

文章编号: 1002-1582(2026)01-0075-05

基于蓝绿双波长EP-LED背光的智能LCD 三百色域切换显示系统

王楠^{1*}, 王博文², 颜凯², 赵振元², 陈守年¹, 张大宇¹, 耿玉旭¹, 孙昊¹, 周军龙³, 闫春辉⁴

(1. 重庆京东方光电科技有限公司, 重庆 400714)

(2. 联想(北京)有限公司, 北京 100000)

(3. 河南盈硕半导体照明科技有限公司, 河南 沁阳 454150)

(4. 纳微朗科技(深圳)有限公司, 广东 东莞 523000)

摘 要: 针对现有业界高色域显示方案在显示性能、可靠性、实现复杂度和成本等无法兼容的局限, 文章首次提出并验证了一种基于单晶片双波长LED芯片的创新解决方案。基于14.0WQ平台验证, 单晶片双波长芯片设计、荧光粉和高色域彩色滤光匹配及电路驱动策略, 可实现三百超高色域兼容覆盖率(Adobe 100%、DCI-P3 100%、sRGB 100%), 同时具有色偏低、可靠性高、结构简化及成本低等优势。另外, 搭配整机场景识别功能匹配最佳色域呈现能力, 该显示模组支持消费者在不同的应用场景中智能切换匹配的色域。将每个色彩空间发挥到极致, 真正呈现不同的图像原色, 达到最佳的画面显示效果。

关 键 词: 单晶片双波长; 三百兼容高色域; 色域切换; LCD显示系统

中图分类号: TN383+

文献标识码: A

Intelligent LCD three hundred color gamut switching display system based on blue-green dual wavelength EP-LED backlight

WANG Nan^{1*}, WANG Bowen², YAN Kai², ZHAO Zhenyuan², CHEN Shounian¹,
ZHANG Dayu¹, GENG Yuxu¹, SUN Hao¹, ZHOU Junlong³, YAN Chunhui⁴

(1. Chongqing BOE Optoelectronics Technology Co., Ltd., Chongqing 400714, China)

(2. Lenovo (Beijing) co., Ltd., Beijing 100000, China)

(3. Henan INSOAR Semi-conductor Lighting Technical Co., Ltd., Qinyang 454150, China)

(4. Narvellux Technologies, Dongguan 523000, China)

Abstract: The innovative solution based on single-crystal dual-wavelength LED chips is proposed and validated for the first time to improve the limitations of incompatible display performance, reliability, implementation complexity, and cost of existing high color gamut display solutions in the display industry. Based on the verification of 14.0 WQ platform, the design of single chip dual wavelength chips, matching of phosphors and high color gamut color filters, and circuit driving strategies can achieve a compatibility coverage rate of three hundred high color gamut (Adobe 100%, DCI-P3 100%, sRGB 100%). At the same time, it possesses the advantages of low color shift, high reliability, simplified structure and low cost. In addition, this display module supports consumers to switch the matched color gamut in different application scenarios with the overall scene recognition function matching the best color gamut presentation capability. The scheme is proposed to maximize each color space to truly present different primary colors of the image, achieve the best visual display effect.

Keywords: Dual-wavelength EP-LED Chip; three hundred-color gamut; color gamut switching; LCD Display

收稿日期: 2025-08-27; 收到修改稿日期: 2025-12-03

作者简介: 王楠(1993—), 男, 高级工程师, 硕士, 从事LCD机光方向研究。

* 通讯作者: wangnancq@boe.com.cn

0 引 言

随着显示技术的飞速发展，作为人机交互关键界面的显示器件，其综合显示性能至关重要。尤其在后液晶显示（LCD）时代，消费者对画质需求的不断提升，持续驱动着高色域显示技术的进步。因此，如何有效提升显示器件的色彩再现能力，以便提供更好颜色显示、更宽的视角和更细微的细节，已成为当前产业界与学术界的研究焦点^[1]。

