

文章编号: 1000-7032(2025)08-1485-11

电热耦合作用下 Mini/Micro-LED 三基色色品坐标变化规律研究

黄研培¹, 王 鹏¹, 庄庆瑞², 史 园², 陈跃奋³, 杨 旭^{1,3},
李金钊^{1,3*}, 黄 凯^{1,3*}

(1. 厦门大学 物理科学与技术学院, 微纳光电子材料与器件教育部工程研究中心,

福建省半导体材料及应用重点实验室, 福建 厦门 361005;

2. 厦门市产品质量监督检验院, 福建 厦门 361000;

3. 嘉庚创新实验室 厦门市未来显示技术研究院, 福建 厦门 361000)

摘要: 微型发光二极管 (Mini/Micro-light emitting diode, Mini/Micro-LED) 显示技术应用场景不断扩展, 使其常工作于很宽的温区和电流密度范围。然而, 环境温度和电流密度的变化都将不可避免地引起 LED 发光特性发生变化, 从而导致三基色色品坐标偏移、色域发生改变, 严重影响显示器件的显色性能。本文通过系统分析红绿蓝 (Red-Green-Blue, RGB) 三色 Mini/Micro-LED 在不同温度和注入电流密度下发光特性的变化规律, 深入探讨了电热耦合作用下 Mini/Micro-LED 三基色色品坐标变化规律, 及其构成的显示器数字电影倡导-协议 3 (Digital Cinema Initiatives-Protocol 3, DCI-P3) 色域覆盖率变化趋势。研究发现, 温度升高使得三色 LED 色品坐标同步偏移, 色域覆盖率仅略微减小; 而注入电流密度增大则导致色域覆盖率大幅下降, 最高降幅可达 15%。表明注入电流密度对 LED 色域的负面影响比环境温度更为严重。因此, 在 Mini/Micro-LED 显示技术研发过程中, 除了关注 LED 显示屏的热管理以降低环境温度因素对色彩性能的影响, 还需重点优化电流调控策略, 对电流密度变化引入动态色域补偿算法, 以提升显示效果。

关键词: 微型发光二极管; 色品坐标; 色域

中图分类号: TN312.8 文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20250086 CSTR: 32170.14.CJL.20250086

Experimental Investigation of RGB Chromaticity Shift in Mini/Micro-LEDs Under Electro-thermal Coupling Effect

HUANG Yanpei¹, WANG Peng¹, ZHUANG Qingrui², SHI Yuan², CHEN Yuefen³,
YANG Xu^{1,3}, LI Jinchai^{1,3*}, HUANG Kai^{1,3*}

(1. Engineering Research Center of Micro-nano Optoelectronic Materials and Devices, Ministry of Education, Fujian Key Laboratory of Semiconductor Materials and Applications, College of Physical Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Xiamen Products Quality Supervision and Inspection Institute, Xiamen 361000, China;

3. Future Display Institute, Tan Kah Kee Innovation Laboratory, Xiamen 361000, China)

* Corresponding Authors, E-mail: jinchaili@xmu.edu.cn; k_huang@xmu.edu.cn

Abstract: The expanding application scenarios of Mini/Micro-light emitting diode display technology require operation across wide temperature ranges and current density conditions. However, variations in ambient temperature and driving current inevitably alter LED emission characteristics, leading to chromaticity coordinate shifts in Red-Green-Blue primaries and distortion of the color gamut, significantly degrading display color performance. In this work, the

收稿日期: 2025-03-21; 修订日期: 2025-04-07

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFF0609504); 厦门市重大科技项目 (3502Z20231048)

Supported by National Key Research and Development Program of China (2022YFF0609504); Key Scientific and Technological Program of Xiamen (3502Z20231048)

electro-thermal coupling effects on chromaticity coordinate evolution and the resultant Digital Cinema Initiatives-Protocol 3 color gamut coverage ratio are systematically studied by analyzing the emission optical properties of red, green, and blue Mini/Micro-LEDs under different temperatures and current densities. Experimental results demonstrate that temperature elevation induces synchronous chromaticity coordinate shifts across all three primary colors, with only a minor reduction in color gamut coverage (less than 2%). In contrast, increased current density causes significant color gamut degradation, reaching a maximum reduction of 15%. These findings highlight that current density variation exerts a more severe impact on color performance than ambient temperature. Consequently, in developing Mini/Micro-LED displays, alongside thermal management strategies to mitigate temperature effects, it is critical to optimize current regulation schemes and implement dynamic color gamut compensation algorithms to counteract current-induced chromaticity deviations, thereby enhancing overall display quality.

Key words: Mini/Micro-light emitting diode; color coordinates; color gamut

1 引 言

微型发光二极管具有高亮度、高能效、快速响应、宽工作温区、高可靠性以及长寿命等卓越性能,其芯片尺寸通常小于 $200\text{ }\mu\text{m}$ ^[1-5]。利用尺寸仅为百微米、数十微米甚至数微米的发光二极管(Light emitting diode, LED)单元进行直接发光成像,通常称之为 Mini/Micro-LED 显示技术,在多个应用领域展现出巨大的优势和广阔的应用前景^[6-8]。在商显拼接显示、室内高清显示领域,Mini/Micro-LED 的自发光、高亮度以及高分辨率特性能够实现更加清晰、细腻的图片显示,满足商业广告、会议展示等对视觉效果的高要求。在车载显示领域,则受益于 Mini/Micro-LED 的宽工作温区、高可靠性以及长寿命,使其能够在复杂的车载环境中稳定工作。在可穿戴显示和虚拟现实/增强现实(Virtual reality/Augmented reality, VR/AR)显示领域,Mini/Micro-LED 的快速响应和高亮度特性能够满足虚拟现实和增强现实设备对显示效果的苛刻要求,为用户带来更加沉浸式的体验^[9-16]。因此,近年来吸引了众多研究机构和企业的高度关注,并快速推动了 Mini/Micro-LED 显示技术的发展。例如,2020 年起,三星陆续推出不同尺寸 Micro-LED 电视^[17];2021 年,利亚德与华星光电(The Creative Life, TCL)合作,发布了玻璃基透明直显 Mini-LED 屏和 75 英寸 P0.6 氧化物主动矩阵式驱动(Active matrix, AM)直显 Micro LED 电视^[18]。同年,国星光电推出了一款超小像素间距的 Mini LED 直显产品,采用先进的多合一封装技术,大幅提升了显示效率,具备高对比度、高亮度等优势,并支持超高清无缝拼接,适用于新一代高端显示应用^[19]。2024 年,Meta 于 Meta Connect

