



Research Progress on Angular Color Shift of Micro-Light-Emitting Diode

Downloaded from: <https://research.chalmers.se>, 2025-11-06 18:41 UTC

Citation for the original published paper (version of record):

Wang, Z., Zhang, K., Yan, Q. et al (2025). Research Progress on Angular Color Shift of Micro-Light-Emitting Diode. *Laser and Optoelectronics Progress*, 62(19).
<http://dx.doi.org/10.3788/LOP250497>

N.B. When citing this work, cite the original published paper.

激光与光电子学进展

微型发光二极管角色偏的研究进展

王志华¹, 张恺馨^{2***}, 严群^{1**}, 孙捷^{1,3*}¹福州大学平板显示技术国家地方联合工程实验室, 中国福建光电信息科学与技术创新实验室, 福建 福州 350100;²福建农林大学机电工程学院, 福建省农业信息感知技术重点实验室, 福建 福州 350002;³查尔姆斯理工大学量子器件物理实验室, 瑞典 哥德堡 41296

摘要 微型发光二极管(Micro-LED)因其卓越的性能特性,例如高对比度、快速响应时间和低功耗,已在学术界和显示产业中引起广泛关注。角色偏即显示设备在不同视角下呈现的颜色差异,会改变 Micro-LED 显示器的色域和对比度,进而影响用户的视觉体验。本文旨在分析导致角色偏现象的原因及主要影响因素,并综合评述当前用于缓解角色偏的解决方法,包括优化器件结构参数、添加黑矩阵结构、设计反射结构和使用光学薄膜结构。此外,依据各类缓解角色偏的解决方法,展望了未来可能的研究方向。对黑矩阵结构和反射结构进行进一步的优化设计,以及探索性能更优越的光学薄膜结构,可能对于抑制 Micro-LED 的角色偏现象具有更高的效率和潜力,是更值得深入研究的方向。

关键词 发光二极管; 角色偏; 角发射分布; 视角

中图分类号 TN312+.8

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP250497

Research Progress on Angular Color Shift of Micro-Light-Emitting Diode

Wang Zhihua¹, Zhang Kaixin^{2***}, Yan Qun^{1**}, Sun Jie^{1,3*}

¹National and Local United Engineering Laboratory of Flat Panel Display Technology, Fujian Science & Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China, Fuzhou University, Fuzhou 350100, Fujian, China;

²Fujian Key Laboratory of Agricultural Information Sensing Technology, College of Mechanical and Electrical Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China;

³Quantum Device Physics Laboratory, Chalmers University of Technology, Gothenburg 41296, Sweden

Abstract Micro-light-emitting diode (Micro-LED) has attracted widespread attention in academia and the display industry due to its outstanding performance characteristics, such as high contrast, fast response time, and low power consumption. Angular color shift, which refers to the color differences presented by display devices from different viewing angles, can alter the color gamut and contrast of Micro-LED displays, thereby affecting the user's visual experience. This article aims to analyze the causes and main influencing factors of the angular color shift phenomenon, and comprehensively review the current solutions for alleviating angular color shift, including optimizing device structural parameters, adding black matrix structure, designing reflective structure, and using optical thin film structure. Based on various solutions to alleviate angular color shift, this article looks forward to possible research directions. Further optimization design of black matrix and reflective structure, as well as exploration of optical thin film structure with superior performance, may have higher efficiency and potential in suppressing the angular color shift phenomenon of Micro-LED, and may be a more worthwhile direction for further research.

Key words light-emitting diode; angular color shift; angular emission distribution; viewing angle

1 引言

随着科技的飞速发展、设备的迭代升级和研究的

不断深化,发光二极管(LED)技术在尺寸、材料和设计等方面经历了显著的演变,推动显示技术领域多样化发展。近年来,微型发光二极管(Micro-LED)因其

收稿日期: 2025-01-13; 修回日期: 2025-02-10; 录用日期: 2025-02-20; 网络首发日期: 2025-02-25

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB3608703, 2023YFB3608700)、国家自然科学基金(12474066, 62404046)、福建省科技厅项目(2024J011312, 2021HZ0114)、武汉市科技重大专项(2024010702020024)

通信作者: *jie.sun@fzu.edu.cn; **qunfyan@fzu.edu.cn; ***958185645@qq.com

卓越的性能成为研究热点之一,甚至被认为有潜力取代现有的液晶显示器(LCD)和有机发光二极管(OLED)等传统显示技术^[1],成为新一代主流显示技术。与传统LED相比,Micro-LED的尺寸较小,普遍认为其尺寸低于 $100\text{ }\mu\text{m}$ ^[2]。Micro-LED的自发光特性、每个像素的独立控制能力和在非发光状态下的完全关闭功能,使其具有更高的对比度、更低的功耗和更高的可靠性等显著优势^[3]。

Micro-LED技术作为一种前沿显示技术,因其理论上展现出高对比度、长寿命、更短响应时间和低功耗的卓越性能而备受关注^[1-4]。与对比度有限的LCD和随亮度增强寿命缩短的OLED相比,Micro-LED技术以其卓越的性能表现,展现出巨大的应用潜力和发展前景^[5-8],引起众多研究者和企业的高度关注。2000年,Jin等^[9]提出尺寸为 $12\text{ }\mu\text{m}$ 的微盘InGaN LED,标志着Micro-LED技术发展的起点,自此开启了Micro-LED的发展之路。2001年,Jiang等^[10]进一步提出尺寸为 $12\text{ }\mu\text{m}$ 的 $10\text{ pixel}\times 10\text{ pixel}$ 蓝光Micro-LED阵列,并成功实现“ksu”字母的显示,同时呈现宽视角的发射分

布。2011年,Day等^[11]使用钢凸点技术集成绿光Micro-LED阵列与互补金属氧化物半导体(CMOS)驱动电路,制造出绿光InGaN微显示器。2012年,Sony公司率先推出一款高清Micro-LED电视显示器,该显示器由600万个独立Micro-LED构成,能提供高对比度的图像和快速的视频响应^[4]。2015年,Han等^[12]通过在紫外(UV)Micro-LED阵列上喷涂胶体量子点,实现尺寸为 $35\text{ }\mu\text{m}$ 的 $128\text{ pixel}\times 128\text{ pixel}$ 红光、绿光、蓝光Micro-LED阵列。2018年,Hong等^[13]将LED外延层转移到蓝宝石基板上,制备分辨率为 $64\text{ pixel}\times 32\text{ pixel}$ 且亮度超过450 nits的红光Micro-LED。2019年,Mojo Vision公司在世界增强现实博览会上展示了具有 $1.4\times 10^4\text{ pixel/inch}$ 像素密度的Micro-LED微显示器,推动增强现实(AR)技术向沉浸式虚拟体验的发展^[2]。2023年,Shin等^[14]利用基于二维材料的层转移技术,实现像素密度高达 $5.1\times 10^3\text{ pixel/inch}$ 且芯片尺寸仅为 $4\text{ }\mu\text{m}$ 的全彩、垂直堆叠Micro-LED阵列。Micro-LED的发展历程如图1所示。