在LCD显示器件中，色彩表现主要取决于背光源的光谱特性与彩色滤光片（CF）的光谱透过特性。当前业界实现高色域LED背光源的主流途径聚焦于两种技术路线：荧光粉方案与LED芯片方案，如表1所示。在荧光粉路线方面， β -Sialon与 $K_2SiF_6:Mn^{4+}$ （以下简称KSF）组合方案以及量子点（QD）方案占据主导地位。 β -Sialon+KSF方案旨在替代传统的YAG、Silicate黄色荧光粉背光。KSF荧光粉凭借其约7nm的超窄半波宽FWHM（Full Width Half Maximum），显著提升了红光光谱的色纯度。然而，此类背光方案（ β -Sialon+KSF）在绿光波段仍存在较宽的半波宽（例如， β -Sialon绿粉的半波宽为50nm以上），导致最终呈现颜色的色纯度无法继续提升。尽管相较于传统的硅酸盐或铝酸盐绿粉， β -Sialon的色纯度已有显著改善，但在满足诸如Adobe RGB等宽色域标准时，其绿光光谱色纯度不足的问题依然突出^[2]。相比之下，量子点材料凭借其RGB三色均具备窄半波宽和高色纯度的特性，理论上可实现更高的色域覆盖率。虽然量子点绿光的半波宽可控制在30nm以内，但其固有的水氧敏感性和较差的稳定性（失效）严重制约了其在LED封装领域的直接应用。目前量子点主要采用QD膜的形式集成，但该方案仍面临画面边缘色偏（异色）和成本高昂等挑战，阻碍了其大规模量产应用^[3-8]。

表1 高色域方案对比表

Item	β -Si-alon+KSF	QD Film	蓝绿集成芯片	EP-LED
色域规格	☆☆☆	☆☆☆☆☆	☆☆☆☆☆	☆☆☆☆☆
信赖性表现	☆☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆☆
画面品味	☆☆☆☆☆	☆	☆☆☆	☆☆☆☆☆
成本	☆	☆☆	☆☆☆☆☆	☆☆☆

在芯片路线方面，业界提出了蓝绿芯片集成方案，即通过封装蓝光晶片与绿光晶片并分别驱动，以提升色域表现。然而，该方案因需独立驱动两颗晶片，结构较为复杂。更关键的是，蓝光

和绿光晶片的光电转换效率存在差异，导致在整机亮度调节过程中出现明显的色坐标偏移（色偏）。因此，相较于传统方案，蓝绿芯片集成方案普遍存在驱动复杂度高、低亮度下色偏严重以及成本较高等问题^[9-11]。

综上所述，现有高色域背光技术（无论是荧光粉路线还是芯片路线）在性能（色纯度、色偏控制）、可靠性、复杂度和成本等方面均存在显著局限性。针对这些挑战，本文首次提出并验证了一种基于单晶片双波长LED芯片的创新解决方案。该方案通过协同优化芯片设计、荧光粉体系、高色域彩色滤光片以及电路驱动策略，成功实现了三百超高色域覆盖率（Adobe 100%、DCI-P3 100%、sRGB 100%），同时兼具色偏低、可靠性高、结构简化及成本低等优势。

1 新型双波长EP-LED背光高色域显示系统

1.1 新型双波长EP-LED芯片

发光二极管LED（Light Emitting Diode LED）是一种基于半导体材料的电光转换器件，具有亮度高、功耗低、寿命长等优势，已成为现代显示器件的核心组件。当前显示器件普遍采用单晶片单波长架构，即单一蓝光晶片。为克服现有高色域技术方案（如量子点膜、蓝绿集成芯片方案）在成本、结构复杂度、可靠性与色偏控制等方面的局限，本研究提出一种蓝绿外延单晶片双波长EP-LED芯片（EL-电致发光，PL-光致发光）方案，与传统蓝光LED芯片相比，EP-LED在单一晶片内集成两个单独分离多量子阱（MQWs）发光区，如图1所示。蓝光MQWs（有源区）发光区，基于电致发光原理（与常规蓝光芯片相同），发射蓝光；绿光MQWs（有源区）发光区，基于光致发光机制，蓝光MQWs有源区产生的短波长蓝光激发绿光MQWs区，发射绿光。

光致发光机理为蓝光MQW有源区发出的蓝光能量传递到绿光MQW层被吸收后发射绿光，光的吸收及发射源自于能级之间的跃迁。如图2所示，绿光MQW层受到短波长蓝光激发，导致材料中电子跃迁到导带顶高能态，形成准平衡态，半导体处于一种激发态，绿光MQW层吸收入射的蓝光光子，在导带顶和价带底分别形成电子和空穴。此时激发的电子和空穴处于不能稳定状态，在相应能级上短暂停留后，电子向着价带的最小值（即本征态）进行能量和动量的弛豫，最终和空穴复合，再次释放出绿光光子。对比蓝绿集成芯片方案，EP-LED绿光半波宽为28nm，在1~20mA电流