2024 大会上公开了采用硅基 Micro-LED(LED oS)技术的全彩 AR 眼镜原型 Orion^[20]。同年,厦门大学、厦门市未来显示技术研究院和天马微电子组成的联合研发团队提出了提升转移效率与良率的新方法和新技术,成功制造出像素密度高达 403 PPI 的超视网膜显示薄膜晶体管(Thin film transistor, TFT)基 Micro-LED 全彩屏^[21]。2024 年,辰显光电在国际信息显示学会显示周(SID DW 2024)上展示了 88 英寸 P0.5 TFT 基 Micro-LED 拼接屏^[22]。2025 年,三星显示(SDC)在 2025 年国际消费类电子产品展览会(International Consumer Electronics Show, CES)上展示了其首款 Micro-LED 可穿戴显示屏原型,其峰值亮度高达 4 000 尼特^[23]。

随着 Mini/Micro-LED 显示技术的发展,其应用领域和范围不断扩展,LED 显示屏在不同应用场景下面临着多种工作条件的考验。其中,工作环境温度跨度大、工作电流密度范围大是户外商显和车载显示领域所面临的主要挑战。红绿蓝(Red-Green-Blue, RGB)三色 Mini/Micro-LED 芯片作为关键的发光元件,其发光特性直接决定了显示屏的显示性能。然而,大量的研究表明,LED 的发光波长、发光峰半高宽、发光强度等特性都不可避免地随温度、注入电流密度等工作条件的变化而改变,使得显示屏在工作环境温度和工作电流密度发生改变时色坐标偏离初始设定值,引起色度偏差^[24-27],从而 RGB 颜色失衡,影响显示质量和用户体验^[28]。此外,温度对 RGB 三色 LED 发光强度的影响程度有较大的差异,将导致显示屏的白平衡发生漂移^[29],进而影响整体显示质量。关于温度变化对 LED 显示屏白平衡漂移的影响规律、

白平衡点的控制与配平关系,已有一定的研究^[29-30],而注入电流变化引起的色坐标偏移规律的研究和报道相对较少。为此,本文在系统分析 RGB 三色 Mini/Micro-LED 在不同温度和注入电流密度下发光特性变化规律的基础上,深入探讨电热耦合作用下 Mini/Micro-LED 三基色色品坐标及其构成的显示器数字电影倡导-协议 3(Digital Cinema Initiatives-Protocol 3, DCI-P3)色域覆盖率变化趋势。

2 实 验

本文针对 Mini-LED 显示和 Micro-LED 显示应用分别选取了三安光电生产的芯片尺寸为 $75\ \mu\text{m} \times 178\ \mu\text{m}$ 的 RGB 三色 Mini-LED 和乾照光电生产的尺寸为 $15\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$ 的 RGB 三色 Micro-LED 商用产品作为研究对象,蓝绿光 Mini/Micro-LED 为 In-GaN 材料体系,红光 Mini/Micro-LED 为 AlGaInP 材料体系,均为倒装芯片结构。为避免封装材料对器件散热的影响,本文对单颗未封装的 Mini-LED 裸晶芯片进行测试,而 Micro-LED 因芯片尺寸小,均各自通过巨量转移技术转移至 TEG 板(玻璃上镀金)上,再通过固晶胶固至独立的 TO 支架上进行测试。

同时,为减小实验过程中注入电流对 LED 器

件结温的影响,使用导热胶将测试样品贴合于液氮冷却的温控平台(Lakeshore Model 336)上,确保样品与热沉紧密接触后对器件样品进行温控,并在多次测试期间留足冷却时间,避免热量累积,以提升实验数据的准确性和可重复性。同时,采用持续直流电流源(Keithley 2400)驱动 LED 以符合 LED 显示屏的工作状况,通过光谱仪(QE Pro)对样品进行变温变电流的电致发光谱(Electroluminescence, EL)测试。由于户外显示和车载显示应用场景中,在不同季节其工作环境温度通常可低至零下 $20\ ^\circ\text{C}$ 、高至 $60\ ^\circ\text{C}$,因此在实验过程中,温度变化范围设定于 $240\sim 400\ \text{K}$ 。此外,由于面向不同显示应用场景的显示屏,其单颗 LED 芯片的尺寸和工作电流有所差别,例如,在 Mini-LED 户外商显拼接屏等对亮度要求较高的应用中,其单颗 LED 芯片工作电流通常在 $1\sim 20\ \text{mA}$ 之间,而在 Micro-LED 超高清显示应用中,其单颗 LED 芯片工作电流通常小于 $2\ \text{mA}$ 。为方便比较,统一通过调节电流密度对样品进行测试,电流密度变化范围为 $1\sim 100\ \text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。