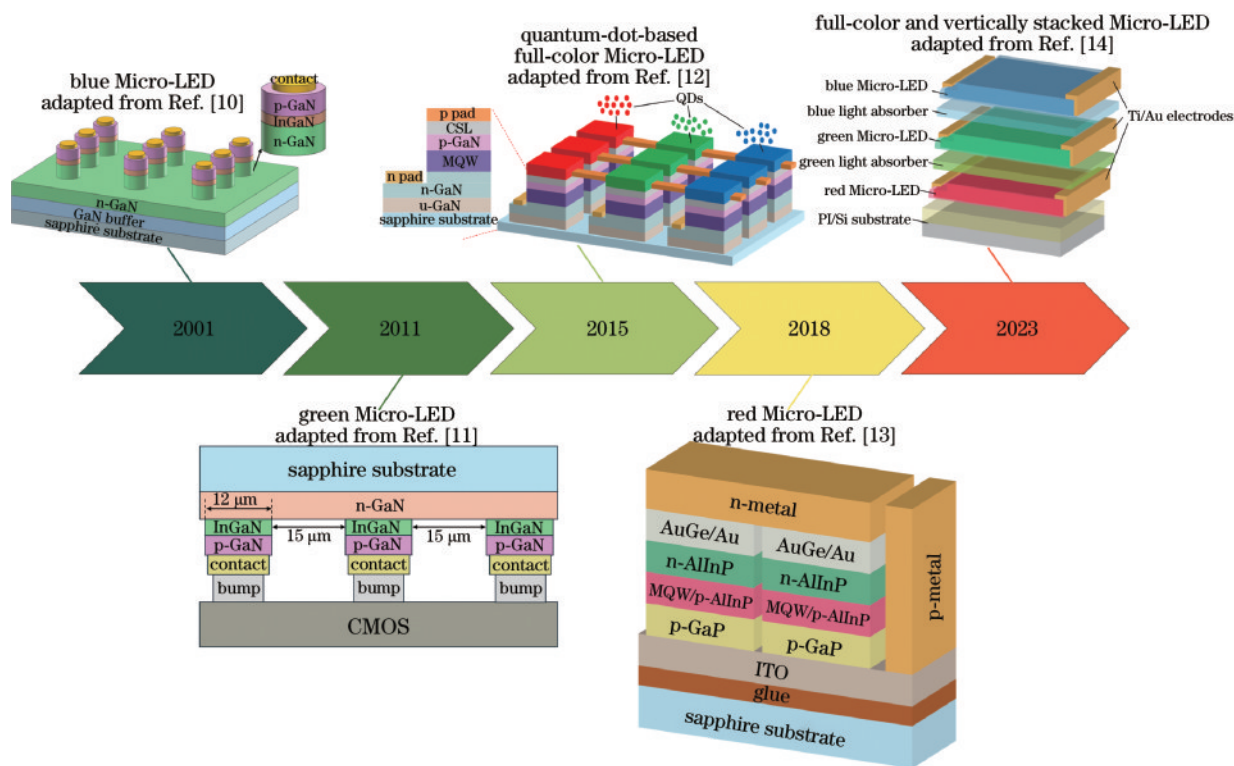


图1 Micro-LED的发展

Fig. 1 Development of Micro-LED

随着对Micro-LED技术研究的不断深入,其应用领域和范围也在不断扩展。Micro-LED技术凭借其卓越的性能,显示出在虚拟现实(VR)、AR和高清晰度电视等高端显示技术领域的应用潜力^[5-6]。此外,通过将Micro-LED技术与其他技术进行融合,进一步拓宽了其应用场景。例如,将Micro-LED技术与柔性基板技术结合,开发出柔性Micro-LED显示屏,为可穿戴

显示设备提供了新的解决方案^[15];Micro-LED技术与通信技术的结合,实现了Micro-LED在长距离、高速率的实时可见光通信领域的应用^[16];在医学领域,柔性Micro-LED阵列的应用推动了新型柔性光学人工耳蜗植入物的设计和制造^[17]。尽管Micro-LED技术展现出卓越的性能和广泛的应用潜力,其商业化和大规模生产仍面临诸多困难,如集成封装的高昂成本、尺寸缩

小带来的各种效应^[18-21]、巨量转移的良率问题和全彩显示的实现^[22-24]等。其中,成本问题成为制约 Micro-LED 量产化的主要障碍之一;随着 Micro-LED 尺寸的减小,侧壁缺陷和物理效应变得更加显著,需要额外的工艺处理,从而增加制造成本;巨量转移良率的不足会导致损坏芯片数量的增加,进一步提高制造成本。

在 Micro-LED 技术的研究与应用领域,角色偏现象也不容忽视。该现象指在不同观察角度下,大屏显示器呈现的颜色出现差异,这种差异会影响 Micro-LED 显示器的色域和对对比度^[25-27]。色偏即显示设备呈现的颜色相较于预期或标准颜色发生的偏移,通常通过色度坐标来量化表征。具体而言,将发光器件的发光特性转换为对应的色度坐标,并基于这些色度坐标计算色偏差值,可以对色偏的程度进行量化评估。据相关报道,人眼能感知到的最小色偏差值为 0.02^[26-27],这一阈值为色彩准确性的评估提供了重要参考。角色偏即显示设备在不同视角下呈现颜色的变化,当这种变化超过 0.02 的阈值时,将导致显示色彩偏离原始色彩,进而影响使用者的视觉体验。色彩准确性是衡量显示技术性能的重要指标之一,而角色偏现象的存在,尤其在高端应用领域,如专业图像处理和精确色彩再现,可能对色彩准确性造成不可接受的影响,从而降低视觉体验的质量。在公共场所的大屏幕显示器应用中,角色偏的存在可能影响整体显示效果,导致部分视角下的显示质量下降;对于 AR、VR 等对色彩饱和度和色域要求较高的应用场景,角色偏现象可能显著影响用户的视效体验;在医疗影像等特殊应用场景中,角色偏现象可能导致重要信息的遗漏。因此,对于追求卓越视效体验和精确显示效果的应用场景而言,解决或减轻 Micro-LED 的角色偏问题尤为关键,这将在一定程度上推动 Micro-LED 技术应用场景的扩展和性能的提升,以满足市场对高性能显示设备的需求。然而,当前对于 Micro-LED 角色偏问题的研究和综述相对较少,这在一定程度上制约了 Micro-LED 技术在特定应用领域的进一步发展和优化。

本文首先对 Micro-LED 技术中的角色偏现象进行初步阐述,随后讨论导致角色偏的原因及其关键影响因素,并分析可能减轻 Micro-LED 角色偏的解决手段,最后对减轻 Micro-LED 角色偏的发展趋势进行展望。

2 主要影响因素和物理机制

角色偏现象指随着视角变换,大屏显示设备呈现的颜色发生偏移。国际照明委员会(CIE)基于 1931 年的视觉实验数据,建立了一套国际公认的颜色测量标准体系,包括 CIE 1931 色匹配函数、XYZ 三基色刺激值、CIELUV 和 CIELAB 颜色空间及色差公式等^[28]。颜色偏移的程度通常通过 CIE 1931 或 CIE 1964 标准比色系统进行比较,并用色度坐标计算的颜色偏差来衡量色偏程度。将 XYZ 三基色刺激值 X 、 Y 、 Z 投影到

单位平面(满足条件 $x+y+z=1$)上得到 CIE 1931 色度图,色度坐标 (x, y) 的定义为

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (1)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (2)$$

为改善 CIE 1931 色度图中色度尺度的不均匀性,CIE 进一步提出 CIE 1964 色度图,其色度坐标 (u', v') 的定义为

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \quad (3)$$

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} \quad (4)$$

CIELAB 和 CIELUV 颜色空间是 CIE 推荐的三维均匀颜色空间,它们允许以一种与人类视觉感知一致的方式来描述颜色的 3 个基本属性:色调、饱和度和亮度^[28]。CIELAB 颜色空间使用欧几里得距离来衡量 2 种颜色之间的差异,色差 ΔE_{ab}^* 的计算公式为

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (5)$$

式中: L^* 为亮度; a^* 的正值和负值分别表示红色和绿色; b^* 的正值和负值分别表示淡黄色和淡蓝色^[29]。CIELUV 颜色空间的构建与 CIELAB 类似,但它使用坐标 (u', v') 来描述颜色。