下绿色主波峰波动缩减 56%, 色坐标 W_x 偏差缩减 80%, 色坐标 W_y 偏差缩减 3%, EP-LED 发光均匀性在水平方向提升 4.0%, 在垂直方向提升约 5.1%。因此, 单晶片蓝绿双波长 EP-LED 芯片具有更窄的绿光半波宽, 更高的光谱动态稳定性和蓝绿光空间发光均匀性等显著特性优势。

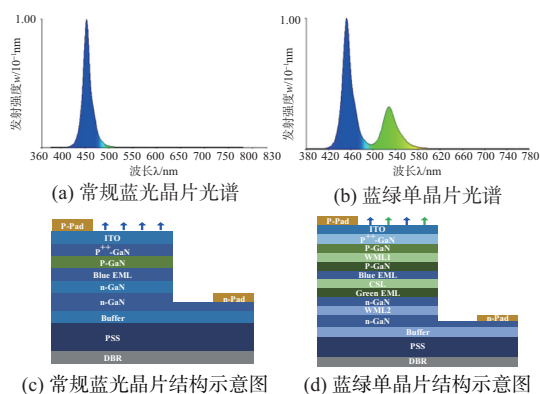


图 1 常规蓝光 LED 晶片和蓝绿单晶片

双波长 EP-LED 晶片差异

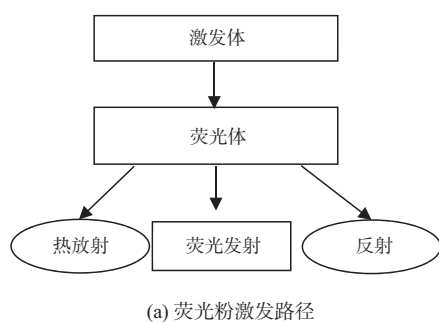


图 2 单晶片蓝绿双波长 LED 晶片发光原理

1.2 高色域荧光粉设计

荧光粉受到 LED 晶片激发后, 通过光致激发产生特定波长, 最终 LED 发出红、绿、蓝三色光谱。荧光粉体系的激发原理及特性如图 3 所示。稀土荧光粉发光原理是基于稀土元素的电子能级跃迁, 荧光粉受激发吸收能量而跃迁至高能级激发态, 返回到基态的过程中以光的形式释放能量。

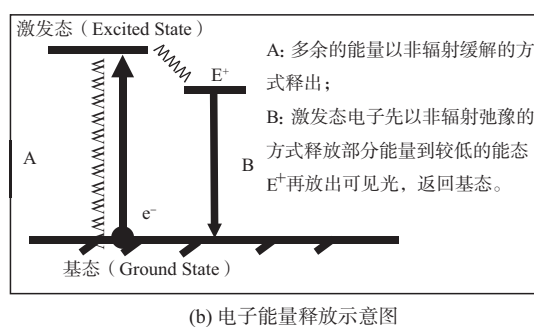


图 3 荧光粉激发原理

目前高色域的主流荧光粉方案为 β -Sialon 与 KSF 组合。KSF 荧光粉的晶体结构与光谱特性如图 4 所示, 其物理特性决定了氟化物荧光粉发射光谱的半波宽 (7nm), 可显著提升 LED 光谱中红色纯度。