3 RGB 三色 Mini/Micro-LED 在温度与电流作用下的发光特性变化情况

图 1 和图 2 分别为在不同注入电流下,蓝绿红

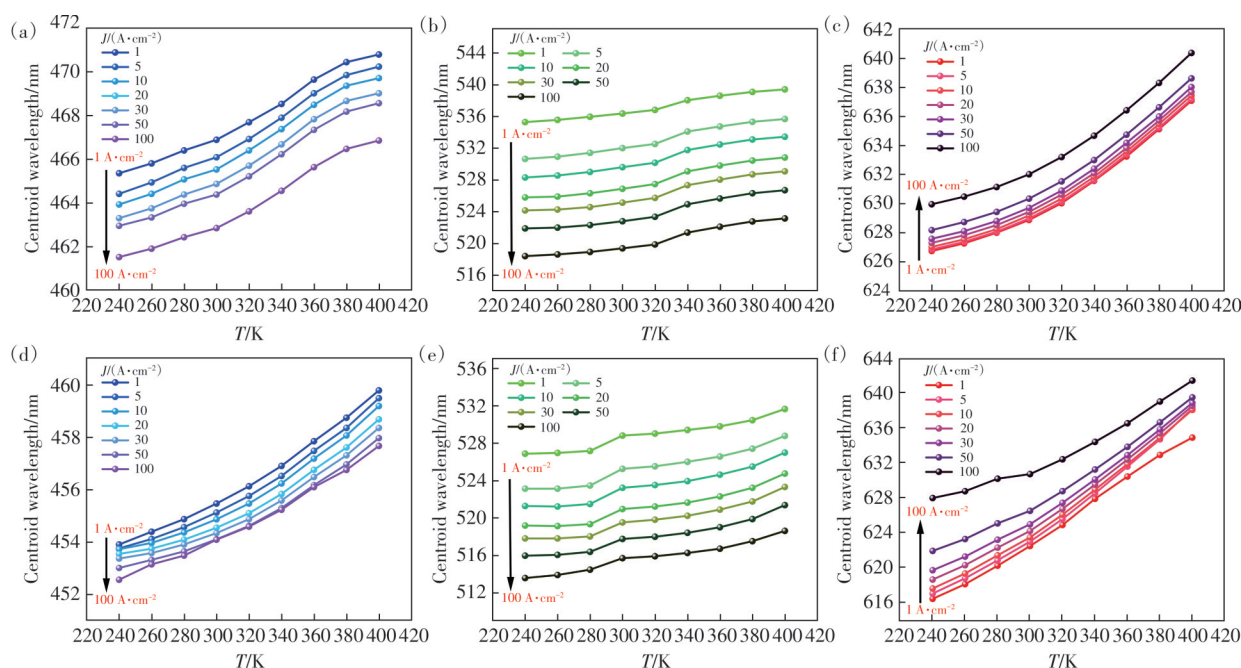


图 1 不同电流密度注入条件下芯片发光峰中心波长随温度变化曲线。(a)蓝光 Micro-LED;(b)绿光 Micro-LED;(c)红光 Micro-LED;(d)蓝光 Mini-LED;(e)绿光 Mini-LED;(f)红光 Mini-LED

Fig.1 Temperature dependence of centroid wavelength under different current densities. (a)Blue Micro-LED. (b)Green Micro-LED. (c)Red Micro-LED. (d)Blue Mini-LED. (e)Green Mini-LED. (f)Red Mini-LED

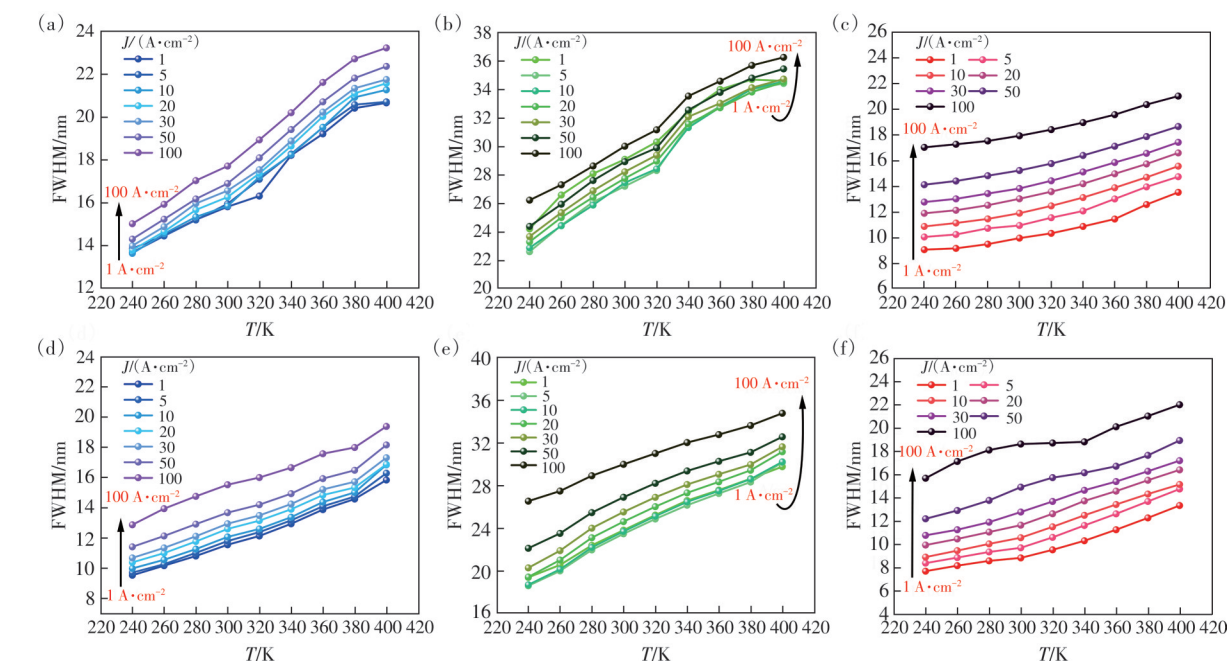


图2 不同电流密度注入条件下芯片发光峰半高宽随温度变化曲线。(a)蓝光 Micro-LED;(b)绿光 Micro-LED;(c)红光 Micro-LED;(d)蓝光 Mini-LED;(e)绿光 Mini-LED;(f)红光 Mini-LED

Fig.2 Temperature dependence of FWHM under different current densities. (a) Blue Micro-LED. (b) Green Micro-LED. (c) Red Micro-LED. (d) Blue Mini-LED. (e) Green Mini-LED. (f) Red Mini-LED

三色 Micro-LED((a)~(c))和 Mini-LED((b)~(d)) EL 光谱中心波长(Centroid wavelength)和半高宽(Full width at half maximum, FWHM)随温度变化曲线。由图中可见,无论是 Micro-LED 还是 Mini-LED,随着温度上升,蓝绿红三色 LED 的中心波长均发生不同程度的红移,同时 FWHM 逐渐展宽。在 $10 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 注入电流密度条件下,当温度由 240 K 上升至 400 K 时,蓝绿红三色 Micro-LED 中心波长分别红移了 5.8 nm、5.1 nm 及 10.6 nm,发光峰半高宽分别展宽了 7.6 nm、11.7 nm 及 4.7 nm;而蓝绿红三色 Mini-LED 中心波长分别红移了 5.4 nm、5.7 nm 及 20.5 nm,发光峰半高宽分别展宽了 6.8 nm、11.5 nm 及 6.2 nm。众所周知,LED 的发光波长主要取决于有源区量子结构中电子和空穴辐射复合跃迁能量的大小。当温度升高时,一方面,有源层晶格原子振动加剧,电子与声子之间的相互作用(即电子-声子耦合)增强,导致其能带结构重整化,带隙收缩;另一方面,晶格发生热膨胀,原子间平均距离增大,也会导致禁带宽度减小^[31]。尽管不同半导体材料的禁带宽度对温度的敏感性不同,但基本都可以用半经验 Varshni 关系描述^[32]:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T}, \quad (1)$$