由于显示器件的材料和结构存在差异,角色偏现象产生的原因及其影响因素也不尽相同。在 LCD 显示器件中,液晶分子的排列方向受施加电压的调控,进而影响其在不同视角下的透射特性。当来自背光单元不同颜色的光通过液晶层时,透射率的视角依赖性会导致角色偏现象^[8]。为扩展 LCD 显示器的视角并减轻色彩偏移,可以采取将液晶分子划分为多个域^[30]和应用补偿膜^[31]的策略。在 RGB OLED 显示系统中,角色偏可能源于单色成分(红色 R、绿色 G、蓝色 B)的色偏,或者是由于 RGB 三色的角发射分布不匹配。对于单色且具有光学微腔的 OLED 显示器件,微腔共振效应的存在对色偏具有显著影响。当光波的共振频率与微腔的共振频率相匹配时,会发生相长干涉,增强特定波长的光,从而提升发光效率。随着观察角度的增加,光在微腔中的传播路径也会变化(图 2),导致共振条件发生改变,进而引起发射光谱的偏移,造成角色偏现象^[25]。但在实际显示图像中,单色成分通常仅占据图像的较小比例,而图像中的大多数颜色是通过红、绿、蓝 3 种基本颜色以不同比例混合而成^[27]。在颜色混合过程中,角发射分布的不匹配导致某些颜色的角发射分布下降速度可能比其他颜色更快,从而使混合后的颜色出现角色偏。例如,蓝光和绿光 LED 的角发射分布下降速度可能比红光 LED 更快,这可能导致在较大观察角度下图像呈现偏红的现象。通过调整 OLED

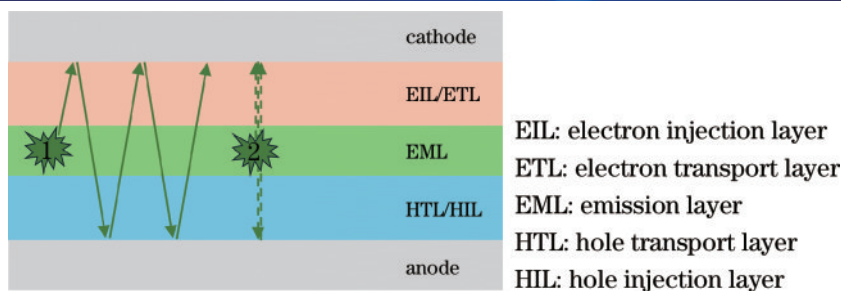


图 2 光在光学微腔中的部分反射路径(不考虑由折射率差异引起的折射现象)

Fig. 2 Partial reflection propagation paths of light in optical microcavity (don't considering refraction phenomenon caused by difference in refractive index)

结构中的腔体长度,可以改变微腔的共振条件,进而影响 OLED 的发射光谱和角分布,以减少在不同视角下观察时的颜色变化^[25,27]。

在 RGB Micro-LED 显示系统中,角色偏主要由 RGB 的角发射分布不匹配引起。对于单色 Micro-LED 而言,其微腔效应相对较弱,发光光谱的中心波长并不会随着观察角度的增加而发生显著偏移,因此肉眼难以察觉到明显的角色偏现象^[26]。在某些 Micro-LED 设计中,为追求其他性能的提升,也可能引起一定程度的角色偏。例如,在集成光学薄膜的 Micro-LED 设计中,不合理的设计可能导致 LED 芯片发射光的反射和散射特性受到影响,使得角发射分布偏离理想的朗伯分布^[32],从而加剧角色偏现象。随着 Micro-LED 尺寸的减小,RGB 子像素间角发射分布不匹配的问题在很大程度上源于侧壁发光特性的差异。由于尺寸的减小,Micro-LED 的侧壁面积与整体表面积之比增加,侧壁发光在总发光中所占比例也增加,使得侧壁发光成为一个不可忽视的因素。对于 RGB Micro-LED 显示系统而言,红光 LED 通常不采用与蓝光和绿光 LED 相同的 InGaN 材料,而是采用 AlGaInP 材料^[33-34]。红光 LED 使用的材料和结构与蓝光和绿光 LED 存在差异,导致红光 LED 的侧壁发光特性与其他颜色 LED 存在差异,进而造成 RGB 子像素间的角发射分布不匹配^[35]。角发射分布的不匹配性导致不同颜色子像素的角发射分布衰减速率存在差异,从而导致 RGB Micro-LED 显示系统发生角色偏现象。对于采用 UV/蓝光 LED 并添加发光介质(如量子点)以实现全彩显示的 Micro-LED,发光介质的粒径大小、分布均匀性和与 LED 的耦合效率可能在不同角度下导致不同的发光效率和色彩表现^[36-37],进而引起角色偏。为缓解 Micro-LED 的角色偏现象,进一步提升 Micro-LED 的显示质量,不少研究团队已开展相关工作,主要包括子像素结构参数的匹配、添加黑矩阵结构、设计反射结构和使用光学薄膜结构。

3 解决手段

3.1 通过子像素结构参数的匹配缓解色偏

LED 的主要结构层有衬底、n/p 型半导体层、有源

区、电子/空穴阻挡层等。通过对这些结构层厚度进行调整,可以在一定程度上提升 LED 的特定性能参数,但同时可能对其他性能造成不利影响。选择合适的 LED 结构参数可以缓解色偏。如对于具有光学微腔的 OLED,有些研究者通过调整有机层或其他层的厚度以改变光学微腔的长度,增强特定波长的光发射,同时抑制其他波长,从而有效缓解色偏现象^[25,27]。Qian 等^[38]通过调整纳米线 LED 的结构参数,不仅实现了低色偏,而且提升了光提取效率。但上述研究主要通过调整 OLED 的光学微腔腔长,或对纳米线 LED 结构层进行优化,以缓解色偏现象。由于微腔效应在 Micro-LED 中相对较弱,仅通过优化结构参数来缓解 Micro-LED 的角色偏效果可能并不如上述研究展示的那样有效。因此, Yang 等^[39]提出一种 Micro-LED 芯片尺寸匹配方法来缓解 RGB Micro-LED 阵列中色偏,成功实现 RGB Micro-LED 在 $0^\circ \sim 80^\circ$ 视角下色偏的显著降低,从 0.0201 降至 0.0030。Yang 等^[39]对不同尺寸的红光、绿光、蓝光 Micro-LED 芯片的角发射分布进行系统研究,发现随着芯片尺寸的减小,其角发射分布呈现明显的双峰现象,且双峰现象在蓝光、绿光 Micro-LED 芯片中比相同尺寸的红光 Micro-LED 芯片更加明显(图 3)。为寻找具有相似角发射分布的 Micro-LED 芯片尺寸, Yang 等定义当发光强度达到其峰值的 95% 时的宽度 (W_{95}) 和发光强度双峰的高度 (H_m) 这 2 个参数。在此基础上,进一步建立不同颜色的 Micro-LED 芯片尺寸与上述参数之间的关系曲线和线性回归方程,并依据相应的关系曲线,选择具有相似角发射分布的 Micro-LED 芯片尺寸进行匹配组合。如通过 H_m 与芯片尺寸的关系曲线,选择 25 μm 的红光 Micro-LED 芯片与 45 μm 的绿光、蓝光 Micro-LED 芯片进行匹配,将 Micro-LED 在 $0^\circ \sim 80^\circ$ 视角的色偏从 0.0201 降低至 0.0030。

通过调整 Micro-LED 的结构参数来缓解角色偏可能并不如其他显示器件的研究那样有效,需要结合其他方法改善效果。如结合 Micro-LED 尺寸参数的匹配方法,该方法能有效缓解色偏现象,且与现有的大规模转移工艺具有良好的兼容性,但还需要一些实际显示效果的实验进行验证。Yang 等^[40]还对衬底厚度

