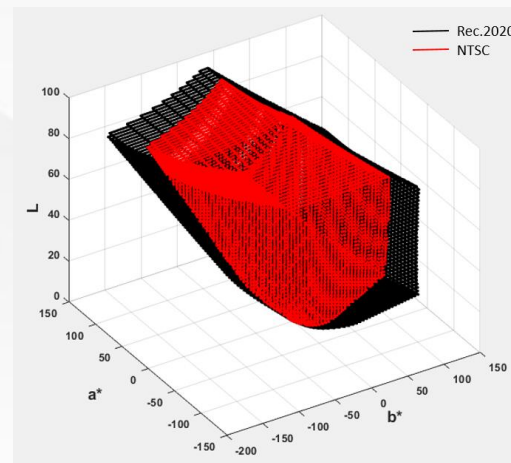
常用色域标准的色坐标和参考白点

	R	G	B	参考白点
NTSC	(0.67, 0.33)	(0.21, 0.71)	(0.14, 0.08)	(0.3127, 0.3290)
Rec. 709/sRGB	(0.64, 0.33)	(0.30, 0.60)	(0.15, 0.06)	(0.3127, 0.3290)
DCI-P3	(0.68, 0.32)	(0.265, 0.69)	(0.15, 0.06)	(0.3140, 0.3510)
Rec. 2020	(0.708, 0.292)	(0.170, 0.797)	(0.131, 0.046)	(0.3127, 0.3290)



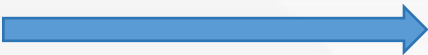
常用显示标准的平面色域面积和立体色域体积

6,500 K	色域面积	NTSC (%)	立体色域体积	NTSC (%)
NTSC	0.1548	100%	1276000	100%
DCI-P3	0.152	98.19%	1157900	90.74%
Rec.709	0.1121	72.38%	822520	64.46%
Rec.2020	0.2119	136.89%	1855400	145.41%
三基色激光	0.2383	153.94%	2043900	160.18%
D ₆₅ 光源	0.3342	215.89%	2287200	179.25%

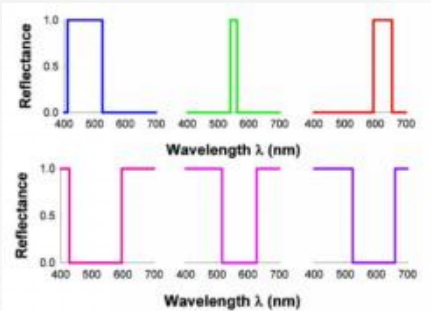


多基色激光显示理论发展

三基色麦克亚当理论



麦克亚当理论的多基色拓展



$Y < Y_{Blue}$	$I_r = 0, I_g = 0,$ $I_b = Y/Y_{Blue}$
$Y = Y_{Blue}$	$I_r = 0, I_g = 0, I_b = 1$
$Y_{Blue} < Y < Y_{Blue} + Y_{Green}$	$I_r = 0,$ $I_g = (Y - Y_{Blue})/Y_{Green},$ $I_b = 1$
$Y = Y_{Blue} + Y_{Green}$	$I_r = 0, I_g = 1, I_b = 1$
$Y > Y_{Blue} + Y_{Green}$	$I_r = (Y - Y_{Blue} - Y_{Green})/Y_{Red},$ $I_g = 1, I_b = 1$

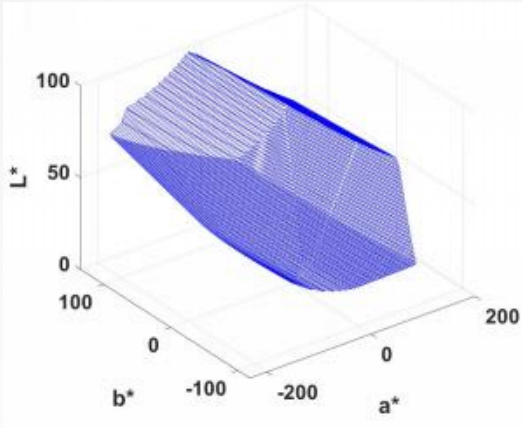
$Y < Y_1$	$I_1 = \frac{Y}{Y_1}, I_m(m = 2,3...N) = 0$
$Y = Y_1$	$I_1 = 1, I_m(m = 2,3...N) = 0$
$Y_1 < Y < Y_1 + Y_2$	$I_1 = 1, I_2 = \frac{Y - Y_1}{Y_2},$ $I_m(m = 3,4...N) = 0$
$Y = Y_1 + Y_2$	$I_1 = 1, I_2 = 1,$ $I_m(m = 3,4...N) = 0$
$Y_1 + Y_2 < Y < Y_1 + Y_2 + Y_3$	$I_1 = 1, I_2 = 1, I_3 = \frac{Y - Y_1 - Y_2}{Y_3}$ $I_m(m = 3,4...N) = 0$
.....	
$Y = Y_1 + Y_2 + Y_3 + ...Y_N$	$I_m(m = 1,2...N) = 1$

多基色亮度通解算法

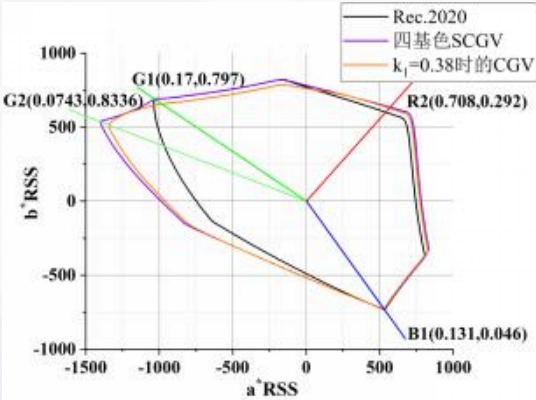


多基色系统色域极限探究

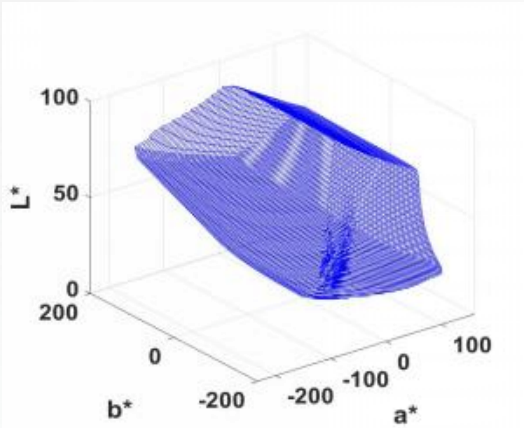
$$\begin{aligned}
 Y_1 &= Y_1^{(0)} - \sum_{j=1}^{N-3} k_j Y_1^{(j)} > 0 \\
 Y_2 &= Y_2^{(0)} - \sum_{j=1}^{N-3} k_j Y_2^{(j)} > 0 \\
 Y_3 &= Y_3^{(0)} - \sum_{j=1}^{N-3} k_j Y_3^{(j)} > 0 \\
 Y_{j+3} &= k_j Y'_{j+3} > 0 \\
 Y_{j+4} &= k_{j+1} Y'_{j+4} > 0 \\
 &\dots\dots
 \end{aligned}$$