其中, $E_g(0)$ 为半导体在 0 K 时的带隙; T 代表温

度; α 为 Varshni 参数,表示能带收缩系数的一种极限值;而 β 值通常被认为与德拜温度相关并具有可比性^[33]。为此,本文采用 Varshni 公式对所测得的不同温度下 LED 发光峰能量进行拟合。如图 3 所示,拟合过程中,对于 InGaN 基蓝绿光 LED, β 一般为 700 K,而对于 AlGaInP 红光 LED, β 一般选择 300 K^[34],拟合结果见表 1。结果表明,在 240~400 K 范围内,6 个样品的发光峰能量随温度变化的趋势均满足 Varshni 公式,并且 α 值与文献报道的 InGaN 和 AlGaInP 材料的 Varshni 参数相当^[35-36]。由此说明,在这个温度范围内,发光峰红移的现象主要由禁带宽度随温度升高而收缩引起。值得注意的是,三种颜色 Mini-LED 的 α 值均比 Micro-LED 的大,且红光 Mini-LED 和 Micro-LED 的 α 值差异更为显著,分别为 $0.535 \text{ meV} \cdot \text{K}^{-1}$ 和 $0.268 \text{ meV} \cdot \text{K}^{-1}$ 。研究表明, α 值除了与材料的本征特性如晶格硬度、化学键类型等有关之外,也与材料中电子-声子耦合强度密切相关,材料中缺陷将增加声子散射,降低有效电子-声子耦合强度,导致 α 值较小。而在 LED 的制备过程中,高能离子轰击会导致芯片侧壁晶格损伤,形成悬挂键、空位等缺陷^[37]。相较于 Mini-LED, Micro-LED 芯片尺寸小,表面积与体积比显著增大,表面缺陷态对声子散射作用强,降低了电子-声子耦合强度,从而导致其 α 值较

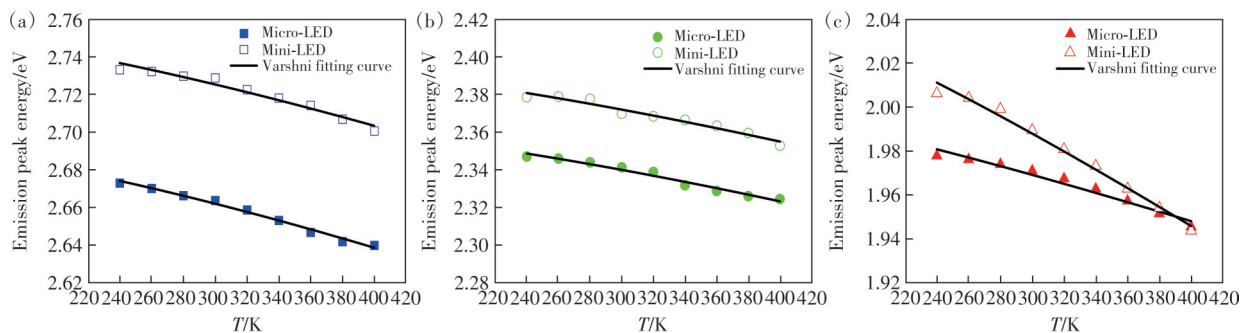


图3 10 A·cm⁻²的电流密度条件下发光峰能量随温度变化曲线。(a)蓝光 Mini/Micro-LED;(b)绿光 Mini/Micro-LED;(c)红光 Mini/Micro-LED

Fig.3 Temperature dependent curve of luminescence peak energy under current density of 10 A·cm⁻². (a) Blue Mini/Micro LED. (b)Green Mini/Micro LED. (c)Red light Mini/Micro LED

小。而由于 AlGaInP 材料的载流子扩散长度通常比 InGaN 材料高 1~2 个数量级,更容易迁移至侧壁。当芯片尺寸减小,表面缺陷态对电子-声子耦合强度的削弱作用更加显著。因此红光 Micro-LED 的 α 值仅为红光 Mini-LED 的一半左右,其随温度升高,波长红移量显著降低。而蓝光和绿光 LED 随芯片尺寸减小,其波长红移量差异不大。对于混晶半导体材料(如 InGaN、AlGaInP 等)而言,影响发光峰半高宽随温度展宽的主要因素有:温度升高时,载流子从组分涨落引起的局域态逃逸,能量分布范围变宽,导致发光峰展宽;晶格振动加剧使得声子散射增强,能量分布随机化进一步展宽发光峰。由表 1 可见,当温度从 240 K 升高至 400 K 时,绿光 LED 发光峰展宽最为显著,高至 10 nm 左右,其原因在于绿光 LED 有源层采用高 In 组分 InGaN 材料,In 组分涨落程度最为严重^[38],蓝光 LED 由于采用低 In 组分的 InGaN 材料,其合金组分均匀性相对较高,局域态对载流子的限制作用较弱,因此发光峰展宽较小。红光 LED 主要

采用 AlGaInP 材料^[39],其能带结构与 InGaN 体系不同。在 AlGaInP 材料中,由于禁带宽度较小,电子-空穴对的结合能较低,载流子在高温下更容易被热激发至高能态参与辐射复合,但由于 AlGaInP 材料的合金涨落较弱,局域态效应较少,因此其发光峰的展宽程度相对较小。

除了温度的影响,Mini/Micro-LED 显示屏工作时,单颗芯片的电流密度通常在 1~100 A·cm⁻² 之间调节。因此,有必要进一步考察 LED 光学特性随注入电流密度变化规律。图 4 和图 5 展示了不同温度下六种 LED 的中心波长与半高宽(FWHM)随注入电流密度变化曲线。研究表明,不同材料体系的 LED 对电流密度响应存在显著差异。InGaN 基蓝和绿光 LED 随注入电流密度增大发生蓝移,AlGaInP 基红光 LED 则呈现红移现象。蓝绿光 LED 发光波长蓝移现象产生机制可归因于Ⅲ族氮化物异质结的极化效应。具体而言,有源区 InGaN 量子阱内存在很强的极化电场,继而引发显著的量子限制斯塔克效应(Quantum Confined Stark Effect, QCSE)^[40],导致导带与价带能级发生非对称倾斜,从而降低有效禁带宽度;而当大量的载流子注入有源区后高浓度电子-空穴对的库仑屏蔽作用可削弱极化场的影响,致使 QCSE 效应减弱,有效禁带宽度随之增大,对应发光峰位产生蓝移。值得注意的是,极化电场将随着量子阱中 In 组分增大而增强。因此,室温下,当电流密度由 1 A·cm⁻² 增大至 100 A·cm⁻² 时,有着更高 In 组分的绿光 Micro/Mini-LED 发光波长偏移量分别高达 17 nm 和 13 nm,远大于蓝光样品的 4.1 nm 和 1.7 nm,如表 2 所示。而 AlGaInP 基红光 LED 的红移现象则可归因于自热效应,电流密度增大导致芯片结