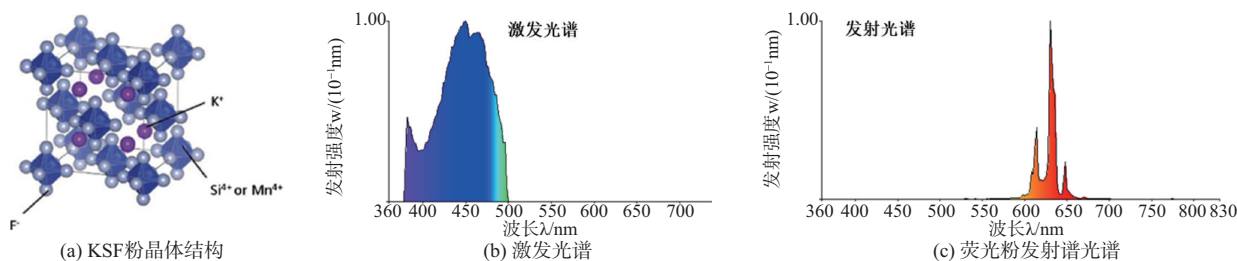


图 4 KSF 粉晶体结构及光谱

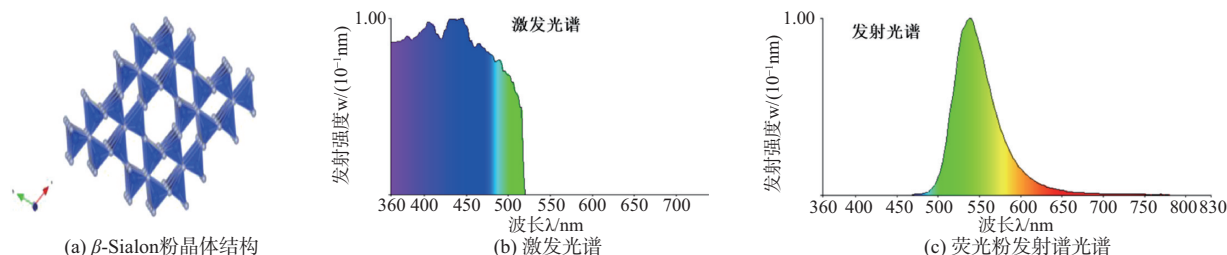


图 5 β -Sialon 粉晶体结构及光谱

RGB等宽色域标准时，仍存在绿光纯度不足的情况。

本研究提出单晶片蓝绿双波长 EP-LED+KSF 荧光粉协同优化方案，蓝绿晶片搭配 KSF 粉进行封装后，因绿光半波宽收窄至 28nm，色纯度明显提升，更窄的绿光光谱减少了与 KSF 红光光谱区域的重叠，降低了绿、红光光谱的串扰，提升 KSF 激发红光的纯度，此改善点在搭配 OC 后在整机 Gx/Gy 方面会有突破性提升，其中 Gx 可提升

$$\text{Color Gamut Ratio} = \frac{R_x(G_y - B_y) - B_x(G_y - R_y) - G_x(R_y - B_y)}{R_{sx}(G_{sy} - B_{sy}) - B_{sx}(G_{sy} - R_{sy}) - G_{sx}(R_{sy} - B_{sy})} \times 100\%$$

(1)

式中，R_x、G_x、B_x为LED白光透过彩膜透明覆盖层（Over Coating，OC）后所得到的各单一色的x值坐标，R_y、G_y、B_y为LED白光透过OC后所得到的各单一色的y值坐标，R_{sx}、G_{sx}、B_{sx}、R_{sy}、G_{sy}、B_{sy}为目标色域标准下的对应色坐标值。

根据上述色域计算方程可知，显示器件的色域容积直接取决于其R/G/B三基色色坐标构成的空间范围。色域覆盖率取决于R/G/B三基色色坐标构成的空间范围与目标色域空间范围的相对位置关系。而色坐标的形成本质上是背光源发射光谱与彩色滤光片（CF）光谱透过率的卷积结果。本研究采用的新型单晶片双波长 EP-LED，其绿光波段半波宽 28nm，较传统 β-Sialon 方案显著收窄（降幅>40%），这为拓展色域创造了基础条件。为实现三百色域 100% 覆盖协同优化，必须精准设计 CF 各通道（R/G/B）的光谱响应曲线，使其与收窄后绿光光谱特征匹配。该设计策略不仅可突破现有色域瓶颈，更能最大限度提升 Panel 透过率，为高端显示产品核心竞争力提供保障。

为提升红色通道色域表现，本项目红色光阻采用高色纯度的红色颜料与高透过率的黄色颜料（Y）组合，结合最新的颜料细化及分散技术调整光刻胶的工艺性，实现了在 BLU 下 Red 色坐标（x+y）趋近于理论极限值 1（W_x=X，W_y=X）。本项目绿色光阻采用高亮高色纯度两种绿色颜料（G1,G2）组合，其中 G1 颜料通过颜料化学结构的调整，实现减小颜料颗粒的直径，同时具有高亮度、高对比度的特点；G2 颜料用于宽色域表现提升，能够提供优越的亮度和色彩再现性；同时，因 Adobe 和 DCI 两种色域标准色坐标差异较大，为提高两种色域标准的匹配率，光刻胶中最大限度的提升了颜料浓度，同时通过产线工艺的调整，解决了该光刻胶在高膜厚时的工艺不良，使其具备量产可行性。本项目蓝色（Blue）光阻采用全新高色浓度全染料蓝色光阻（All Dye Blue），其透过率达到业内最高标准。为解决染料分子受热分解