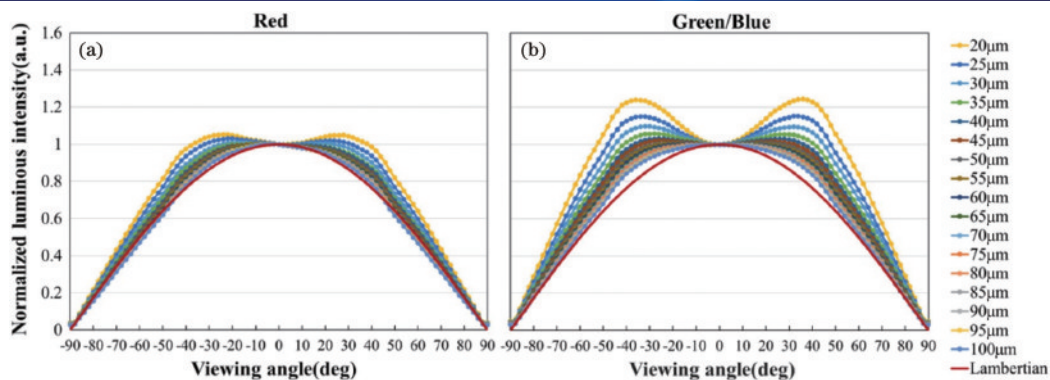


图3 不同尺寸下,红光、绿光、蓝光 Micro-LED 角发射分布^[39]。(a)红光;(b)绿光和蓝光

Fig. 3 Red, green, and blue Micro-LED angular emission distributions at different sizes^[39]. (a) Red light; (b) green and blue lights

对 Micro-LED 芯片阵列的影响进行了研究,发现具有 $90\ \mu\text{m}$ 蓝宝石衬底的 Micro-LED 阵列角色偏减少~73%,同时发光效率提高 61.4%。若能将该研究与上述 Micro-LED 芯片尺寸匹配研究相结合,有望进一步提升 Micro-LED 阵列的性能表现。

3.2 通过倾斜结构和黑矩阵结构结合缓解色偏

随着技术的不断进步,LED 芯片的尺寸趋向微型化。在 Micro-LED 显示器件中,芯片尺寸减小导致其相对表面积增大,从而使侧壁发光的比例相应增加。

此外,商用红光 Micro-LED 的材料和结构与蓝光和绿光 Micro-LED 存在差异,这种差异导致侧壁发光特性的不同,进而影响角发射分布的匹配,最终导致肉眼可辨的色偏现象。Gou 等^[26]将黑矩阵结构与具有底部倾角的 Micro-LED 结构相结合,成功抑制角色偏现象,并保持较高的光提取效率。该结构由具有倾斜角 α 的 Micro-LED 阵列和顶部黑矩阵构成,其间填充折射率为 1.5 的树脂/二氧化物材料[图 4(a)]。黑矩阵结构通常由黑色光刻胶制成,用于隔离相邻 LED,防止颜

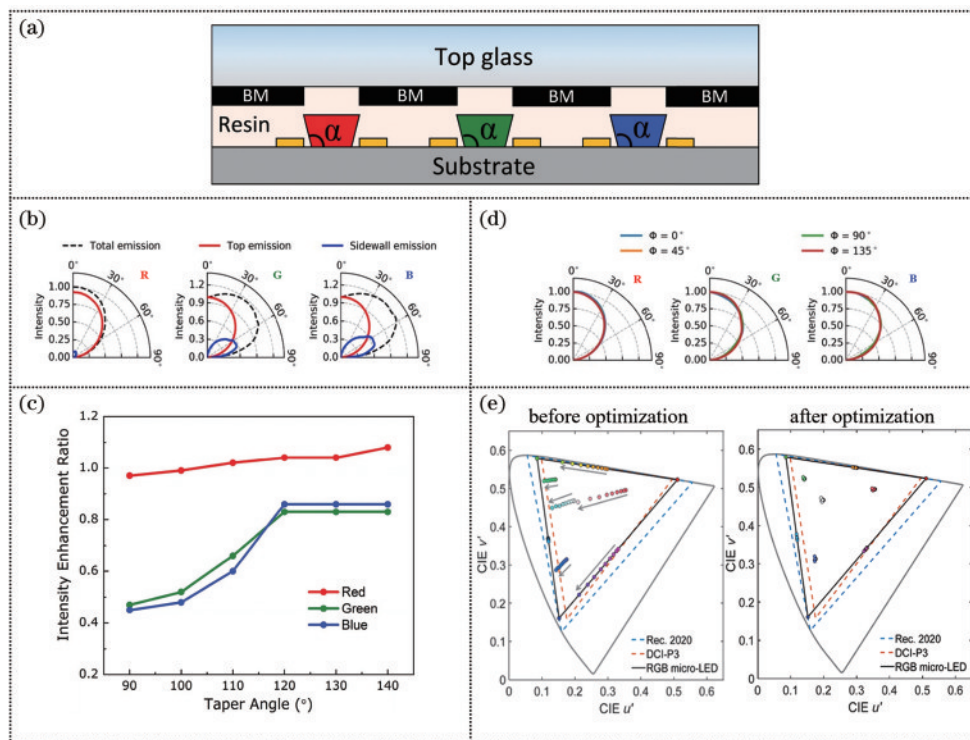


图4 结合倾斜结构和黑矩阵结构缓解色偏^[26]。(a) Micro-LED 阵列结构;(b)红光、绿光、蓝光 Micro-LED 不同角度下总发射、顶部发射、侧壁发射;(c)随 Micro-LED 底部倾角变化,各颜色光强度增强比变化;(d)不同方位角各颜色角发射分布;(e)视角 $0^\circ \sim 80^\circ$ 时 RGB Micro-LED 显示系统 10 种参考颜色的角色偏

Fig. 4 Combination of tilted structure and black matrix structure to alleviate color shift^[26]. (a) Structure of Micro-LED array; (b) total emission, top emission, and sidewall emission of red, green, and blue Micro-LEDs at different angles; (c) changes in the light intensity enhancement ratio of each color with the variation of the inclination angle at the bottom of Micro-LED; (d) angular emission distributions of different colors at different azimuth angles; (e) angular color shifts of 10 reference colors in the RGB Micro-LED display system when viewing angle is $0^\circ \sim 80^\circ$

色串扰,并提升显示器的对比度。由于材料和结构的差异,蓝光和绿光 Micro-LED 相较于红光 Micro-LED 具有更高的侧壁发射比例[图 4(b)]。

Gou 等^[26]利用黑矩阵结构吸收蓝光和绿光 Micro-LED 的侧壁发光,实现角发射分布的匹配,从而使色偏降低至肉眼难以察觉的水平,但光学效率会相应下降。为平衡色偏和光学效率,采用具有倾斜角 α 的 Micro-LED 结构,发现当倾角 α 从 90° 变化至 140° 时,蓝光和绿光 LED 的发光强度先增加后趋于饱和,而红光 LED 的发光强度变化较小[图 4(c)]。对于大于 130° 的大角度倾角,蓝光和绿光 LED 的顶部角发射分布会变窄。综合考虑各种因素,最优的倾角 α 为 120° 。黑矩阵结构的存在可以有效抑制 Micro-LED 显示屏在不同方位角 ϕ 下出现的色偏,实现匹配的 RGB 角发射分布[图 4(d)]。具有黑矩阵和倾角为 120° 结构的 RGB Micro-LED 的色偏程度显著降低[图 4(e)]。在视角为 80° 时,平均色偏从原来的 0.061 降至 0.005,最大色偏从原来的 0.169 降至 0.014,低于肉眼可观察到的 0.02,同时光提取效率约保持为原有器件的 85%,实现了低色偏与较高光提取效率之间的平衡。