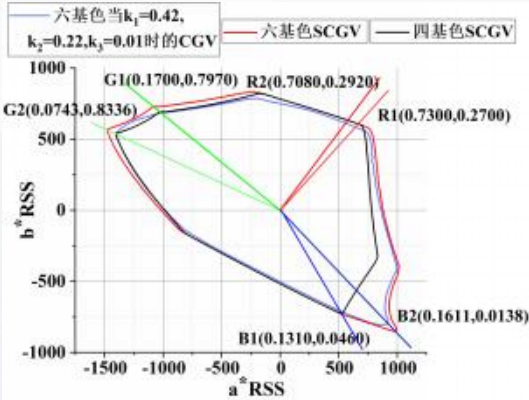
四基色系统的SCGV，值为2196600，为最大CGV的104%



色域对比

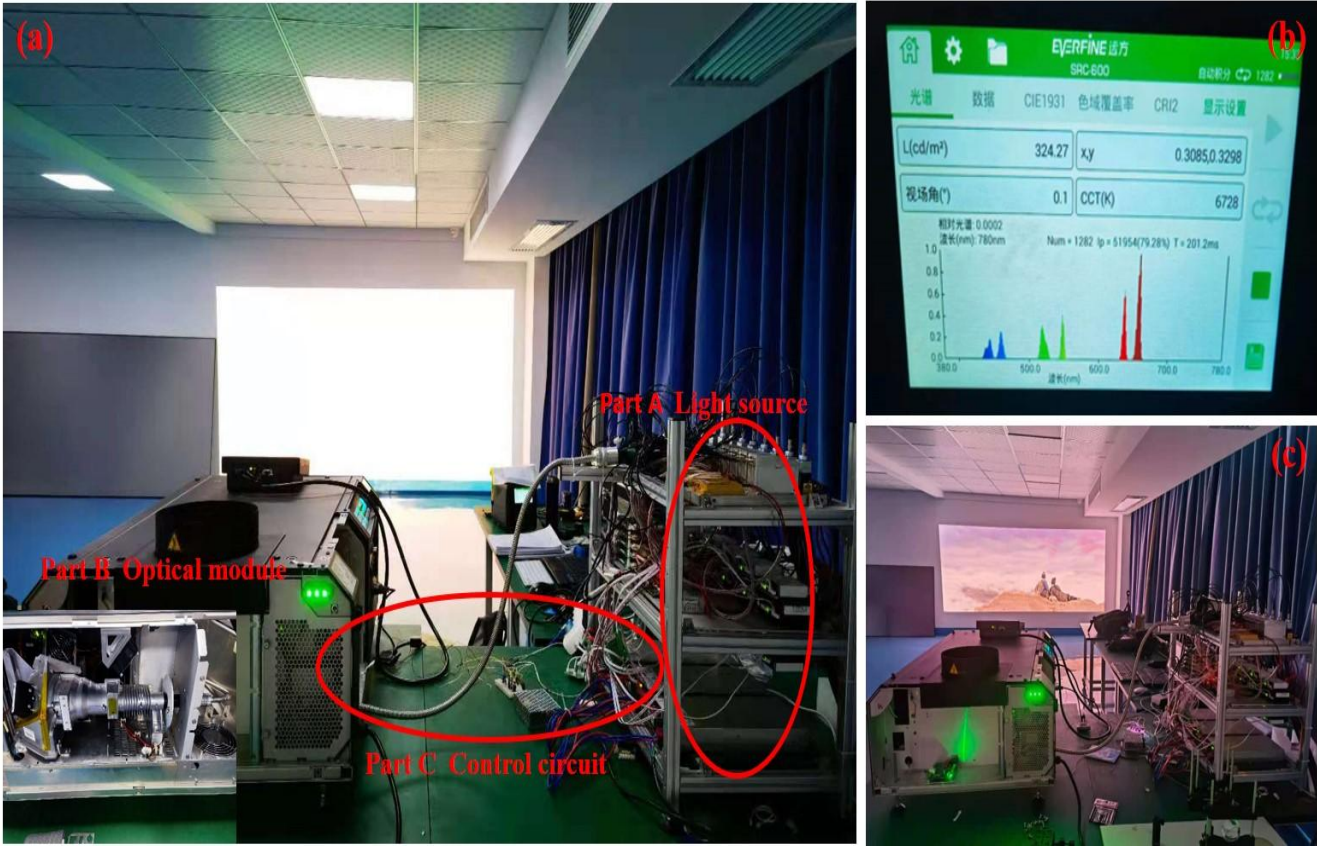


六基色的SCGV，值为2342800，为最大CGV的107%

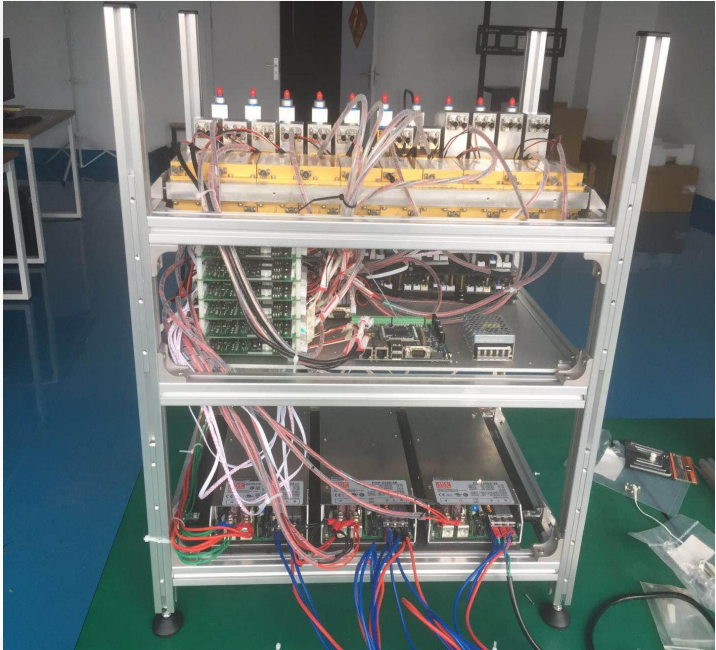


色域对比

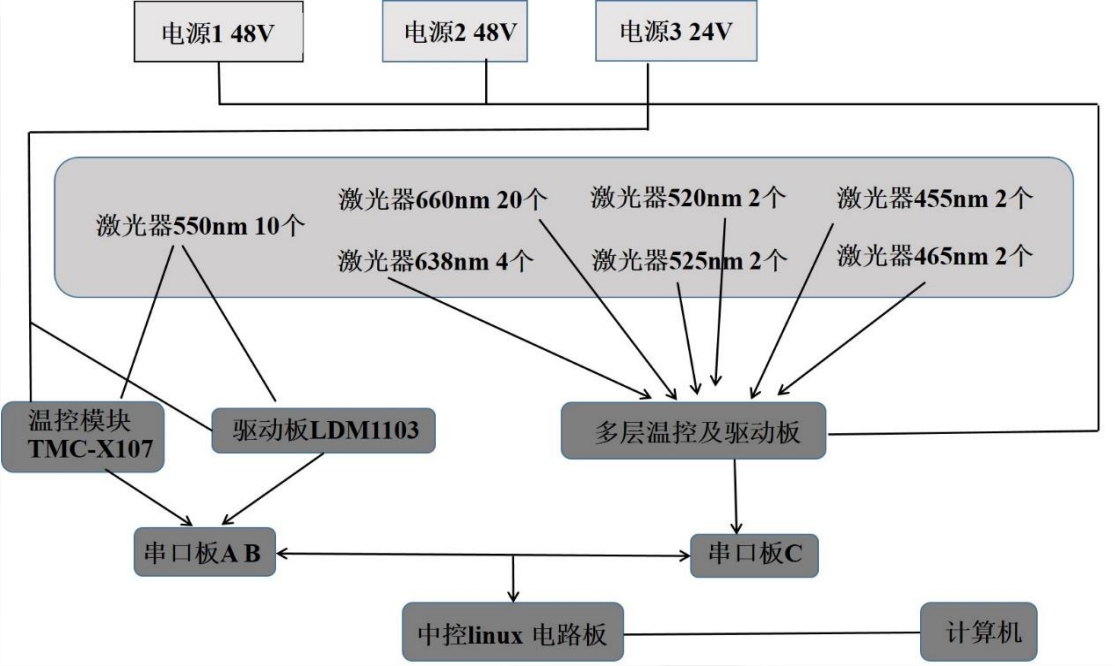
新型多基色激光显示研究平台



兼容2D和3D的六基色激光投影显示系统



Liquan Zhu, Guan Wang, Yuhua Yang, Binghui Yao, Chun Gu, and Lixin Xu*. Six-primary-laser projection display system: demonstration and stereo color gamut measurement[J]. Optics Express, 2021, 29(26): 43885-43898.

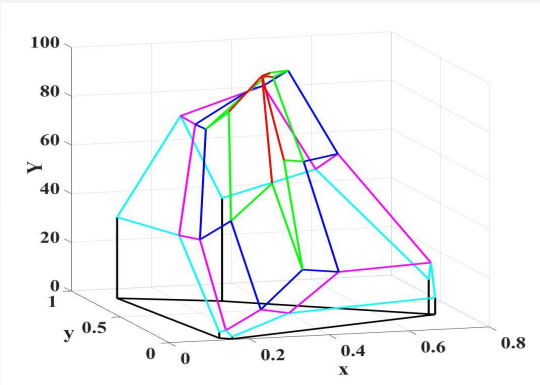


波长 (nm)	光功率	色坐标x	色坐标y	中心波长	谱宽	纯度
445	32.8W	01636	0.0161	443.9 nm	6.2 nm	99.1%
465	26.6 W	0.1450	0.0351	460.9 nm	6.4 nm	98.7%
520	27.0 W	0.0789	0.7975	518.2 nm	5.7 nm	93.4%
550	20.4 W	0.2917	0.6960	548.5 nm	5.0 nm	98.4%
638	35.2 W	0.7066	0.2875	634.3 nm	5.3 nm	98.3%
660	97.3 W	0.7160	0.2729	657.4 nm	5.6 nm	96.7%

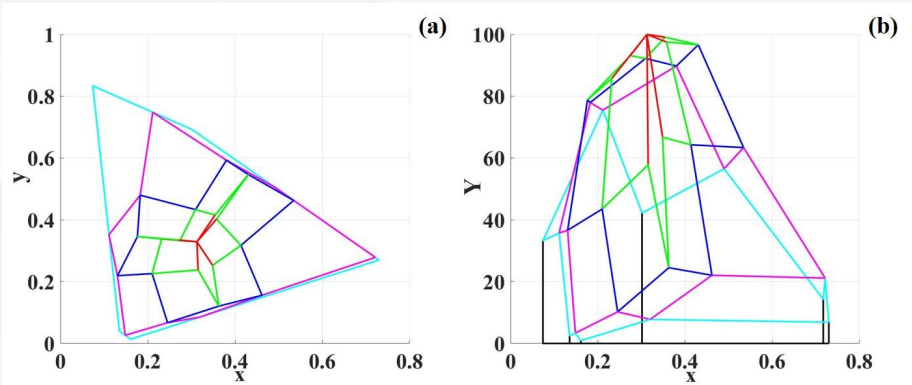
(1) 多基色显示系统立体色域快速测量方法

No primary (0P)	Single primary (1P)	Two primaries (2P)	Three primaries (3P)
$O_1(0,0,0,0,0)$	$A_1(1,0,0,0,0)$	$B_1(1,1,0,0,0)$	$C_1(1,1,1,0,0,0)$
$O_2(0,0,0,0,0,0)$	$A_2(0,1,0,0,0,0)$	$B_2(0,1,1,0,0,0)$	$C_2(0,1,1,1,0,0)$
$O_3(0,0,0,0,0,0,0)$	$A_3(0,0,1,0,0,0,0)$	$B_3(0,0,1,1,0,0)$	$C_3(0,0,1,1,1,0)$
$O_4(0,0,0,0,0,0,0,0)$	$A_4(0,0,0,1,0,0,0,0)$	$B_4(0,0,0,1,1,0)$	$C_4(0,0,0,1,1,1)$
$O_5(0,0,0,0,0,0,0,0,0)$	$A_5(0,0,0,0,1,0,0,0,0)$	$B_5(0,0,0,0,1,1)$	$C_5(1,0,0,0,1,1)$
$O_6(0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)$	$A_6(0,0,0,0,0,1,0,0,0,0)$	$B_6(1,0,0,0,0,1)$	$C_6(1,1,0,0,0,1)$
$O_7(0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)$	$A_7(1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)$	$B_7(1,1,0,0,0,0,0)$	$C_7(1,1,1,0,0,0)$

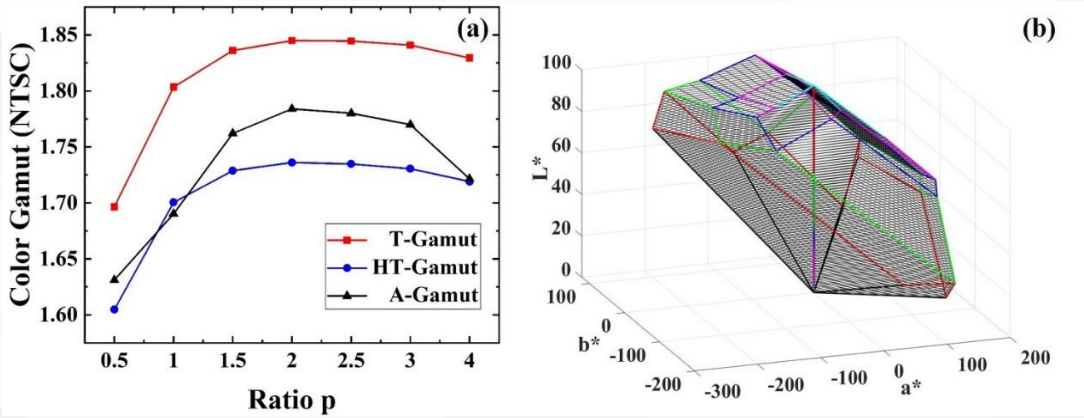
Three primary (3P)	Four primary (4P)	Five primaries (5P)	Six primaries (6P)
$C_1(1,1,1,0,0,0)$	$D_1(1,1,1,1,0,0)$	$E_1(1,1,1,1,1,0)$	$I(1,1,1,1,1,1)$
$C_2(0,1,1,1,0,0)$	$D_2(0,1,1,1,1,0)$	$E_2(0,1,1,1,1,1)$	
$C_3(0,0,1,1,1,0)$	$D_3(0,0,1,1,1,1)$	$E_3(1,0,1,1,1,1)$	
$C_4(0,0,0,1,1,1)$	$D_4(1,0,0,1,1,1)$	$E_4(1,1,0,1,1,1)$	
$C_5(1,0,0,0,1,1)$	$D_5(1,1,0,0,1,1)$	$E_5(1,1,1,0,1,1)$	
$C_6(1,1,0,0,0,1)$	$D_6(1,1,1,0,0,1)$	$E_6(1,1,1,1,0,1)$	
$C_7(1,1,1,0,0,0)$	$D_7(1,1,1,1,0,0)$	$E_7(1,1,1,1,1,0)$	