0.005，G_y可提升 0.007，R_x可提升 0.003，R_y可提升 0.004。

1.3 Panel 高色域彩膜

显示器件的色域范围由 R/G/B 三基色色坐标构成的色彩空间面积决定，其计算遵循 CIE 色度学原理，即 LED 白光透过 Panel 彩膜后的 R/G/B 色坐标连线所围起来的范围即为最终显示器所能呈现的色彩范围，色域容积计算方程为

问题，全染料蓝色光阻在原料合成时通过化学反应将多个染料分子（B Dye）通过化学键结构相连接，形成类骨骼结构，提高了耐热稳定性，并通过信赖性等相关验证，已在多个量产产品上实现应用。优化蓝色光阻膜厚，可实现同一彩膜方案下兼容非低蓝光和护眼低蓝光的需求。

综上，通过采用新型高性能光刻胶，并优化产线工艺参数进行匹配，成功制备出可量产的高色域彩色滤光片。结合 EP-LED 背光技术，该彩膜方案可满足客户对笔记本电脑护眼低蓝光、Adobe RGB 100% 和 DCI-P3 100% 色域标准，模组发光光谱如图 6 所示，CIE 色坐标及色域匹配度如表 2 所示。

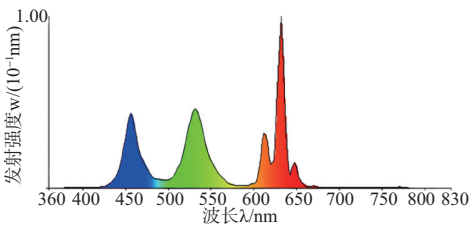


图 6 模组发光光谱图

表 2 CIE 色坐标及色域匹配度

Item	R _x	R _y	G _x	G _y	B _x	B _y
CIE 色坐标	0.689	0.310	0.215	0.732	0.143	0.051
色域标准	sRGB		DCI-P3		Adobe	
	Ratio.	Mat.	Ratio.	Mat.	Ratio.	Mat.
色域匹配度	145.6%	100.0%	115.9%	99.7%	124.8%	100.0%

1.4 电路驱动方式

为改善低亮度色偏，本显示模组采用 ACC 校准算法（Accurate Color Capture/Calibration），即通过智能调整显示 Data RGB 比例，优化低亮度色偏。具体实现方案为：

Step 1: 实测收集 Panel 不同灰阶的原生色彩数据，输入至文本/Excel 表格待处理；

Step 2: 通过电光转换（Electro-Optical Transfer Function），EOTF 功能，将电信号转换为光信号输出；

Step 3: 利用原生色彩数据与标准色域数据，生成 3×3 matrix 算法函数，调整显示玻璃的 RGB

显示数据，达成不同色域标准的RGB色坐标要求；

Step 4：通过 OETF 光电转换功能（Opto-Electrical Transfer Function），将上述转换完的光学数据转换为电学的RGB显示控制数据（电性）

Step 5：GammaLUT：根据实测数据，将R/G/B三个颜色分别做10bit/12bit的dither转换，通过改变R/G/B比例关系实现色坐标校准，将调整后的RGB比例关系写入LUT Table表内。

另外，搭配整机系统ACM（自动色彩管理）功能，也可实现由一种广色域，切换至更佳精确的单色域切换方案，实现色域切换功能。

2 结 论

基于14.0 WQ平台进行验证，并搭配联想整机基于ACM（自动色彩管理）功能进行不同场景色域切换实测色域数据如图7和表3所示。结果表明，该方案可同时满足Adobe 100%、DCI-P3 100%、sRGB 100%（CIE 1976 标准）。此外，该显示模组支持用户根据不同应用场景动态选择适配的色域模式。用户可在游戏娱乐、专业设计、日常办公等多种场景下，依据特定视觉需求灵活切换，从而充分发挥每种色彩空间的最佳性能，精准呈现不同图像内容的原生色彩，最终实现最优的画面显示效果。