表 1 10 A·cm⁻²注入电流密度条件下,温度由 240 K 上升至 400 K 时 LED 的波长偏移和 FWHM 偏移量对比及 Varshni 拟合参数

Tab. 1 Centroid wavelength shift and FWHM shift of LED as temperature increases from 240 K to 400 K under 10 A·cm⁻² injection current density and Varshni fitting parameters

		$\Delta\lambda/\text{nm}$	$\Delta\text{FWHM}/\text{nm}$	E_g/eV	$\alpha/(\text{meV}\cdot\text{K}^{-1})$
Micro-LED	B	5.8	7.6	2.696	0.389
	G	5.1	11.7	2.332	0.232
	R	10.6	4.7	2.009	0.268
Mini-LED	B	5.4	6.8	2.761	0.425
	G	5.7	11.5	2.431	0.266
	R	20.5	6.2	2.069	0.535

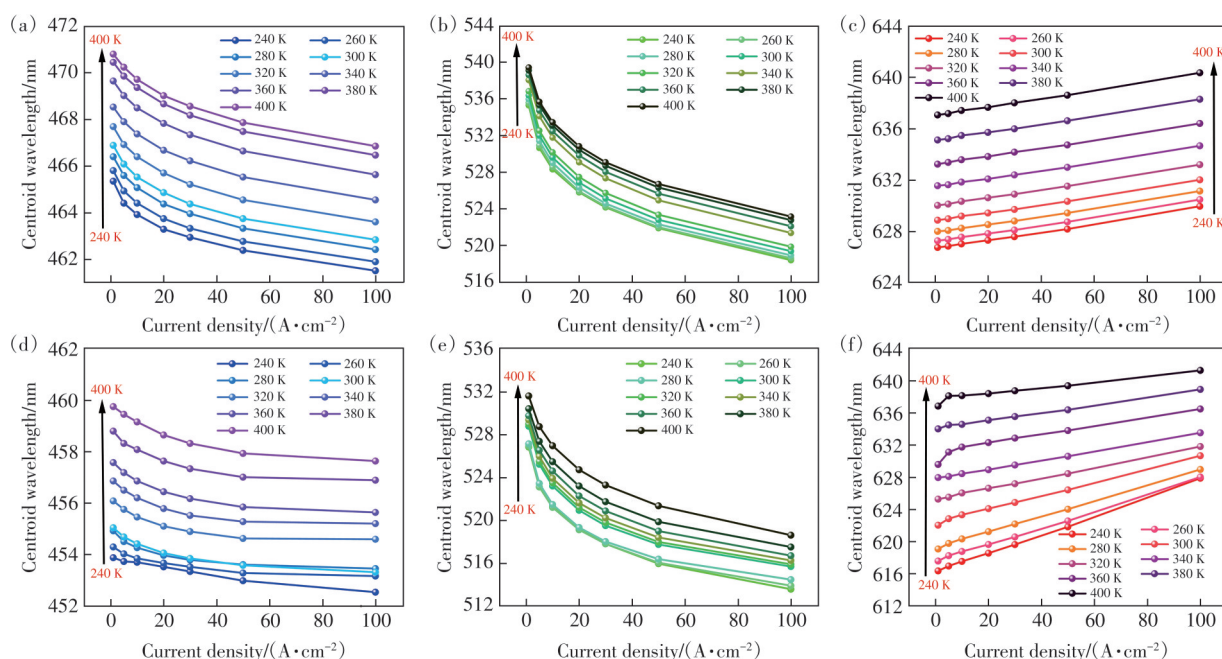


图4 不同温度下随电流密度变化的中心波长变化曲线。(a)蓝光 Micro-LED;(b)绿光 Micro-LED;(c)红光 Micro-LED;(d)蓝光 Mini-LED;(e)绿光 Mini-LED;(f)红光 Mini-LED

Fig.4 The centroid wavelength as a function of current density at different temperatures. (a)Blue Micro-LED. (b)Green Micro-LED. (c)Red Micro-LED. (d)Blue Mini-LED. (e)Green Mini-LED. (f)Red Mini-LED

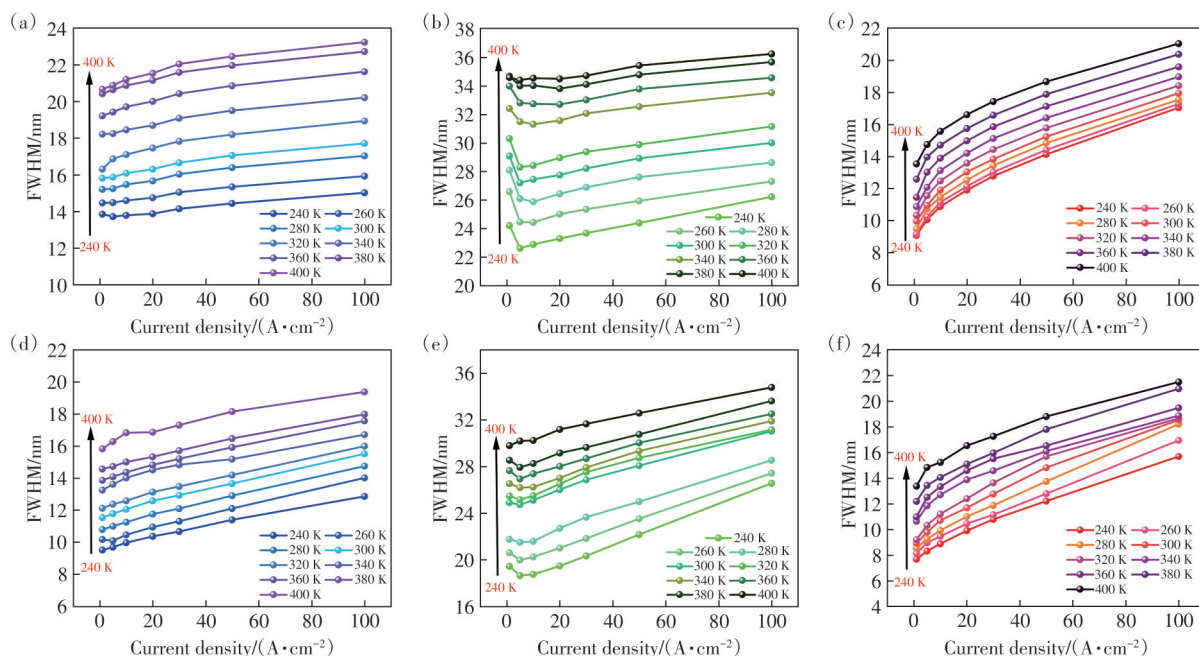


图5 不同温度下随电流密度的发光峰半高宽(FWHM)变化曲线。(a)蓝光 Micro-LED;(b)绿光 Micro-LED;(c)红光 Micro-LED;(d)蓝光 Mini-LED;(e)绿光 Mini-LED;(f)红光 Mini-LED