CIE-xyY空间中快速测量方法对应的色立体边界



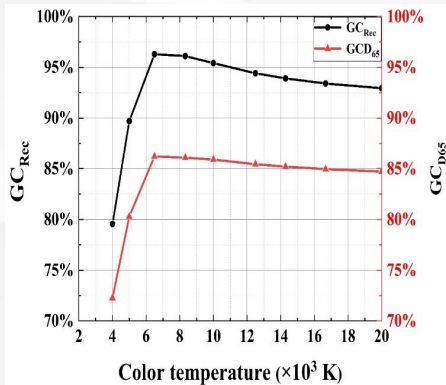
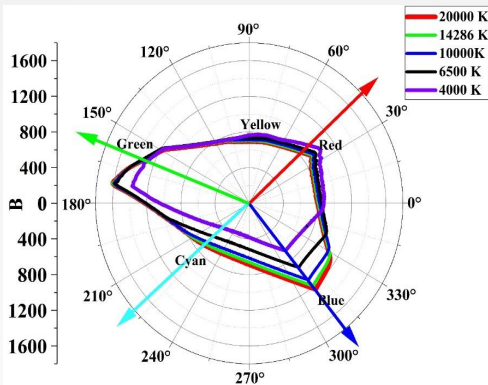
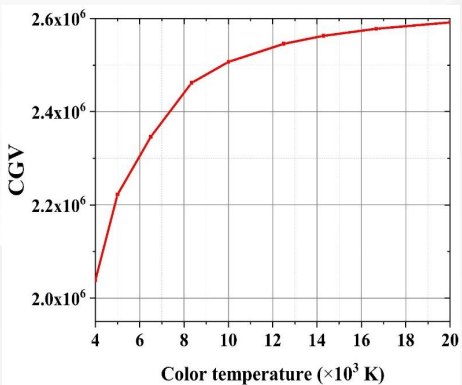
(a) x-y视图 (b) x-Y视图。



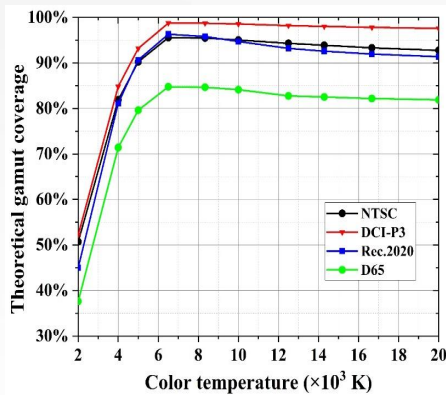
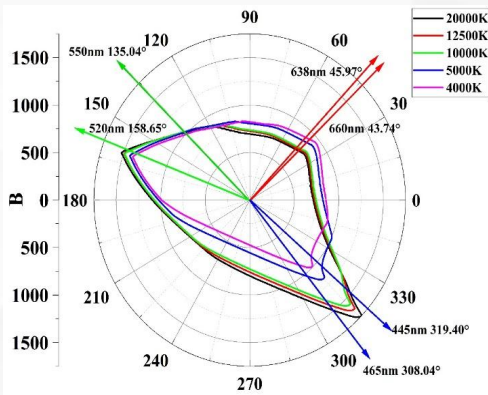
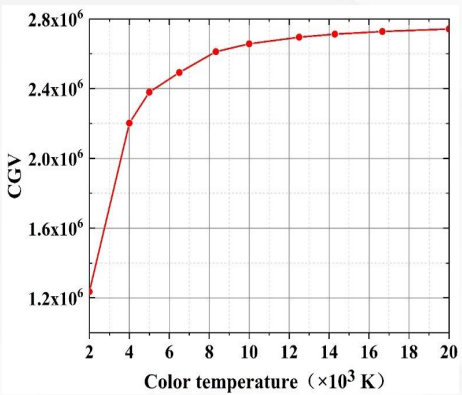
最大立体色域体积：**184.49% NTSC**，与D65标准照明体色域的覆盖约**90%**

(2) 多基色激光显示系统中高色温对色域的影响

四基色:



六基色:

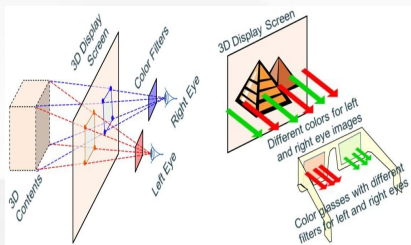


结论1: 多基色激光显示系统的立体色域体积随色温的增加而增大, 即显色能力不断增强; 立体色域覆盖率在6,500 K达到峰值, 后随色温的增加而缓慢递减。

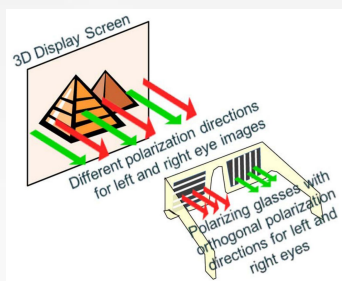
结论2: 六基色 20000 K时达到了**200.30% NTSC**, 达到了《中国制造2025重点技术路线图》的要求。

Liquan Zhu*, Binghui Yao*, Linxiao,Deng,Yuhua Yang, Guan Wang, Chun Gu, LiXin Xu. Impact of color temperature on the color gamut volume of a six-primary-laser display system[J].Optik,Volume 264, August 2022, 169414

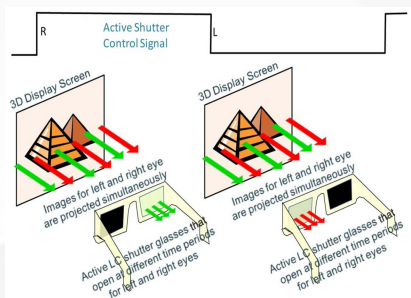
(3) 六基色在立体显示中的应用：高光效和全视场低串扰



色差式3D原理



偏振3D原理



快门式3D原理

被动式，无需额外的信号转换过程

光谱分离的优点

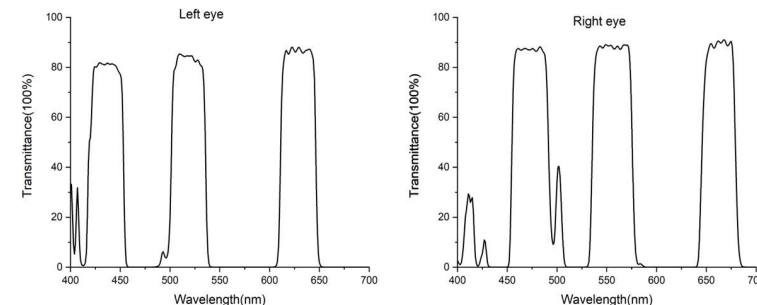
时间延迟几乎为0

光效和串扰取决于镀膜技术

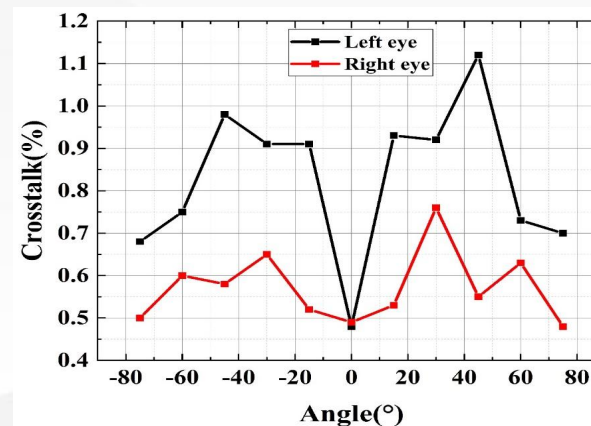
缺点：传统光谱分离3D技术通常采用窄带滤波器分离图像，色彩饱和度低

激光的优点：高饱和度

Liquan Zhu, Guan Wang, Yuhua Yang, Binghui Yao, Chun Gu, Lixin Xu. Six-primary-laser projection display system compatible with 3D and 2D display[C]//Semiconductor Lasers and Applications XI. SPIE, 2021, 11891: 127-132.



光效：42.3% > 偏振系统 30%-34% > 快门系统 8%

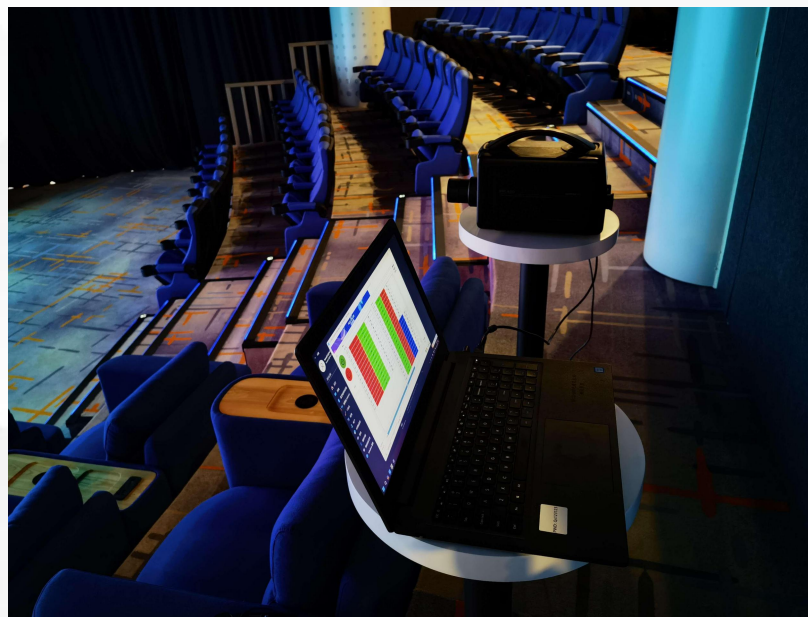
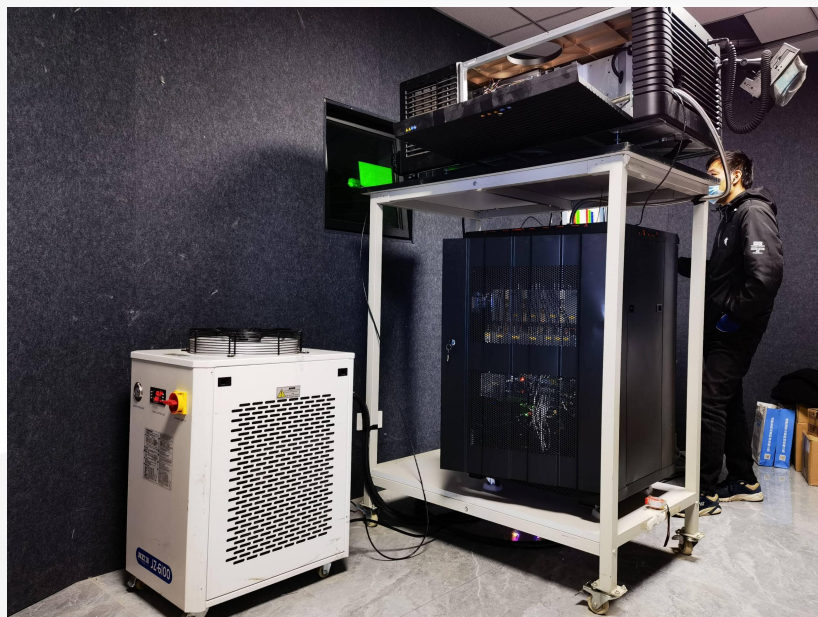