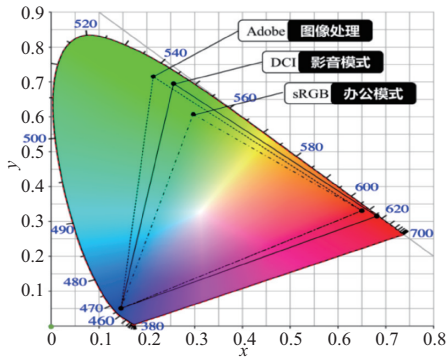


图7 不同模式色域覆盖图

表3 硬件色域及不同场景切换实测数据

色域 CIE 1976	硬件色域	sRGB模式 (办公模式)	DCI模式 (影音模式)	Adobe模式 (图像处理)
R _x	0.689	0.650	0.682	0.650
R _y	0.310	0.332	0.316	0.332
G _x	0.215	0.297	0.256	0.214
G _y	0.732	0.609	0.696	0.716
B _x	0.143	0.146	0.146	0.146
B _y	0.051	0.053	0.053	0.053
sRGB/%	Ratio.	145.6	107.7	133.4
	Mat.	100.0	100.0	100.0
DCI-P3/%	Ratio.	115.9	85.8	106.2
	Mat.	99.7	85.0	99.7
Adobe/%	Ratio.	124.8	92.4	114.4
	Mat.	100.0	87.8	95.6

参考文献：

[1] 杨斌,王世荣.从技术系统进化趋势研判主要显示技术方向的演进[J].液晶与显示,2021,36(8):1144—1150.
Yang Bin, Wang Shirong. Development judgment of the main display techniques based on the trends of engineering system evolution[J]. Chinese Journal of Liquid Crystal, 2021, 36 (8): 1144—1150.

[2] Xu F C, Yang H S, Zhang Y J, et al. β -Sialon: Eu²⁺-phosphor-in-glass: An efficient and potential green color conversion material for laser lighting systems[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 887:161301.

[3] 林继栋,王志斌,张瑞丹,等. CsPbX₃ (X=Cl, Br, I) 钙钛矿量子点玻璃制备及其应用研究进展[J]. 发光学报, 2021, 42 (9):1331—1344.
Lin Jidong, Wang Zhibing, Zhang Ruidan, et al. Research progresses in preparation and applications of CsPbX₃ (X=Cl, Br, I) perovskite quantum Dots-embedded glass[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2021, 42(9):1331—1344.

[4] 林继栋,陈大钦. 钙钛矿量子点玻璃背光应用[J]. 液晶与显示, 2023, 38(3):342—355.
Lin Jidong, Chen Daqin. Application of perovskite quantum dot glass backlight[J]. Chinese Journal of Liquid Crystal, 2023, 38(3):342—355.

[5] Lin J D, Lu Y X, Li X Y, et al. Perovskite quantum dots glasses based backlit displays[J]. ACS Energy Letters, 2021, 6 (2):519—528.

[6] 陈亚勇. 基于粒子群优化算法的LED调控光谱技术研究[J]. 照明工程学报, 2025, 36(2):104—110.
Chen Yayong. The application and study of LED tunable spectrum technology based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Zhaoming Gongcheng Xuebao, 2025, 36 (2): 104—110.

[7] Lu Y X, Xu Y W, Chen S X, et al. Ultra-narrowband emitting and highly stable CsPbX₃@glass@PDMS (X₃=Br₃, Br_{1.5}I_{1.5}) monolithic composite film for backlit displays[J]. Journal of Luminescence, 2022, 248:118952.

[8] 叶芸,喻金辉,林淑颜,等. 量子点背光技术的研究进展[J]. 中国光学, 2020, 13(1):14—27.
Ye Yun, Yu Jinhui, Lin Shuyan, et al. Progress of quantum dot backlight technology[J]. Chinese Optics, 2020, 13 (1): 14—27.

[9] 鹿文昕,赵云鹭等. 用于宽色域液晶显示器的反射型高光效率彩色滤光片[J]. 液晶与显示, 2023, 38(12):1653—166.
Lu Wenxin, Zhao Yunlu, et al. Reflective high-efficiency color filters for wide color gamut LCD [J]. Chinese Journal of Liquid Crystal, 2023, 38(12):1653—166.

[10] 周忠伟,孟长军,王磊,等. 液晶显示器广色域技术的研究[J]. 发光学报, 2015, 36(9):1071—1075.
Zhou Zhongwei, Meng Changjun, Wang lei, et al. Research of wide color gamut technology for liquid crystal display[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2015, 36(9):1071—1075.

[11] Zhang C, Niu R, Li W J, et al. Narrow-band high-transmittance birefringent filter and its application in wide color gamut display [J]. Chinese Physics B, 2021, 30(5):054207.