Gou 等^[26]充分利用黑矩阵结构的吸收特性,有效消除 RGB Micro-LED 各颜色之间的侧壁发光差异,从而减轻角色偏现象。然而,黑矩阵结构吸收的侧壁发光占据总体发光的相当一部分,这导致添加黑矩阵结

构后 Micro-LED 的光学效率显著下降。通过对黑矩阵结构进行优化设计,这一问题有望得到解决。例如,Zhang 等^[41]提出一种新型黑矩阵结构,该结构具有内部和外部反射界面,能实现对黑矩阵结构吸收光的回收和再利用。若将此设计与 Gou 等^[26]的研究进一步结合,有望实现 Micro-LED 更为优异的性能表现。

3.3 通过添加反射结构缓解色偏

相较于 Gou 等^[26]使用黑矩阵结构吸收侧壁发光,Liu 等^[42]使用一种图案化锥形结构的反射层,实现反射并利用侧壁发光。该结构在维持原有朗伯分布的前提下,显著提升了红光、绿光和蓝光 Micro-LED 顶部发射光的提取效率,分别提高 16%、161% 和 228%,而且 RGB Micro-LED 显示屏在视角为 $10^\circ \sim 90^\circ$ 时的色偏均在 0.02 以下。2022 年,Hu 等^[43]设计一种全向反射器结构,该结构能有效利用侧壁发光,并提高整体光提取效率。由于具有 Ag 反射层的 Micro-LED 角度调节作用有限,Liu 等^[42]在其研究基础上进一步设计图案化锥形结构[图 5(a)],以抑制 Micro-LED 的色偏。其中锥形结构高度的变化会影响锥形结构的倾角,进而改变光的反射方向。对于蓝光 Micro-LED 而言,随着锥形高度的增加,其顶部发射光的提取效率得到提升,同时侧壁发射得到有效抑制[图 5(b)]。通过精细调节图案化锥形结构的 Ag 反射层,可以实现 RGB Micro-LED 光提取效率的提高,使得红光、绿光和蓝光

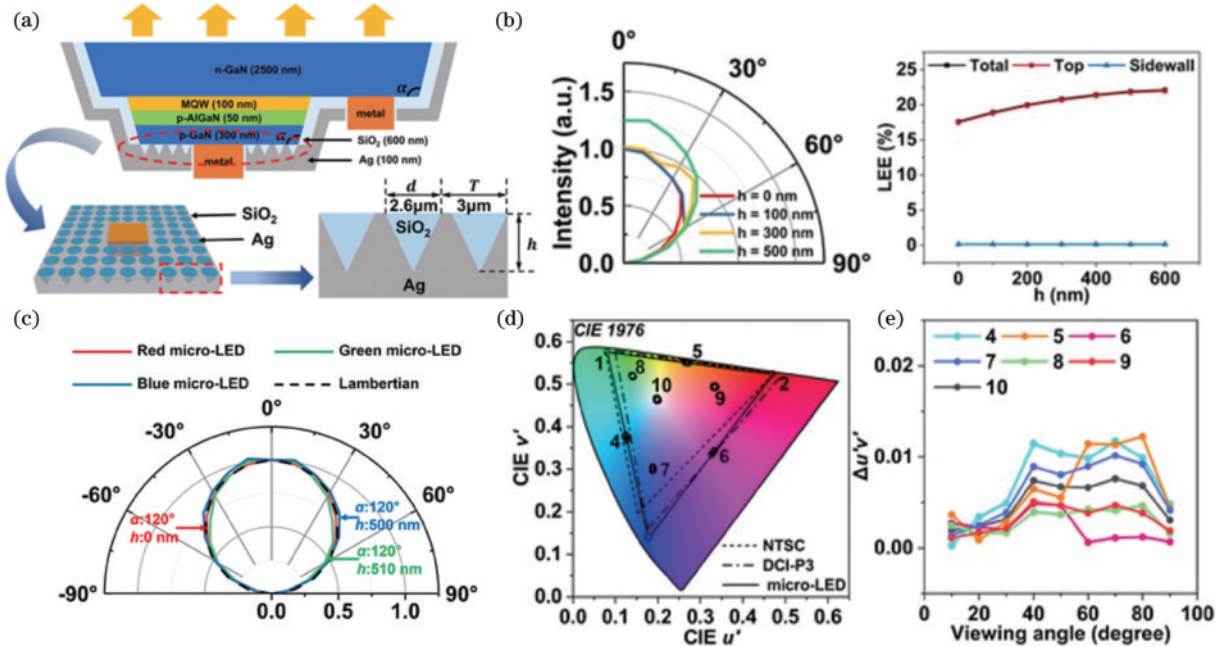


图 5 图案化锥形结构的 Ag 反射层结构^[42]。(a) 蓝光 Micro-LED 结构;(b) 蓝光 Micro-LED 的发光强度角分布和光提取效率随锥形高度的变化;(c) 符合朗伯余弦定律的红光、绿光、蓝光 Micro-LED 的发光强度角分布和参数;(d) 视角为 $10^\circ \sim 90^\circ$ 时 RGB Micro-LED 显示系统 10 种参考颜色的角色偏;(e) 视角为 $10^\circ \sim 90^\circ$ 时 7 种相应颜色的角色偏值

Fig. 5 Ag reflective layer structure with patterned conical structure^[42]. (a) Structure of blue Micro-LED; (b) variation in angular distribution of luminescence intensity and light extraction efficiency of blue Micro-LED with cone height; (c) angular distribution and parameters of the luminescence intensity of red, green, and blue Micro-LEDs that comply with Lambert's cosine law; (d) angular color shifts of 10 reference colors in the RGB Micro-LED display system when viewing angle is $10^\circ \sim 90^\circ$; (e) angular color shift values of 7 corresponding colors when viewing angle is $10^\circ \sim 90^\circ$

Micro-LED 的发光强度角分布符合朗伯余弦定律[图 5(c)]。此外,在视角为 $10^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 时,7 个参考颜色点的色偏显著降低,最大色偏低于 0.02[图 5(d)、(e)]。与传统 Micro-LED 相比,红光、绿光和蓝光 Micro-LED 顶部发射的光提取效率均得到提升。

分布式布拉格反射器(DBR)是一种由高折射率和低折射率材料周期性堆叠而成的反射器。当光波通过 DBR 时,对于特定波长的光表现为高反射,而对其他波长的光表现为低反射。Lee 等^[44]将 DBR 技术与光学填料相结合,成功将 RGB OLED 在 60° 视角下的色偏降至 0.017,若能对 DBR 结构进行优化,有望进一步抑制色偏现象。Miao 等^[45]通过调整 DBR 结构层的厚度,改进传统 DBR 结构,有效抑制红光 Micro-LED 的蓝移现象,并将色偏降低 42%。DBR 结构通过周期性堆叠不同折射率的材料,实现对特定波长光波的选择性透过,

允许特定波长的光波反射或透射[图 6(a)]。传统 DBR 结构由周期性的 62 nm TiO_2 层和 92 nm SiO_2 层组成。改进的 DBR 结构包括 2 种:第 1 种是优化高反射和低反射材料的厚度;第 2 种则是在第一种改进的基础上,进一步调整第一对和最后一对高/低折射率材料的厚度[图 6(b)]。对于 InGaN 红光 Micro-LED,传统 DBR 结构在 630 nm 以上波长处出现波纹,导致光谱多峰现象,影响颜色稳定性[图 6(c)]。改进的 DBR 结构减少了波纹:第 1 种仅在 700 nm 处有小波纹;第 2 种则进一步减少波纹并增强电致发光(EL)发射。与未采用 DBR 结构的红光 Micro-LED 相比:传统 DBR 结构增加 67% 的色偏;第 1 种改进的 DBR 结构降低 38% 的色偏;第 2 种改进的 DBR 结构降低 42% 的色偏[图 6(d)]。因此,对 DBR 结构进行优化,并结合其他光学填料,可能是一种有效抑制 Micro-LED 角色偏的策略。