串扰：

影院偏振式3D：3% 左右。

六基色 3D：全视场低串扰，<1%

骆岗中央公园 光趣园 6P-3D影厅



第

3

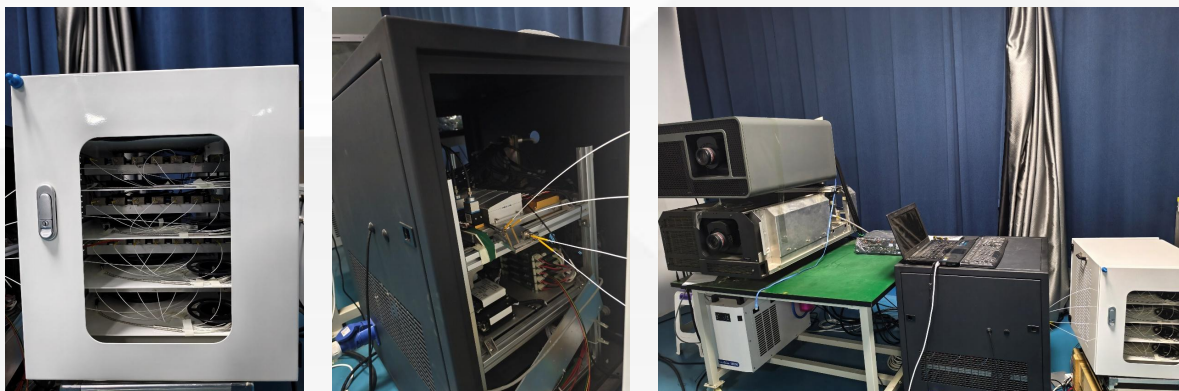
部分

RGBC系统及青色增强算法

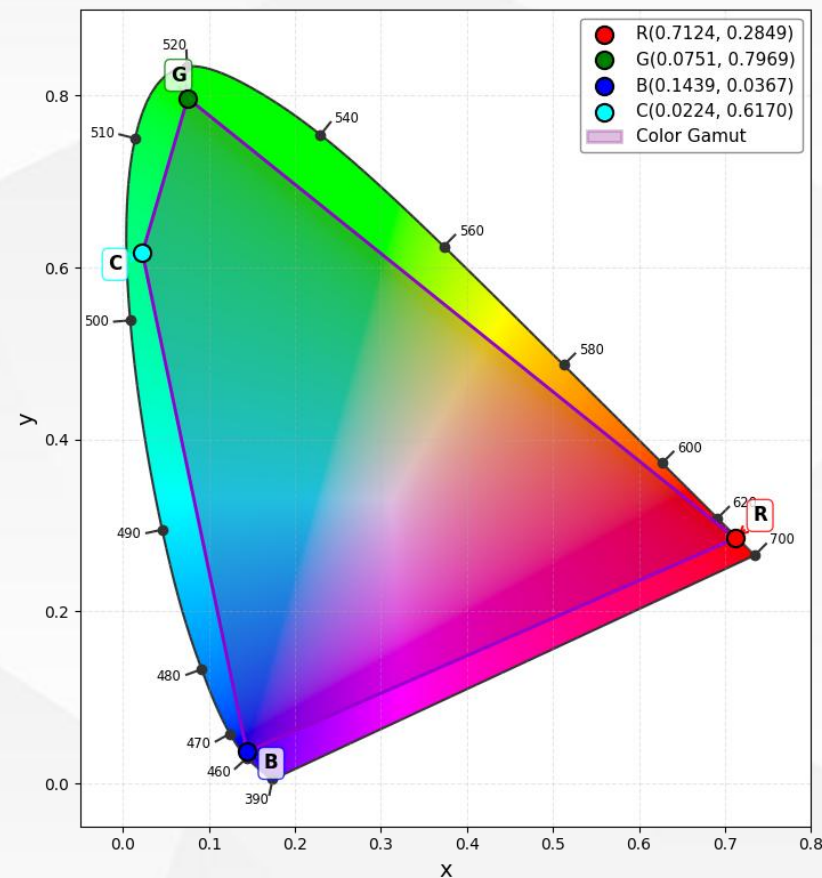
双机叠加



背投



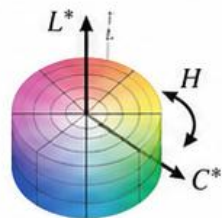
Primary	Peak wavelength	Line-width
R	640.0nm	5.5nm
G	518.0nm	7.4nm
C	504.0nm	5.7nm
B	460.0nm	5.2nm



[3]Yunfei Xiao, Yabao Zhuang, Jiacheng Xiang, Fengtian Gao, Xuwei Zhao, Chun Gu, Lixin Xu, **Liquan Zhu***, Perceptually-driven cyan enhancement using a content-adaptive algorithm for RGBC four-primary laser displays[J] **Optics & Laser Technology**, Volume 203, Part B, 2026,115650

① 颜色空间转换

$RGB \rightarrow LCH$



将输入图像从RGB空间转化为CIE LCH均匀颜色空间。

② 青色特征计算

$$k_C = k \cdot g(L^*) \cdot C^* \cdot f(H)$$

- k : 归一化系数
- $g(L^*)$: 亮度特征函数
- C^* : 彩度
- $f(H)$: 色调特征函数

根据 L^* 、 C^* 、 H 计算青度特征 k_C ，表征像素的“青色增强程度”

③ 生成青色图像

$$C = 255 \cdot k_C^{1/\gamma_C}$$

将青度特征作用于青色基色得到青色分量图像 C

④ 亮度保持的RGB调整

$$k_{RGB} = \frac{Y^p_{RGB} - k_C * Y_C}{Y^p_{RGB}}$$

$$RGB' = k_{RGB} \cdot RGB$$

调整RGB通道亮度，保证增强前后物理亮度不变，得到新的RGB分量图像 RGB'

⑤ 融合输出

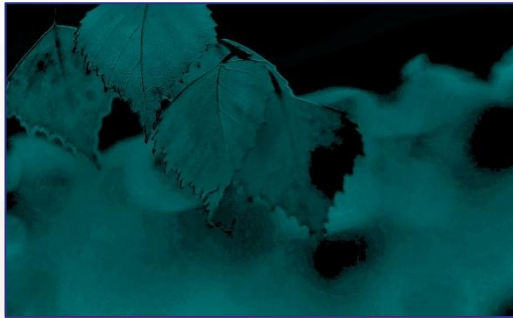
$$RGBC = RGB' + C$$

将调整后的RGB图像和C图像叠加，得到RGBC图像

输入图像RGB



青色图像 C



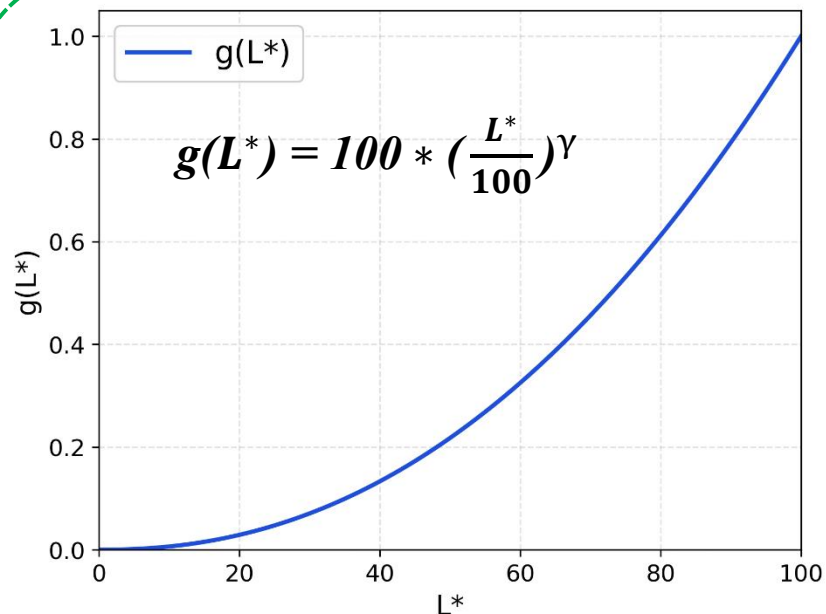
亮度调整的RGB图像 RGB'