Fig.5 FWHM as a function of current density at different temperatures. (a)Blue Micro-LED. (b)Green Micro-LED. (c)Red Micro-LED. (d)Blue Mini-LED. (e)Green Mini-LED. (f)Red Mini-LED

温升高、带隙收缩,从而使得发光波长红移。Micro-LED因其尺寸小、电流扩展性能好,其波长红移量仅为 3.2 nm,小于 Mini-LED 的 7.3 nm。In-GaN 基蓝绿光 LED 的 FWHM 变化趋势也与 Al-GaInP 基红光 LED 有所不同。前者呈现先减小后

增大的趋势,其原因在于注入电流密度增大时,一方面库仑屏蔽效应削弱极化电场使得 FWHM 减小,另一方面由于载流子填充效应导致 FWHM 增大,最终使得蓝光和绿光 LED 发光峰略微展宽,均低于 6.5 nm。而红光 LED 则由于材料对温度的敏

感度高、自热效应强导致发光峰展宽较为显著,均大于 8 nm。

表 2 室温下随电流密度增加(1~100 A·cm⁻²)时 LED 波长偏移和 FWHM 偏移量对比

		LED wavelength shift and FWHM shift with increasing current density (1~100 A·cm ⁻²)	
		$\Delta\lambda/\text{nm}$	$\Delta\text{FWHM}/\text{nm}$
Micro-LED	B	4.1	1.8
	G	17	2.8
	R	3.2	8
Mini-LED	B	1.7	4.0
	G	13	6.3
	R	7.3	9.4

4 电热耦合作用下 Mini/Micro-LED 色品坐标变化分析

在显示技术领域,色域(Color gamut)作为量化显示设备色彩再现能力的关键参数,其定义为设备在特定色彩空间内可复现的色度范围边界所围成的区域。国际照明委员会(CIE)于 1931 年建立的 CIE 1931 XYZ 色度系统,通过建立基于人眼明视视觉函数的 CIE xy 色品图,首次实现了对色域的二维可视化表征和数值化度量。进而采用基于 CIE 色度系统的标准化色彩空间进行比较分析。目前主流的标准包括:NTSC 1953(色域覆盖

率为 72% CIE 1931)、s RGB(标准红绿蓝色彩空间,覆盖约 72% NTSC)、Adobe RGB(扩展至约 50% CIE 1931 色域)、DCI-P3(数字电影色域,覆盖约 45% CIE 1931)以及 ITU-R BT. 2020(超高清电视标准,覆盖约 75.8% CIE 1931)^[41]。各标准通过规定特定基色坐标和白点参数,构建出不同的色域三角形,其面积占比表征了设备相对于目标色彩空间的色域覆盖率。

为研究 Mini/Micro-LED 光学特性随温度和注入电流变化对 LED 显示屏色域的影响,本文进一步详细分析了 Mini/Micro-LED 在不同温度(240 K、300 K、360 K)和注入电流密度条件下(分别为 1 A·cm⁻²、5 A·cm⁻²、10 A·cm⁻²、20 A·cm⁻²、30 A·cm⁻²、50 A·cm⁻²、100 A·cm⁻²)色坐标变化情况。如图 6 所示,在同一注入电流密度条件下,随着温度上升,由于三色 LED 均呈现发光波长红移、发光峰展宽现象,蓝光 Mini/Micro-LED 色品坐标向色度图左上象限偏移($x \downarrow, y \uparrow$),绿光和红光 Mini/Micro-LED 色品坐标均持续往右下方偏移($x \uparrow, y \downarrow$)。而在同一温度条件下,三色 LED 的色坐标随注入变化趋势有着显著差异。如图 6(a)、(d)所示,当注入电流密度从 1 A·cm⁻²增加至 100 A·cm⁻²,蓝光 Mini/Micro-LED 的 CIE 1931(x, y)色品坐标沿色度图左下方向线性偏移($x \uparrow, y \downarrow$)。