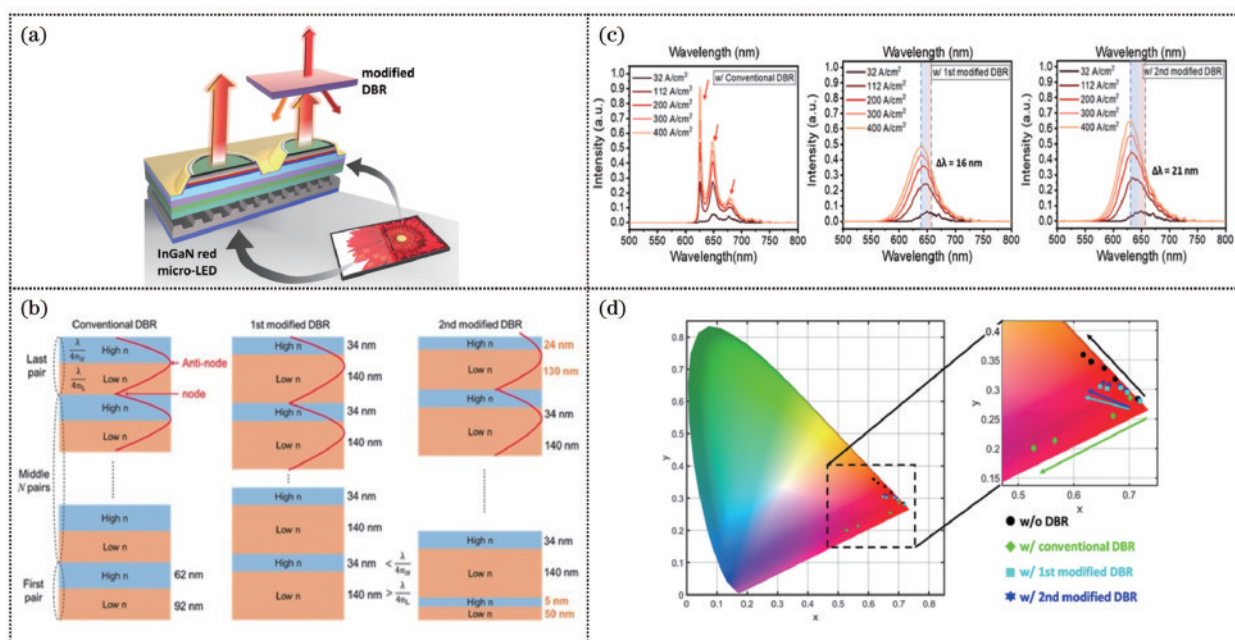


图6 改良的DBR结构^[45]。(a)改良DBR对红光Micro-LED作用示意图;(b)传统DBR结构、第一种改进的DBR结构、第二种改进的DBR结构;(c)不同电流密度下,不同DBR结构的EL光谱变化;(d)具有不同DBR的红光Micro-LED的色偏
Fig. 6 Improved DBR structures^[45]. (a) Schematic diagram of the effect by improved DBR on red Micro-LED; (b) conventional DBR structure, the 1st improved DBR structure, and the 2nd improved DBR structure; (c) changes in EL spectra of different DBR structures under different current densities; (d) color shifts of red Micro-LED with different DBRs

通过使用不同设计的Ag反射层,可以实现RGB Micro-LED角发射分布匹配,有效缓解Micro-LED角色偏。然而,Ag反射层在实际生产应用中面临较多挑战。将Ag反射层沉积于倾斜的Micro-LED侧壁可能沉积不完整,导致Ag反射层不连续,引起侧壁漏光现象,从而影响显示效果。此外,由于后续还需进行图案化处理,沉积的Ag反射层可能难以达到理想的规整度,从而无法达到预期的反射效果。尽管如此,随着技术的不断进步,这些问题有望得到解决。对DBR结构进行优化,并结合光学填料的使用,也许能有效抑制Micro-LED角色偏,但这一方向仍需进一步的研究与探索。

3.4 通过光学薄膜结构缓解色偏

根据功能和结构特性,光学薄膜可分为棱镜片、偏振片和滤光片等多种类型,通过合理设计并与显示器件集成,这些薄膜能在一定程度上缓解色偏现象。Park 等^[46]提出一种抛物线形凹槽的光学薄膜,该薄膜能将LCD的角色偏减少 50%。Dou 等^[47]提出一种带有微棱镜光学薄膜的LCD显示系统,该系统能将LCD的最大色偏从 0.027 降低至 0.006。Xu 等^[48]则将光栅与圆形偏振器相结合,使 OLED 的色域更广,并缓解角色偏现象。光学薄膜在缓解 LCD 和 OLED 色偏方面已取得诸多成果,然而在 Micro-LED 色偏缓解

方面的研究工作相对滞后,仅有一些初步尝试。例如,Kang 等^[49]通过优化 Micro-OLED 的彩色滤光片的尺寸、宽度和像素尺寸,得出最小色偏的设计参数,实现在 30°视角下的色偏低于 0.02。Ji 等^[50]则研究不同波长的蓝光 Micro-LED 对量子点颜色转换层性能的影响,并对比不同类型滤光片在减少蓝光泄漏、提高色域覆盖范围和改善颜色转换效率方面的性能差异。滤光片的选择对量子点颜色转换层的整体性能具有显著影响,特别是在不同波长蓝光激发下,滤光片的透光特性和蓝光过滤能力直接影响最终的颜色表现。然而,传统的滤光片方法虽然能提高色纯度,但材料吸收导致大量能量损失,从而降低光转换效率^[51]。为解决这一

问题,Ye 等^[51]提出一种回收反射色纯度增强膜(RCPEF),通过反射未被量子点吸收的蓝光,使其重新回到量子点层进行再吸收和再激发(图 7),从而显著减少蓝光泄漏,并有效减少色偏现象,使得显示的颜色更加准确和纯净。结果表明,未使用 RCPEF 时,绿光的颜色偏向青色,红光的颜色偏向品红色,而使用 RCPEF 后,这些色偏现象得到显著改善,同时绿光和红光的光转换效率分别提高 1.97 倍和 1.46 倍。尽管目前在 Micro-LED 角色偏缓解方面的研究仍处于探索阶段,但光学薄膜技术的引入为解决这一问题提供了新的思路和方法,有望在未来实现更高质量的 Micro-LED 显示效果。