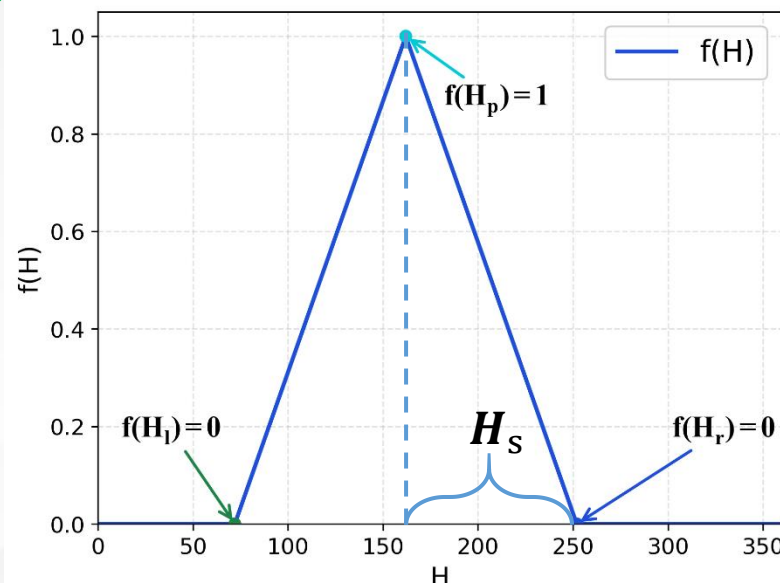
最终输出



青色特征 $k_c = k \cdot g(L^*) \cdot C^* \cdot f(H)$



亮度特征函数



色调特征函数

$$f(H) = \text{rect} \left(\frac{H - H_p}{H_s} \right)$$

- 对称结构：三角函数
- 中心色调： $H_p = 162^\circ$
- 半带宽： H_s
- 响应范围： $[H_l, H_r]$



不同 H_s 取值的增强效果差异显著，通过实验探索

① 心理物理学实验1

图集 1 + 测试者群体 1

H_s 作为变量，选择偏好

② 数据处理

卷积神经网络训练数据

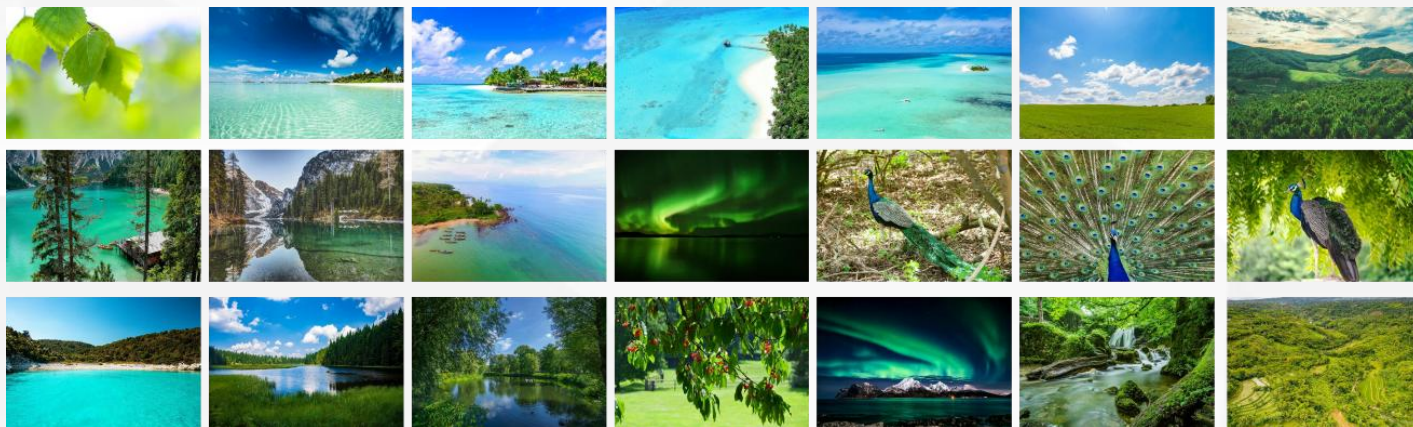
得到 H_s 预测模型

③ 心理物理学实验2

图集 2 + 测试者群体 2

应用 H_s 模型，验证偏好

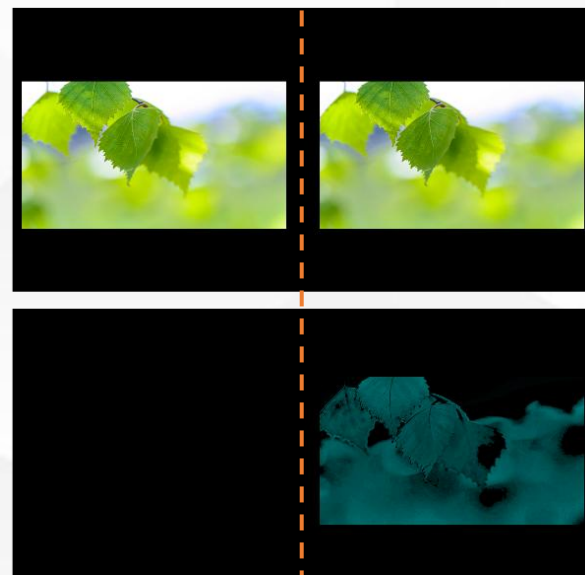
①心理物理学实验1



- 测试图数量: 21
 - 测试者人数: 12
- 测试者均为正常色觉

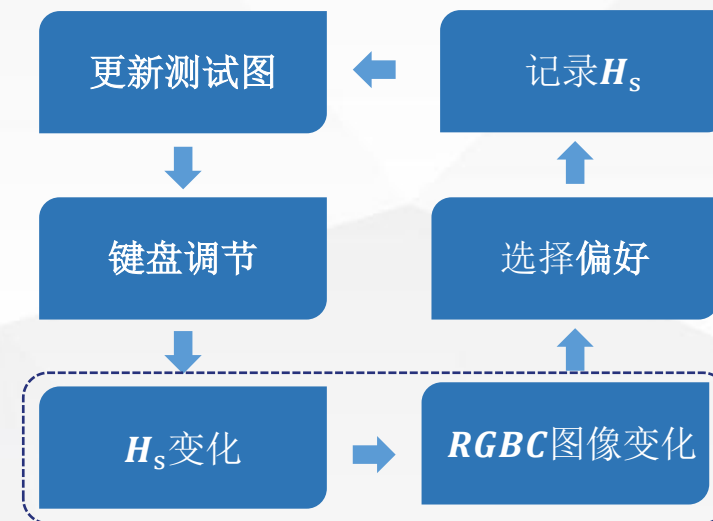


实验环境



RGB

RGBC

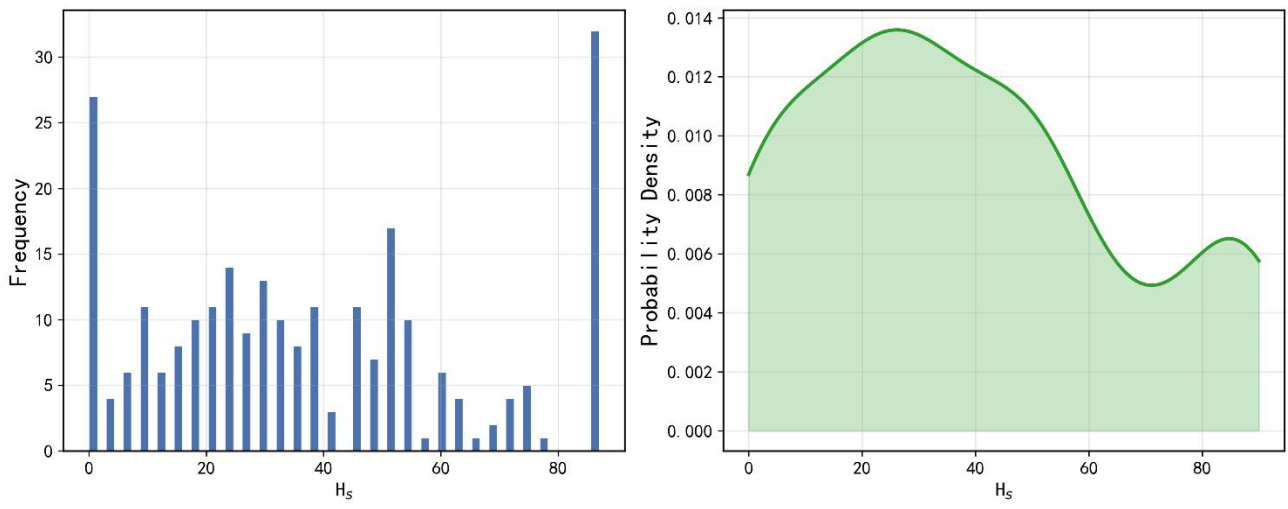


②数据处理 – KDE分析

①通过KDE得到测试图像的最佳 H_s

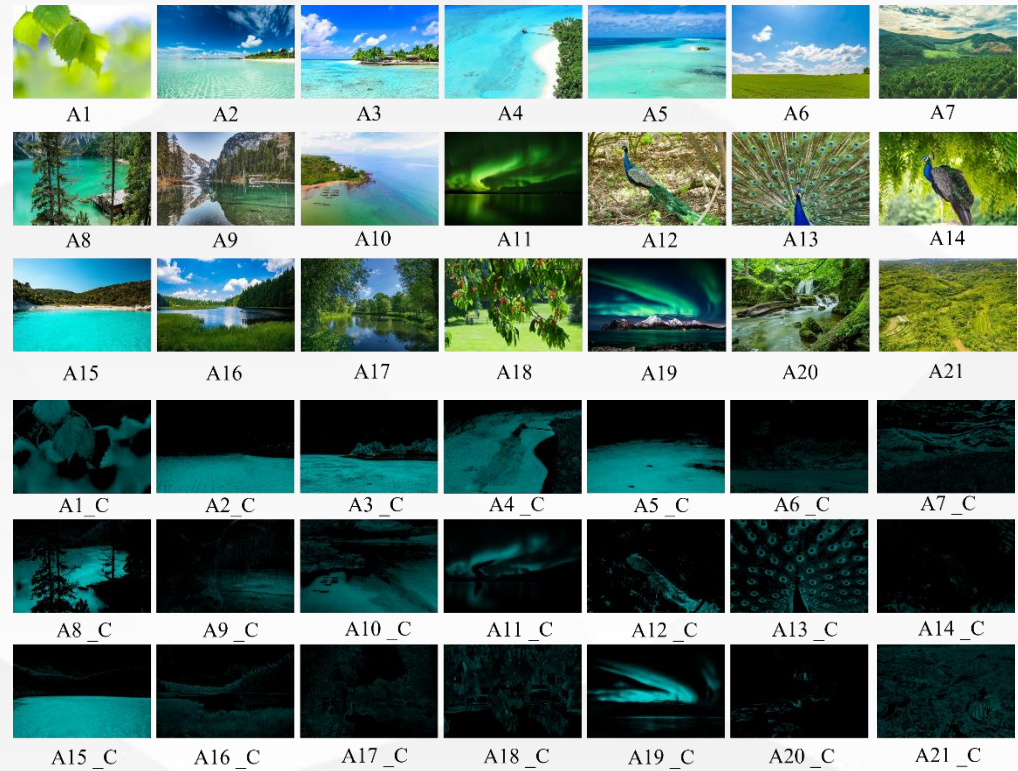
核密度估计（KDE）是一种用平滑曲线来分析离散数据总体分布趋势的方法

$$f_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K_h\left(\frac{x - x_i}{h}\right)$$