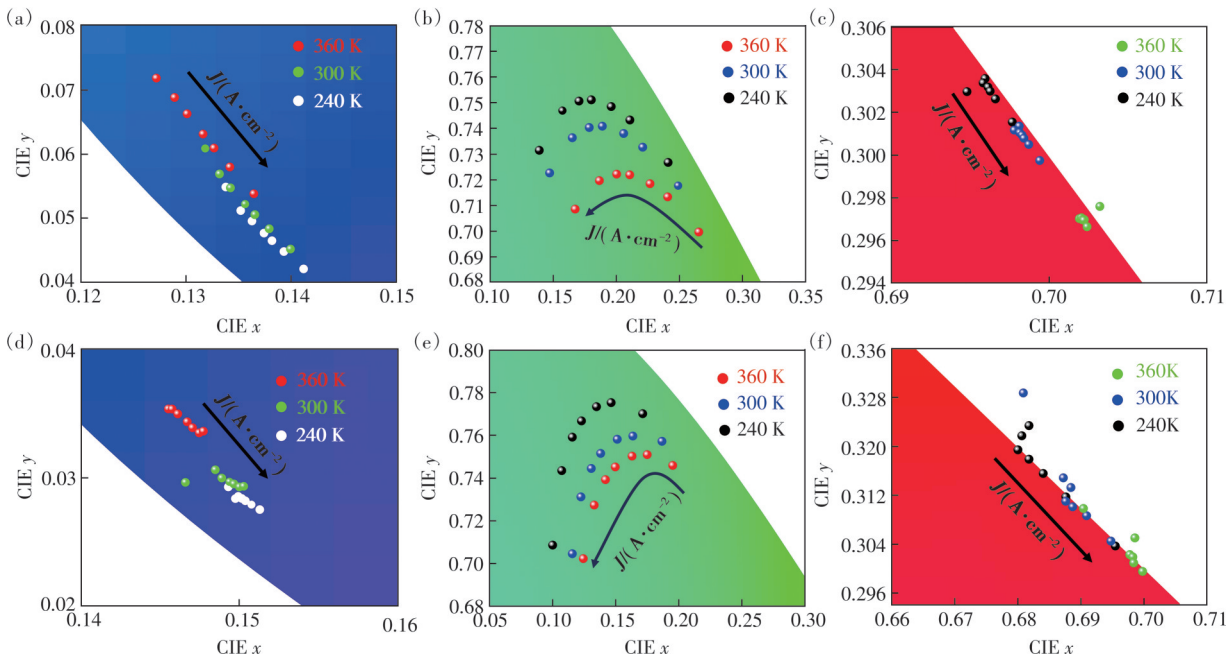


图 6 不同温度(240 K、300 K、360 K)下随注入电流密度变化的色度坐标。(a)蓝光 Micro-LED;(b)绿光 Micro-LED;(c)红光 Micro-LED;(d)蓝光 Mini-LED;(e)绿光 Mini-LED;(f)红光 Mini-LED

Fig.6 The chromaticity coordinates as a function of current density at different temperatures (240 K, 300 K, 360 K). (a) Blue Micro-LED. (b)Green Micro-LED. (c)Red Micro-LED. (d)Blue Mini-LED. (e)Green Mini-LED. (f)Red Mini-LED

对于绿光 Mini/Micro-LED 而言,电流密度增加引起色品坐标非线性演化,CIE x 值单调降低,而 CIE y 则呈现先升后降趋势,如图 6(b)、(e)所示。该现象源于前文所述的 InGaN 蓝绿光基 LED 载流子浓度升高导致的填充效应与量子限制斯塔克效应耦合作用,使发光峰蓝移、半高宽先减小后增大。红光 Mini/Micro-LED 则由于发光波长红移导致色品坐标沿光谱轨迹向右下方偏移($x \uparrow, y \downarrow$),如图 6(c)、(f)所示。由此说明,随着温度和注入电流变化,三色 LED 的色度坐标均发生了不同程度的偏移,从而将导致显示设备色域发生变化。

显示设备的色域变化情况可通过其色域覆盖率分析,色域覆盖率(R)定义为显示设备色域与目标标准色域的交叠面积(A_{Dns})占目标色域总面积(A_s)的百分比^[24]:

$$R = \frac{A_{\text{Dns}}}{A_s}, \quad (2)$$

当 RGB 色坐标接近目标色域的顶点时,覆盖率达到最大,色坐标偏移时,交叠区域减少,覆盖率下降。图 7(a)~(b)和图 7(c)~(d)分别绘制了两种尺寸 LED 构成的显示器 DCI-P3 色域覆盖率随着

温度升高和注入电流密度增大的变化曲线。对比可发现,在同一注入电流密度条件下,由于温度升高时三色 LED 的发光波长均同步发生红移,色域覆盖率仅略微减小,降幅均小于 2%。而在同一温度条件下,当注入电流密度由 $1 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 增大至 $100 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$,蓝光和绿光 LED 发光峰中心波长发生蓝移,而红光 LED 发生红移,导致色域覆盖率大幅降低。其中,室温条件下,Mini-LED 的色域覆盖率由 99.61% 下降至 91.22%,降幅达 8.39%; Mini-LED 的色域覆盖率由 99.69% 下降至 86.75%,降幅达 12.94%。后者降幅相对较高主要源自于 Mini-LED 芯片电流扩展较差引起的芯片自热效应较强,红光芯片波长红移较为显著。此外,在高温条件下(360 K、380 K、400 K),色域覆盖率随着电流密度的变化表现出“先升后降”的趋势,其原因在于,当电流密度较低(如 $1 \sim 5 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$)时,由于波长偏移较小且绿光的半高宽(FWHM)减小,色坐标向左上方偏移(如图 6 所示),使得色域覆盖面积略有增加;但当电流密度继续升高,器件波长偏移加剧,导致色域面积减小。这一现象表明,在

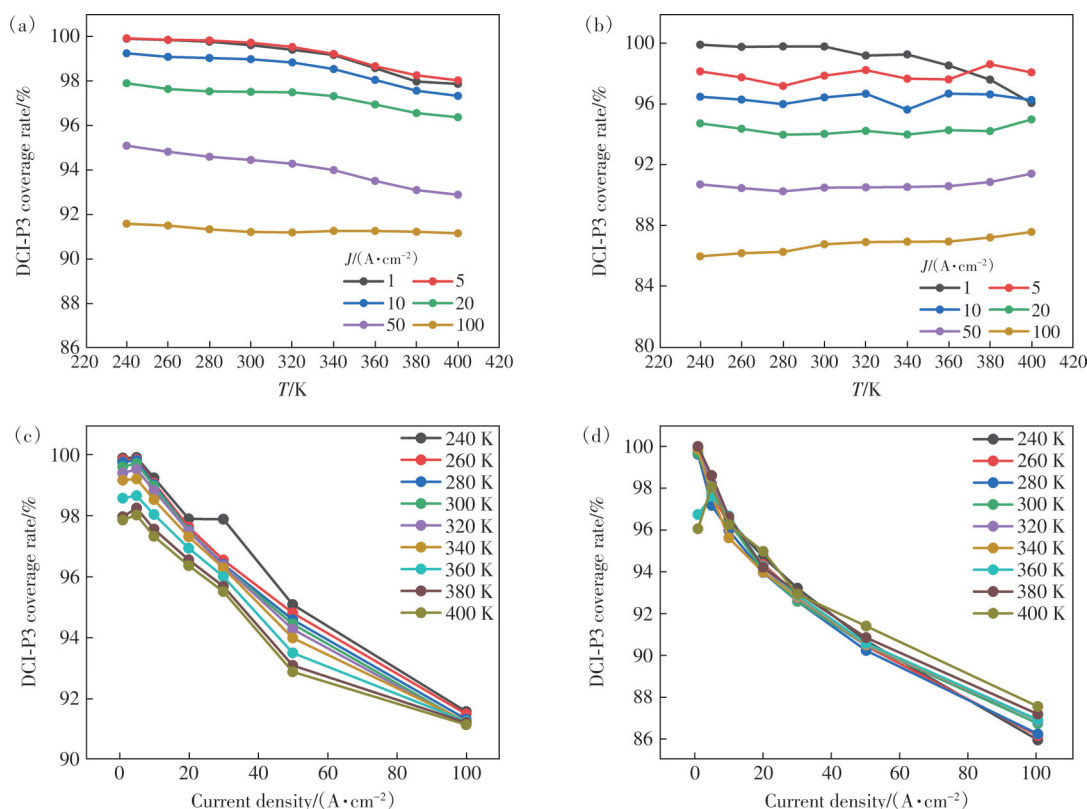


图 7 DCI-P3 色域覆盖率随温度变化曲线:(a)Micro-LED,(b)Mini-LED;以及随注入电流密度变化曲线:(c)Micro-LED,(d)Mini-LED