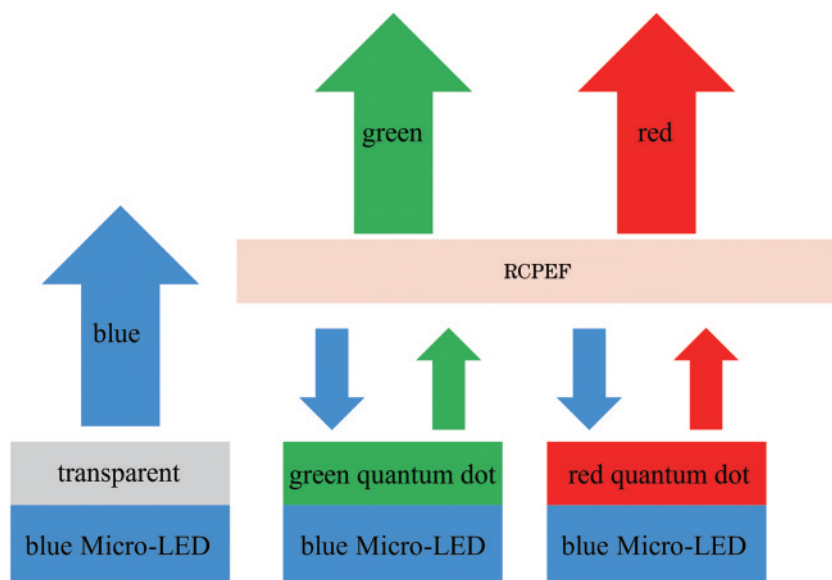


图 7 RCPEF 色纯度的改善原理^[51]

Fig. 7 Improvement principle of RCPEF color purity^[51]

各种缓解 Micro-LED 色偏的解决手段汇总如表 1 所示。在 Micro-LED 中,角色偏现象产生的原因主要是不同颜色的角发射分布衰减速率不一致,导致角发

射分布之间不匹配。对于其他显示器件而言,可以通过调整其结构参数缓解角色偏,且保持较好的光学性能^[25,27,38]。对于 Micro-LED 而言,仅通过优化其结构

表 1 缓解角色偏的方法对比

Table 1 Comparison of methods to alleviate angular color shift

Device type	Method	Result	Ref.
Micro-LED	Combination of inclined structure and black matrix structure	Average color shift at 80° viewing angle is 0.005	[26]
Micro-LED	Use different sizes of red, green, and blue Micro-LED	At viewing angle of 0°–80°, the color shift decreases from 0.0201 to 0.0030	[39]
Micro-LED	Add sapphire substrate	Compared to no substrate structure, the angular color shift has been reduced by ~73%	[40]
Micro-LED	Patterned conical Ag reflective layer structure	Color shift at 10°–90° viewing angle is less than 0.02	[42]
Micro-LED	Optimize DBR structural parameters	Compared to red Micro-LED without DBR structure, color shift is reduced by 42%	[45]
Micro-OLED	Optimize the structural parameters of color filter	Color shift at a 30° viewing angle is less than 0.02	[49]
Micro-LED	Blue light wavelength optimization and color filter comparison	Using longer wavelength blue light can alleviate color shift	[50]
Micro-LED	Use RCPEF	Red/Green light is purer and alleviates the corresponding color shift	[51]

参数可能效果并不明显,需要结合如 Micro-LED 芯片尺寸匹配等方法^[39-40]来缓解相应的角色偏。对于由侧壁发射差异引起的角发射分布不匹配现象,可以采用如黑矩阵或 Ag 反射层来消除侧壁发射差异^[26,42],从而实现角发射分布匹配,以达到缓解角色偏的目的。其中,黑矩阵结构会牺牲部分光学效率,因此需要与其他设计相结合,以维持较高的光学效率。此外,还可以在器件外添加适当的特殊结构,如 DBR 反射器或光学薄膜等^[45,49-51],通过改变光的原始分布来缓解角色偏现象,但这些结构在缓解 Micro-LED 角色偏方面的研究仍需进一步的优化和探索。

4 结 论

Micro-LED 因其优异性能成为近年来的研究热点之一,而角色偏现象使大屏 Micro-LED 显示器在不同视角下呈现颜色偏差与不均匀性,影响用户的视效体验。本文综述了 Micro-LED 角色偏的主要影响因素和物理机制,并对现有文献中关于缓解角色偏的内容进行总结,为缓解 Micro-LED 角色偏提供一定的解决思路。

在 Micro-LED 显示系统中,微腔效应通常相对较弱。因此,角色偏主要归因于不同颜色子像素之间的角发射分布不匹配。为缓解 Micro-LED 的角色偏现象,未来的研究方向可以从 LED 结构设计、黑矩阵结构优化、反射结构的优化设计和性能更优的光学薄膜等方向进行。从 LED 自身结构出发,对整体或部分结构进行设计调整,实现各颜色的角发射分布匹配,以缓解角色偏现象。黑矩阵结构虽然能吸收侧壁发光,但其吸收的侧壁发光占据 Micro-LED 发射光的很大一部分,导致光学效率显著降低。因此,对黑矩阵吸收光能的再利用进行深入研究,是平衡低色偏和较高光学效率的关键。在 Micro-LED 上添加图案化设计的反射层,能减少不同颜色 Micro-LED 间侧壁发光的差异,但在应用实现方面还存在一定的挑战。通过优化 DBR 的结构设计,并将其与光学填料相结合,有望实现更优异的性能表现。设计和制造性能更优的光学薄膜结构,也是一个值得深入探究的研究方向。通过集成高性能的光学薄膜与 Micro-LED,改变原有的光分布,可实现缓解角色偏的目的。随着对角色偏问题研究的不断深入,将进一步提升 Micro-LED 的性能,拓宽其应用领域,并为 Micro-LED 产业的繁荣发展注入新的动力。

参 考 文 献

- [1] Zhang K, Liu Y B, Kwok H S, et al. Investigation of electrical properties and reliability of GaN-based micro-LEDs[J]. Nanomaterials, 2020, 10(4): 689.
- [2] Zhou X J, Tian P F, Sher C W, et al. Growth, transfer printing and colour conversion techniques towards full-colour micro-LED display[J]. Progress in Quantum Electronics, 2020, 71: 100263.
- [3] Chen Z, Yan S K, Danesh C. MicroLED technologies and applications: characteristics, fabrication, progress, and challenges[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2021, 54(12): 123001.
- [4] Liu Z J, Lin C H, Hyun B R, et al. Micro-light-emitting diodes with quantum dots in display technology[J]. Light: Science & Applications, 2020, 9: 83.
- [5] Wu T Z, Sher C W, Lin Y, et al. Mini-LED and micro-LED: promising candidates for the next generation display technology[J]. Applied Sciences, 2018, 8(9): 1557.
- [6] Huang Y G, Tan G J, Gou F W, et al. Prospects and challenges of mini-LED and micro-LED displays[J]. Journal of the Society for Information Display, 2019, 27(7): 387-401.
- [7] Huang Y G, Hsiang E L, Deng M Y, et al. Mini-LED, Micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives[J]. Light: Science & Applications, 2020, 9: 105.
- [8] Hsiang E L, Yang Z Y, Yang Q, et al. Prospects and challenges of mini-LED, OLED, and micro-LED displays[J]. Journal of the Society for Information Display, 2021, 29(6): 446-465.
- [9] Jin S X, Li J, Li J Z, et al. GaN microdisk light emitting diodes[J]. Applied Physics Letters, 2000, 76(5): 631-633.
- [10] Jiang H X, Jin S X, Li J, et al. III-nitride blue microdisplays[J]. Applied Physics Letters, 2001, 78(9): 1303-1305.
- [11] Day J, Li J, Lie D Y C, et al. III-Nitride full-scale high-resolution microdisplays[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(3): 031116.
- [12] Han H V, Lin H Y, Lin C C, et al. Resonant-enhanced full-color emission of quantum-dot-based micro LED display technology[J]. Optics Express, 2015, 23(25): 32504-32515.
- [13] Horng R H, Chien H Y, Tarntair F G, et al. Fabrication and study on red light micro-LED displays[J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2018, 6: 1064-1069.
- [14] Shin J, Kim H, Sundaram S, et al. Vertical full-colour micro-LEDs via 2D materials-based layer transfer[J]. Nature, 2023, 614(7946): 81-87.
- [15] Tian P F, McKendry J J D, Gu E D, et al. Fabrication, characterization and applications of flexible vertical InGaN micro-light emitting diode arrays[J]. Optics Express, 2016, 24(1): 699-707.
- [16] Liu X Y, Tian P F, Wei Z X, et al. Gbps long-distance real-time visible light communications using a high-bandwidth GaN-based micro-LED[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(6): 7204909.
- [17] Goßler C, Bierbrauer C, Moser R, et al. GaN-based micro-LED arrays on flexible substrates for optical cochlear implants[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014, 47(20): 205401.
- [18] Horng R H, Ye C X, Chen P W, et al. Study on the