数据直方图统计

数据KDE曲线

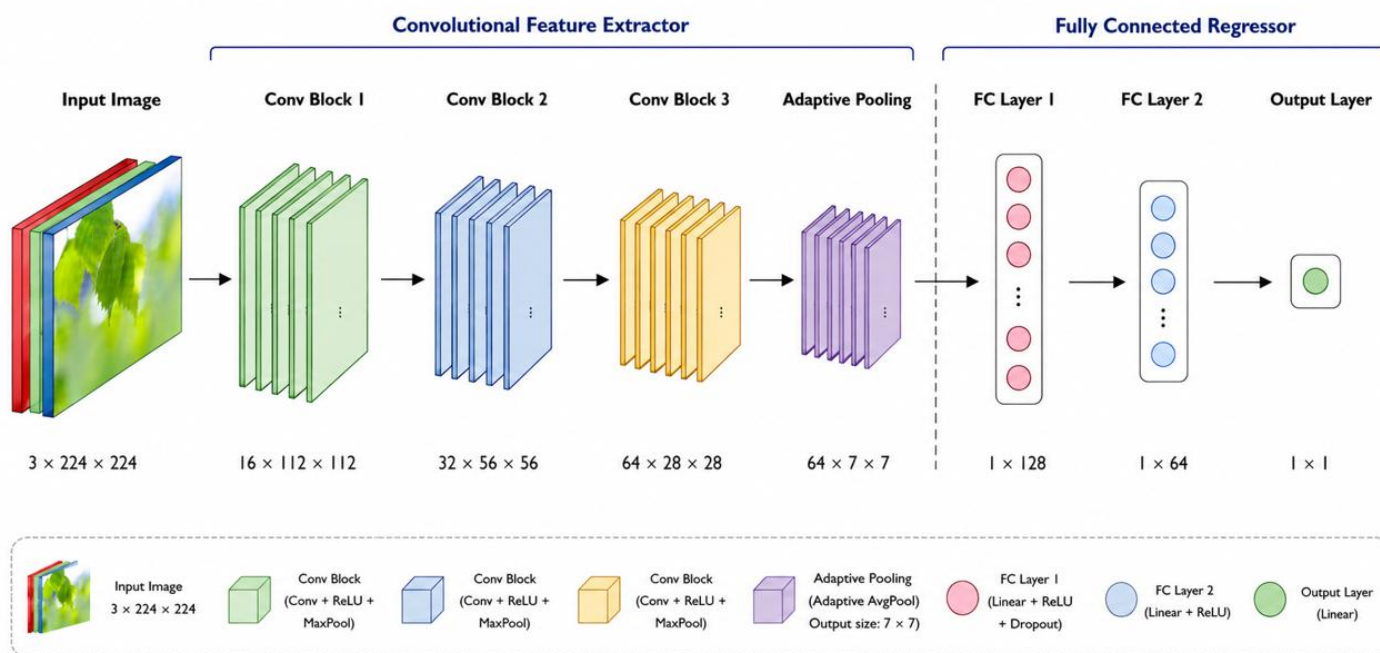


RGB原图及最佳青色增强图

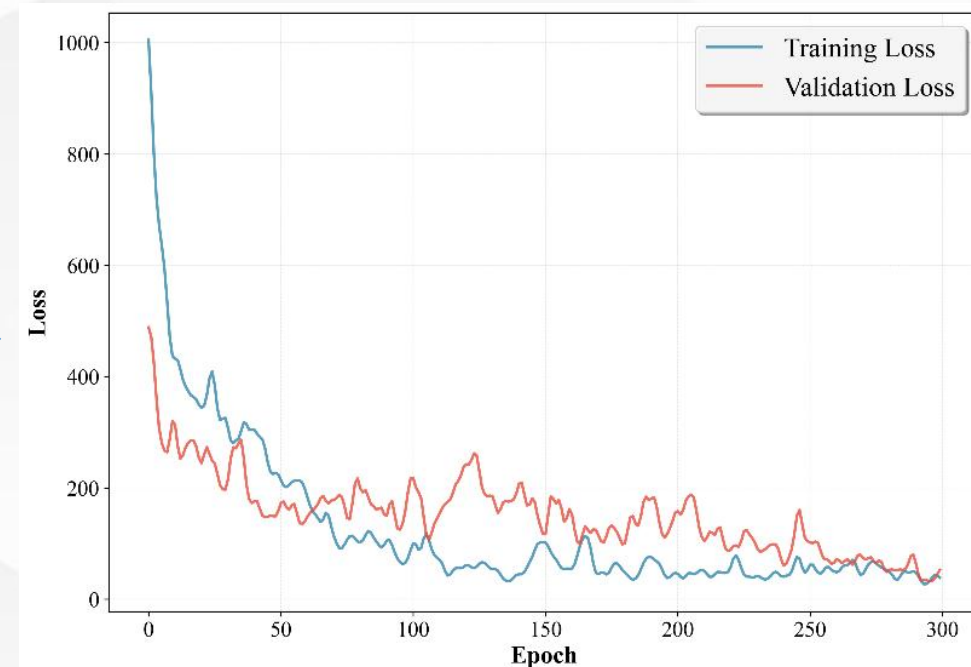
Image	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19	A20	A21
$H_s(^{\circ})$	49.7	20.4	47.0	25.3	19.0	49.7	15.8	12.2	43.9	62.0	26.2	29.8	43.4	18.5	32.1	49.7	28.9	25.8	79.1	3.2	57.9

②数据处理 – CNN训练

②通过CNN训练得到RGB图像- H_s 的预测模型

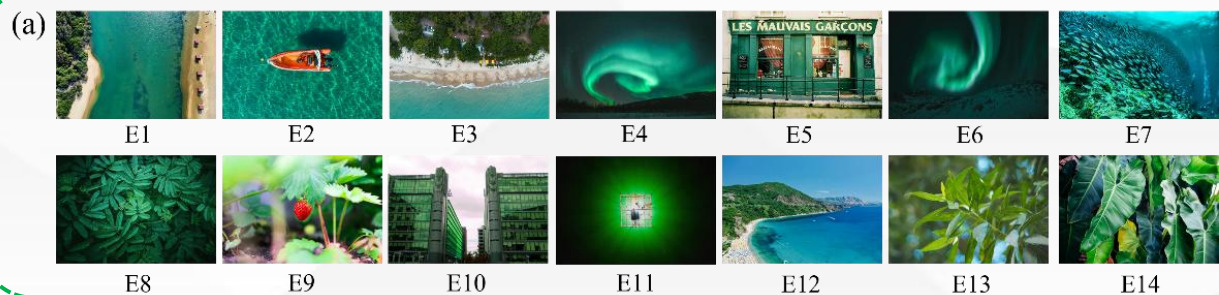


CNN网络结构

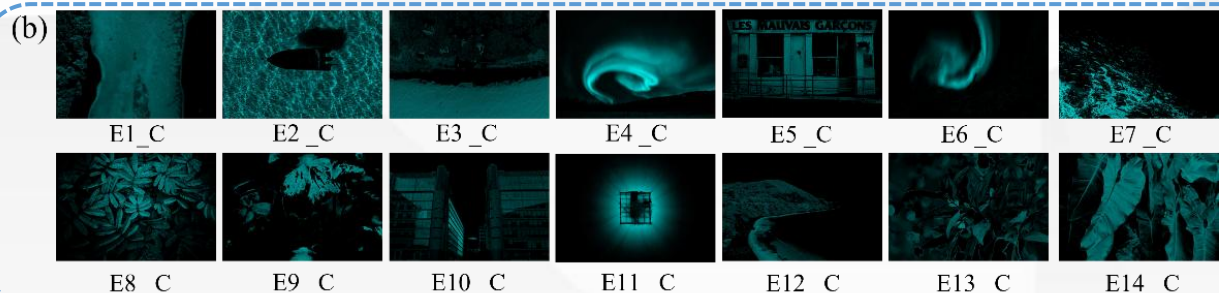


验证集最终均方根误差为3.83;
训练集最终均方根误差为3.14。

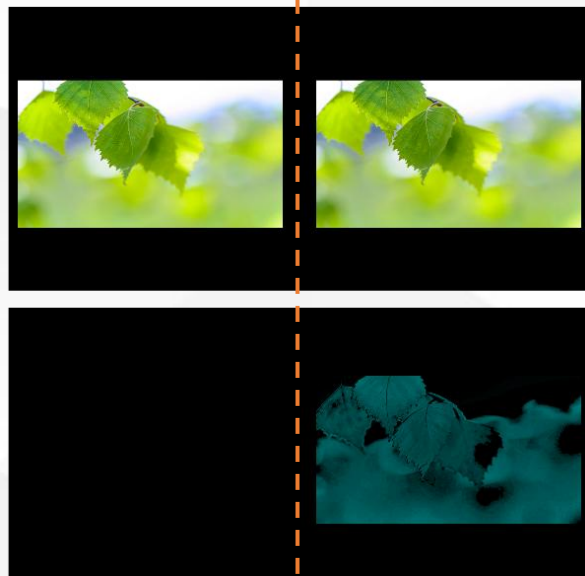
RGB原图



青色特征图



实验环境



RGB

RGBC

③心理物理学实验2

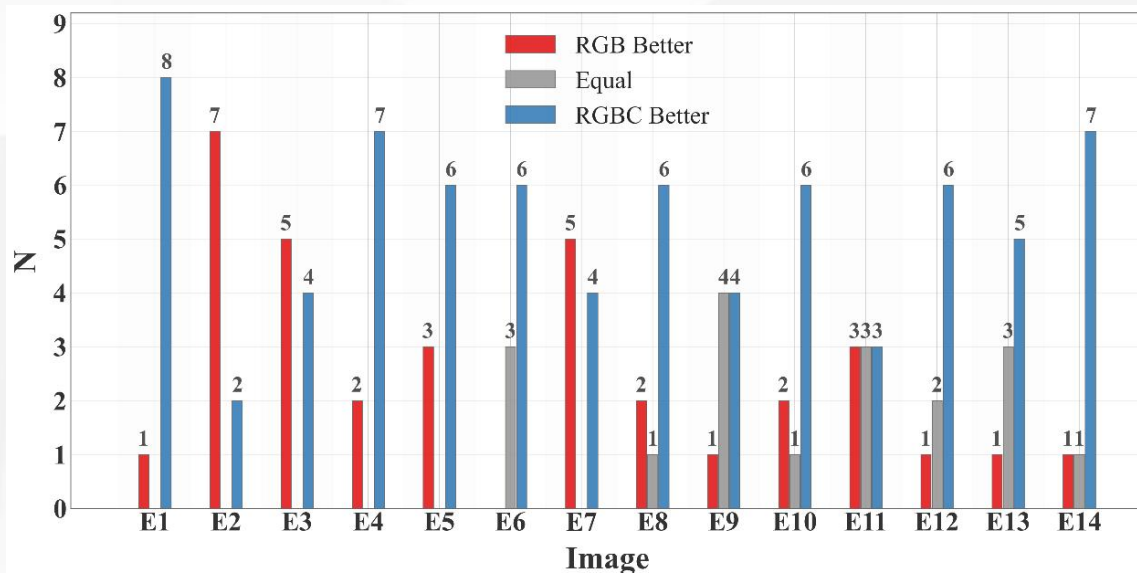
- 测试图数量: 14
 - 测试者人数: 9
- 测试者均为正常色觉

更新测试图

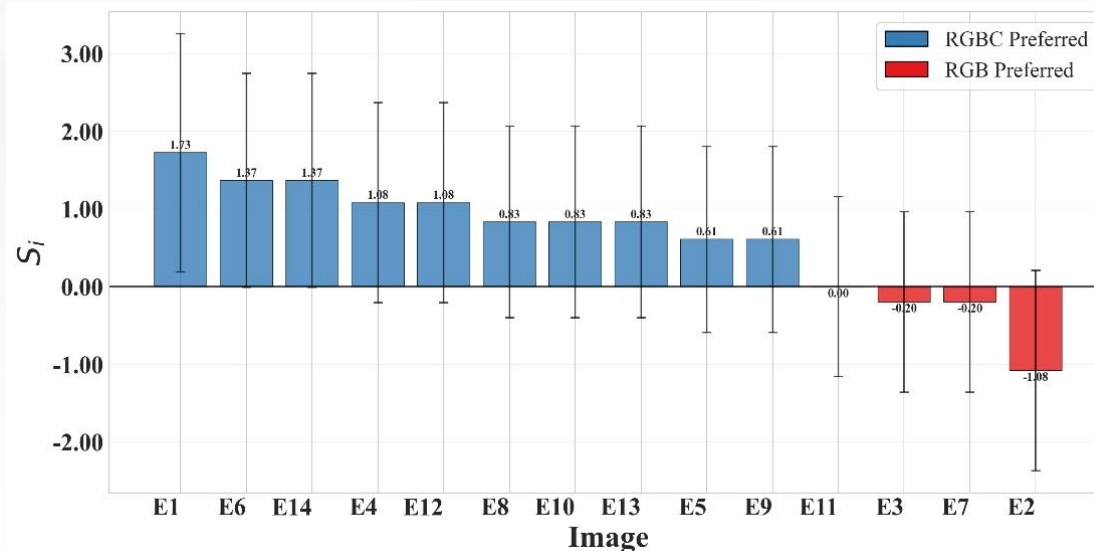
偏好判断

RGB (-1)
Equal (0)
RGBC (1)

④统计检验



Wilcoxon 符号检验 : $p < 0.001$



瑟斯顿偏好指标: RGBC更偏好的图像为10张

青色特征增强算法显著提升了RGBC图像的偏好

第 4

部分

多基色显示中的同色异谱研究

Fengtian Gao, Yuantong Chen, Jiacheng Xiang, Yunfei Xiao, Xuwei Zhao, Chonghe Yang, Shengjie Xu, Chun Gu, Lixin Xu, **Liquan Zhu***, Multi-Primary displays alleviate observer metamerism in laser displays by enhancing spectral degrees of freedom[J]. **Optics and laser technology**. Volume 202, April 2026, 115324

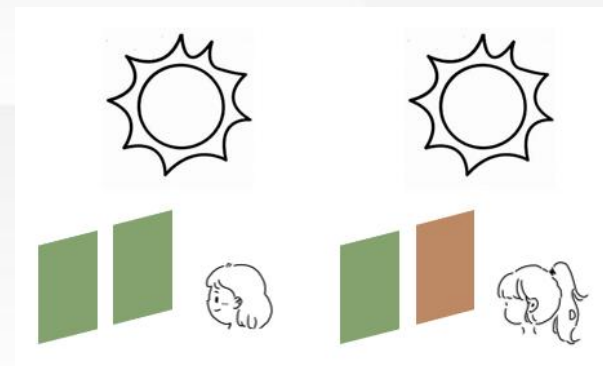
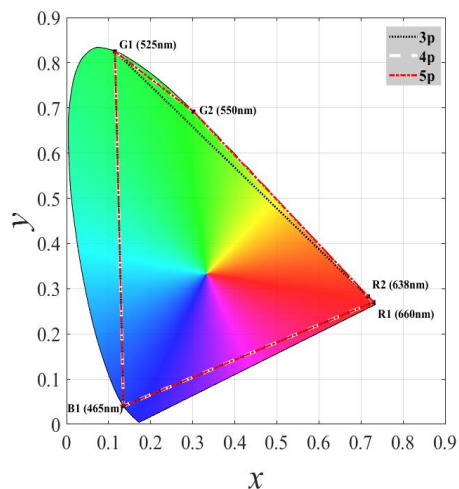
- 观察者同色异谱是指在特定标准观察者条件下，两个光谱组成不同的颜色在视觉上呈现相同的色彩感知。
- 量化指标OMI：色差 $\Delta E_{ab}^*=[(\Delta L^*)^2+(\Delta a^*)^2+(\Delta b^*)^2]^{1/2}$

Table 2

Comparison of OMI values between 3P systems with different FWHMs and CIE standard illuminant D65.

Display System	Mean_OMI	Max_OMI
CIE standard illuminator D65	7.9113	35.19
3P_20 nm	12.7257	50.1851
3P_15 nm	12.9648	52.9648
3P_10 nm	13.1284	53.6918
3P_5 nm	13.2190	54.5551
3P_1 nm	13.2692	55.0267

- 显示系统的选取



观察者同色异谱示例图

三基色激光显示系统的平均色差与最大色差始终比CIE标准照明体D65大

增加光谱连续性

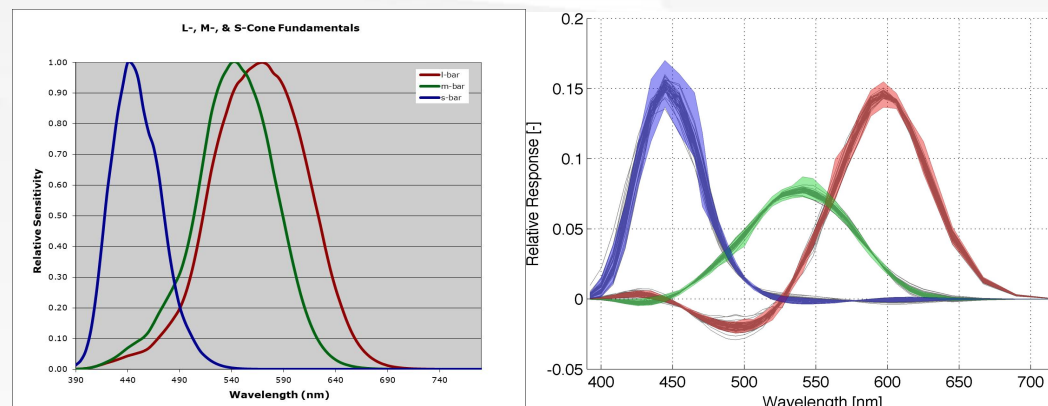
视锥响应匹配

改善同色异谱现象

思路：增加基色数量，提升“光谱自由度”，降低对不同的人眼生理差异的敏感度，缓解“千人千色”的问题

- 个体观察者模型

基于Asano提出的个体观察者模型，在CIE2006标准观察者的基础上，纳入了除年龄和视场角以外的八个生理参数



三视锥响应函数

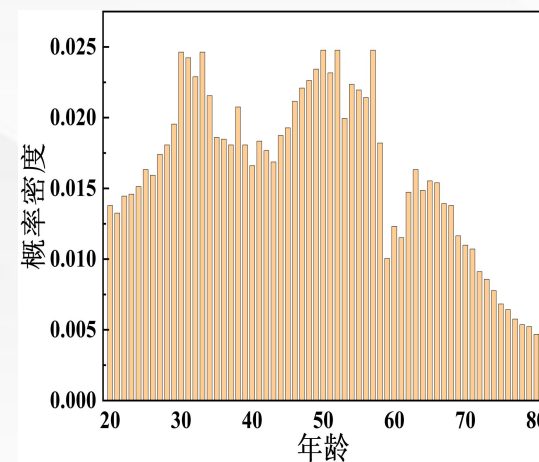
xyz颜色匹配函数

Asano Y, Fairchild M D, Blondé L. PLoS One, 2016, 11(2): 19.

- 年龄的抽样区间

年龄抽样的方式:

- ①在20-80岁之间随机抽样1000个年龄数据作为输入;
- ②20-80岁分为6个年龄段，每个年龄段随机抽样1000个年龄数据作为输入。



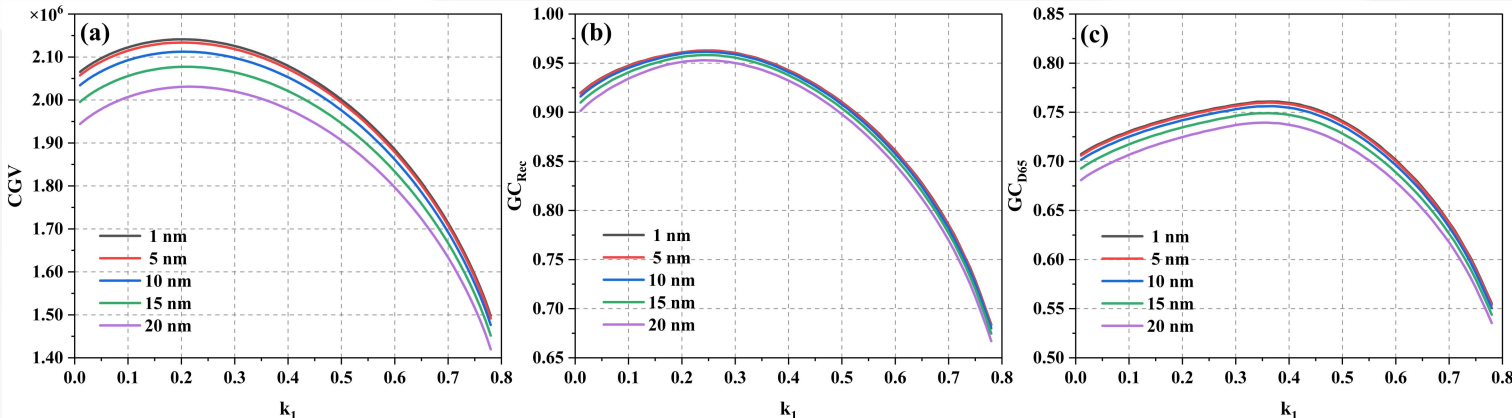
第七次全国人口普查的年龄分布

理论仿真：四、五基色显示系统色域评价参数

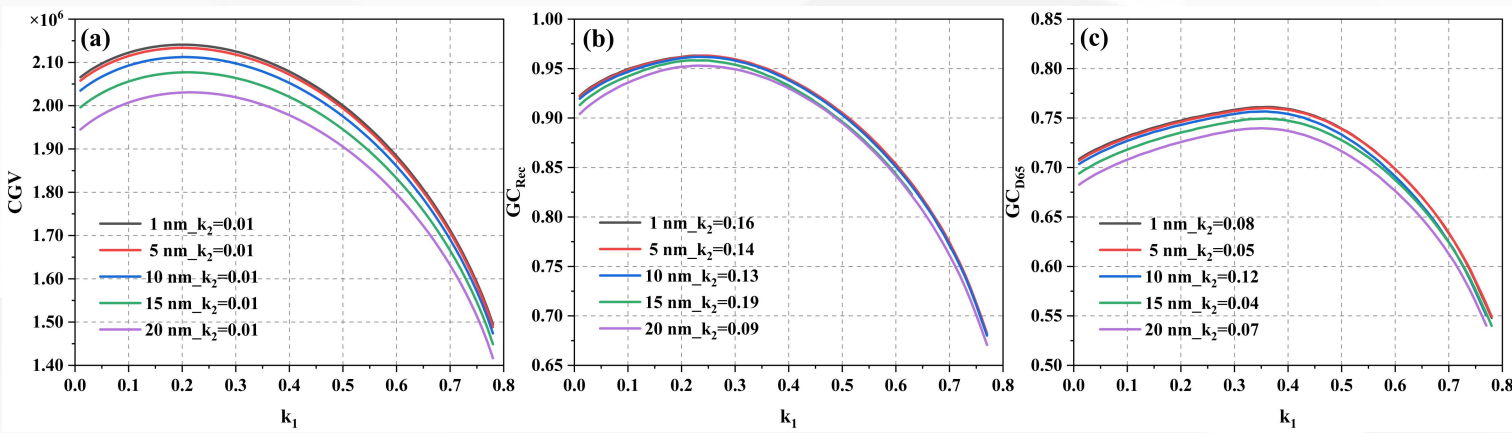
D65白点配平方式

- 立体色域体积最大
- Rec.2020标准下立体色域覆盖率最高
- CIE标准照明体D65标准下立体色域覆盖率最高

色域评价参数



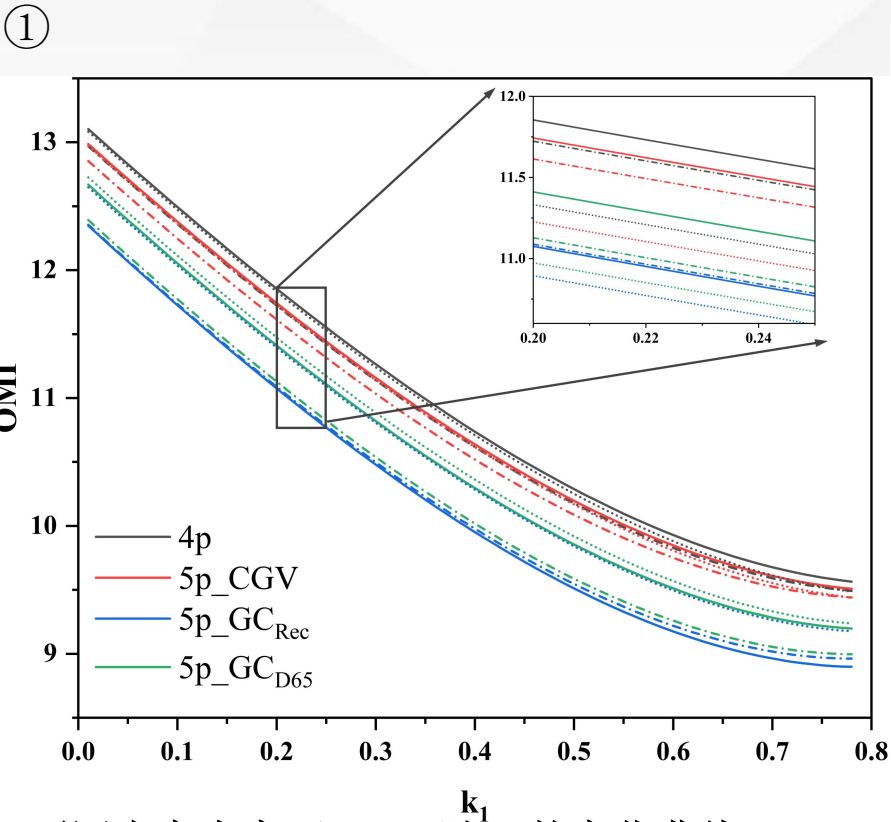
四基色激光显示系统的色域评价参数随着k值的变化情况



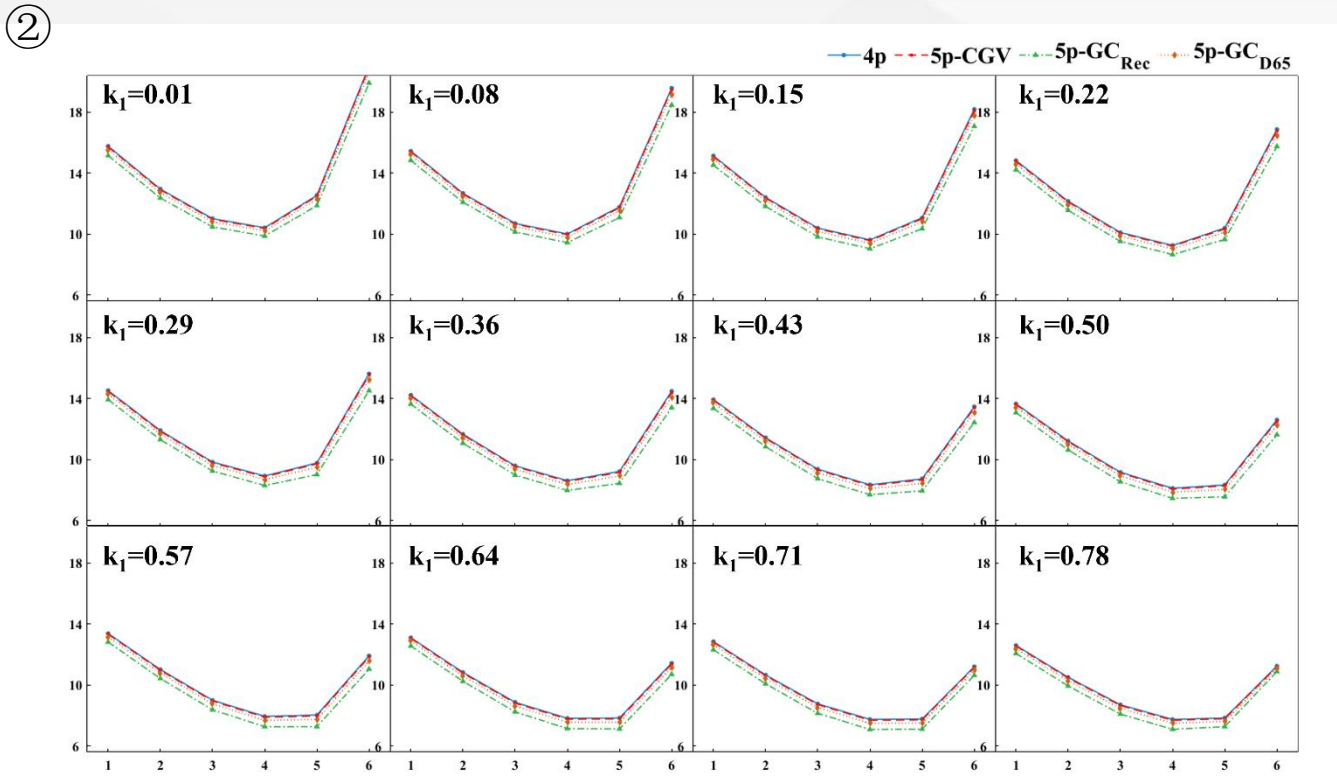
五基色激光显示系统的色域评价参数随着k值的变化情况

色域评价参数的最优值
对应的 k 值不同

理论仿真：四、五基色系统的OMI



不同半高全宽下 OMI 随 k_1 的变化曲线
(实线：半高全宽 1 nm；点划线：半高全宽 10 nm；短点线：半高全宽 20 nm)



5 nm 谱宽下四、五基色系统分年龄段 OMI 对比

OMI最优对应的k值与前面色域评价参数对应的k值也不同

综合评分法

色域评价参数

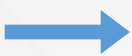
OMI

立体色域体积CGV

Rec.2020立体色域覆盖率 GC_{Rec}

D65标准下立体色域覆盖率 GC_{D65}

最优值对应的亮度比例 k 均不同



综合评分法

动态权重分配，可以根据实际应用场景进行合理选择

Table 4
Optimal parameters and performance indicators of 4P and 5P systems based on GA.

FWHM	k_1	k_2	OMI(40%)	R_3P(%)	CGV(20%)	$GC_{Rec}(20\%)$	$GC_{D65}(20\%)$
4P_1 nm	0.41	—	10.6408	19.8	2,066,284	0.9376	0.7578
4P_5 nm	0.42	—	10.5644	20.1	2,052,415	0.9343	0.7552
4P_10 nm	0.41	—	10.5220	19.9	2,059,372	0.9356	0.7526
4P_15 nm	0.41	—	10.2983	20.6	2,008,426	0.9322	0.7453
4P_20 nm	0.40	—	10.1602	20.2	2,053,137	0.9343	0.7564
5P_1 nm	0.52	0.20	9.2859	30.0	1,927,276	0.8948	0.7231
5P_5 nm	0.52	0.20	9.2710	29.9	1,920,958	0.8941	0.7217
5P_10 nm	0.53	0.20	9.1776	30.1	1,889,988	0.8866	0.7131
5P_15 nm	0.53	0.20	9.2498	28.7	1,858,060	0.8827	0.7048
5P_20 nm	0.53	0.20	8.8631	30.4	1,815,789	0.8754	0.6935

4P和5P系统分别能降低~20%和~30%的OMI，适配医疗、专业影像等高精度场景的不同需求

第

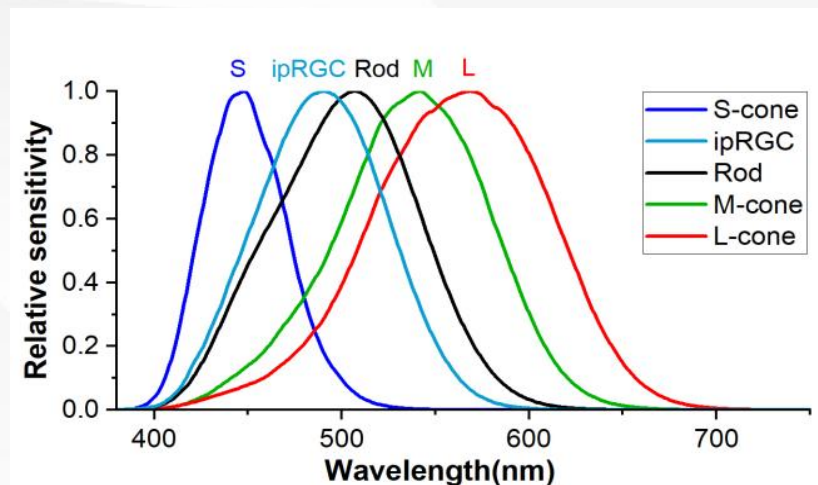
5

部分

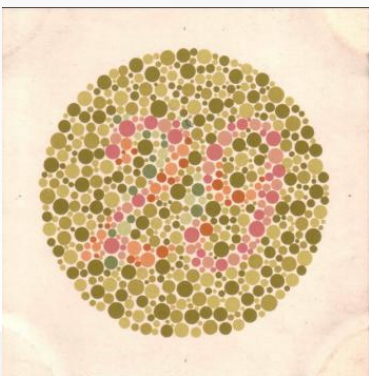
与医疗应用的结合



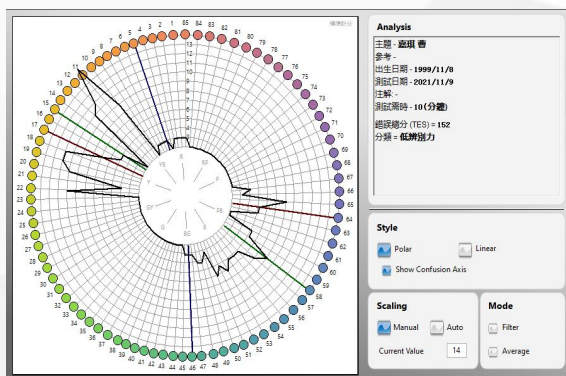
昼夜节律、血糖、肥胖



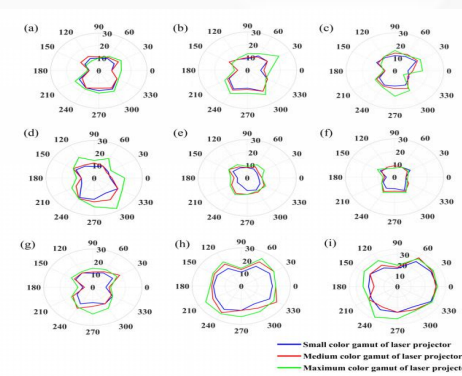
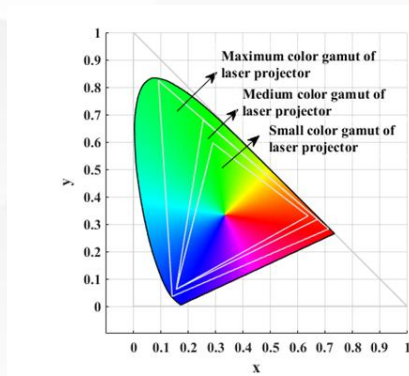
RGBC+ipRGCs



石原测试



FM-100测试



基于激光显示系统的数字化颜色分辨能力评估系统

THANK YOU

谢谢