- effect of size on InGaN red micro-LEDs[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 1324.
- [19] Zhou Y J, Yang T X, Li J, et al. Size and temperature effects on optoelectronic properties of Micro-LED arrays for display applications[J]. Displays, 2024, 85: 102841.
- [20] 胡新培, 蔡俊虎, 叶媛媛, 等. 高光效 GaN 基 Micro-LED 仿真模型研究[J]. 光学学报, 2022, 42(15): 1525001.
Hu X P, Cai J H, Ye Y Y, et al. Simulation model of GaN-based Micro-LED with high light extraction efficiency[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(15): 1525001.
- [21] 殷录桥, 张雪松, 任开琳, 等. 考虑小尺寸效应的 Micro-LED 驱动结构设计[J]. 光学学报, 2023, 43(2): 0223003.
Yin L Q, Zhang X S, Ren K L, et al. Design of Micro-LED driving structure considering small size effect[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(2): 0223003.
- [22] 黄丽香, 韩冰, 闫龙, 等. 微型发光二极管全彩色显示研究进展(特邀)[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(1): 0125001.
Huang L X, Han B, Yan L, et al. Research progress in full-color display of micro-light-emitting diode (invited)[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(1): 0125001.
- [23] Wu Y F, Ma J S, Su P, et al. Full-color realization of micro-LED displays[J]. Nanomaterials, 2020, 10(12): 2482.
- [24] Xie Y J, Lin X, Lang T F, et al. High-yield Micro-LED laser transfer accomplished using an ablation-type release material[J]. APL Materials, 2024, 12(10): 101111.
- [25] Kim E, Chung J, Lee J, et al. A systematic approach to reducing angular color shift in cavity-based organic light-emitting diodes[J]. Organic Electronics, 2017, 48: 348-356.
- [26] Gou F W, Hsiang E L, Tan G J, et al. Angular color shift of micro-LED displays[J]. Optics Express, 2019, 27(12): A746-A757.
- [27] Tan G J, Lee J H, Lin S C, et al. Analysis and optimization on the angular color shift of RGB OLED displays[J]. Optics Express, 2017, 25(26): 33629-33642.
- [28] Ohno Y. CIE fundamentals for color measurements[C]// Proceedings of the IS&T's NIP16: International conference on digital printing technologies: IS&T's NIP16: International Conference on Digital Printing Technologies, October 15-20, 2000, Vancouver, BC, Canada. [S.l.: s. n.], 2000.
- [29] Luo M R. Encyclopedia of color science and technology [M]. New York: Springer, 2016.
- [30] Tien K C, Wu Y C, Liao C H, et al. 28.1: premium picture quality by super-multi-domain polymer sustained alignment LCD technology[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2012, 43(1): 371-374.
- [31] Liu Y F, Lan Y F, Hong Q, et al. Compensation film designs for high contrast wide-view blue phase liquid crystal displays[J]. Journal of Display Technology, 2014, 10(1): 3-6.
- [32] Chen E G, Zhao M Y, Chen K K, et al. Metamaterials for light extraction and shaping of micro-scale light-emitting diodes: from the perspective of one-dimensional and two-dimensional photonic crystals[J]. Optics Express, 2023, 31(11): 18210-18226.
- [33] Horng R H, Chien H Y, Chen K Y, et al. Development and fabrication of AlGaInP-based flip-chip micro-LEDs [J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2018, 6: 475-479.
- [34] Liu Z Y, Wang K, Luo X B, et al. Precise optical modeling of blue light-emitting diodes by Monte Carlo ray-tracing[J]. Optics Express, 2010, 18(9): 9398-9412.
- [35] Gou F W, Hsiang E L, Wu S T. Angular color shift and power consumption of RGB micro-LED displays[J]. Semiconductors and Semimetals, 2021, 106: 323-344.
- [36] 陈定安, 沈里, 张家雨, 等. 胶体 CdSe 量子点的色度学特性研究[J]. 物理学报, 2007, 56(11): 6340-6344.
Chen D A, Shen L, Zhang J Y, et al. Colorimetric study of colloidal CdSe quantum dots[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(11): 6340-6344.
- [37] Song Y, Liu R X, Wang Z B, et al. Enhanced emission directivity from asymmetrically strained colloidal quantum dots[J]. Science Advances, 2022, 8(8): eabl8219.
- [38] Qian Y Z, Yang Z Y, Huang Y H, et al. Directional high-efficiency nanowire LEDs with reduced angular color shift for AR and VR displays[J]. Opto-Electronic Science, 2022, 1(12): 220021.
- [39] Yang S M, Chao C H, Chen Y S, et al. Design and simulation of light field patterns for angular color variation reduction in micro-LED and mini-LED RGB arrays[J]. Applied Optics, 2024, 63(10): 2503-2508.
- [40] Yang S M, Wang P H, Chao C H, et al. The substrate thickness dependence on micro LED chip arrays[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2019, 50(1): 1724-1727.
- [41] Zhang X, Chen A L, Yang T, et al. Tripling light conversion efficiency of μ LED displays by light recycling black matrix[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(2): 7014207.
- [42] Liu Y Z, Xia T W, Du A C, et al. Omnidirectional color shift suppression of full-color micro-LED displays with enhanced light extraction efficiency[J]. Optics Letters, 2023, 48(7): 1650-1653.
- [43] Hu X P, Cai J H, Liu Y Z, et al. Design of inclined omni-directional reflector for sidewall-emission-free micro-scale light-emitting diodes[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 154: 108335.
- [44] Lee B W, Ju Y G, Hwang Y I, et al. Micro-cavity design of bottom-emitting AMOLED with white OLED and RGBW color filters for 100% color gamut[J]. Journal of the Society for Information Display, 2009, 17(2): 151-157.
- [45] Miao W C, Hong Y H, Hsiao F H, et al. Modified distributed Bragg reflectors for color stability in InGaN red micro-LEDs[J]. Nanomaterials, 2023, 13(4): 661.
- [46] Park S S, Sohn I, Cho E, et al. Color shift reduction of liquid crystal displays by controlling light distribution using a micro-lens array film[J]. Journal of Display Technology, 2012, 8(11): 643-649.
- [47] Dou H, Wang L, Zhang S D. A brightness-enhanced and

- low color shift optical film with micro-prism for LCD and OLED[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11617: 1161711.
- [48] Xu W F, Hong C T, Kuo C K. Reducing angular color shift in RGB OLEDs by the introduction of a circular polarizer with a diffractive optical element[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2019, 50(1): 1932-1934.
- [49] Kang D W, Cho S H, Shim S M, et al. The study on minimizing angular color shift in high resolution Micro-OLED with Color Filter[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2022, 53(S1): 198-201.
- [50] Ji J W, Dai B L, Zhang S Y, et al. Optimizing peak light-emitting-diode (LED) wavelengths for enhanced color performance and visual health in blue micro-LED displays with color-conversion layers[J]. ACS Applied Optical Materials, 2024, 2(7): 1277-1286.
- [51] Ye Z T, Wu J Y. Use of recycling-reflection color-purity enhancement film to improve color purity of full-color micro-LEDs[J]. Nanoscale Research Letters, 2022, 17: 1.