Fig. 7 The coverage rate of DCI-P3 under different temperature of the RGB mixed: (a) Micro-LED, (b) Mini-LED systems. And under current densities of the RGB mixed: (c) Micro-LED, (d) Mini-LED systems

高亮度或高负载应用中,电流密度对 LED 色域的负面影响比环境温度更严重,需在器件设计和系统控制中予以针对性解决。在器件设计方面,需通过外延结构设计、应力调控等方法削弱 InGaN 量子结构中量子限制斯塔克效应对蓝绿光 LED 波长偏移的影响。在显示屏控制系统中,需优化电流调控策略,针对电流密度变化引入动态色域补偿算法。而针对温度变化,可研究基于温度特性的预校正算法,在显示屏生产或使用前,对不同温度下的色坐标进行预校正,使显示屏在不同温度环境下都能达到预期的色彩效果。

5 结 论

本文通过系统分析三色 Mini/Micro-LED 在不同温度和注入电流密度下发光特性的变化规律,深入探讨了电热耦合作用下 Mini/Micro-LED 三基色色品坐标变化规律,及由其构成的显示器 DCI-P3 色域覆盖率变化趋势。研究表明,随着温度上升三色 LED 均呈现发光波长红移、发光峰展宽现象。其中,红光 LED 因其禁带宽度具有较强的温度依赖性,其波长红移量远大于蓝光和绿光 LED;而绿光 LED 由于具有较高的 In 组分,其发光峰展宽现象更为显著。相应地,蓝光 Mini/Micro-LED

色品坐标向色度图左上象限偏移,绿光和红光 Mini/Micro-LED 色品坐标均持续往右下方偏移,最终导致 DCI-P3 色域覆盖率降幅均小于 2% ($\Delta T=160\text{ K}$)。而当注入电流密度增大时,蓝光和绿光 LED 由于填充效应与量子限制斯塔克效应耦合作用,发光峰蓝移、半高宽先减小后增大;红光 LED 则由于自热效应呈现发光峰红移、半高宽展宽,使得三基色色品坐标随注入变化趋势有着显著差异,从而导致色域覆盖率大幅降低。其中,室温条件下, Micro-LED 的 DCI-P3 色域覆盖率由 99.61% 下降至 91.22%,降幅达 8.39%; Mini-LED 的 DCI-P3 色域覆盖率由 99.69% 下降至 86.75%,降幅达 12.94%。总之,在高亮度或高负载应用中,电流密度对 LED 色域的负面影响比环境温度更严重。因此,在显示技术研发过程中,除了关注 LED 显示屏的热管理以降低环境温度因素对色彩性能的影响,还需重点优化电流调控策略,对电流密度变化引入动态色域补偿算法,以提升显示效果。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250086>

参 考 文 献:

- [1] CHEN Z, YAN S K, DANESH C. MicroLED technologies and applications: characteristics, fabrication, progress, and challenges [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2021, 54(12): 123001.
- [2] LEE T Y, CHEN L Y, LO Y Y, *et al.* Technology and applications of micro-LEDs: their characteristics, fabrication, advancement, and challenges [J]. *ACS Photonics*, 2022, 9(9): 2905-2930.
- [3] WU T Z, SHER C W, LIN Y, *et al.* Mini-LED and micro-LED: promising candidates for the next generation display technology [J]. *Appl. Sci.*, 2018, 8(9): 1557.
- [4] LIU Z J, LIN C H, HYUN B R, *et al.* Micro-light-emitting diodes with quantum dots in display technology [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2020, 9(1): 83.
- [5] 周律, 郑华, 张声浩, 等. Micro-LED 显示及其驱动技术的研究进展 [J]. *液晶与显示*, 2022, 37(11): 1395-1410.
 ZHOU L, ZHENG H, ZHANG S H, *et al.* Research progress of Micro-LED display and its driving technology [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2022, 37(11): 1395-1410. (in Chinese)
- [6] RYU J E, PARK S, PARK Y, *et al.* Technological breakthroughs in chip fabrication, transfer, and color conversion for high-performance micro-LED displays [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(43): 2204947.
- [7] 薛治天, 吕国强, 杜刚. 全彩 Mini-LED 商业大屏显示的彩色管理 [J]. *液晶与显示*, 2021, 36(3): 448-455.
 XUE Z T, LYU G Q, DU G. Color management of full-color Mini-LED commercial large screen display [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2021, 36(3): 448-455. (in Chinese)
- [8] 季洪雷, 张萍萍, 陈乃军, 等. Micro-LED 显示的发展现状与技术挑战 [J]. *液晶与显示*, 2021, 36(8): 1101-1112.
 JI H L, ZHANG P P, CHEN N J, *et al.* Micro-LED display: Recent progress and future challenges [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2021, 36(8): 1101-1112. (in Chinese)

- [9] 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.
- [10] SHEEN M, KO Y, KIM D U, *et al.* Highly efficient blue InGaN nanoscale light-emitting diodes [J]. *Nature*, 2022, 608(7921): 56-61.
- [11] 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: Sci. Appl.*, 2020, 9(1): 105.
- [12] LU B Y, WANG L, HAO Z B, *et al.* Dennard scaling in optoelectronics: scientific challenges and countermeasures of micro-LEDs for displays [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2022, 16(12): 2100433.
- [13] ZENG P X, GUO W J, TONG C D, *et al.* Optical crosstalk among mini-LEDs packaged in a four-in-one integrated matrix device [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2022, 69(8): 4366-4370.
- [14] PARK J, CHOI J H, KONG K, *et al.* Electrically driven mid-submicrometre pixelation of InGaN micro-light-emitting diode displays for augmented-reality glasses [J]. *Nat. Photonics*, 2021, 15(6): 449-455.
- [15] HWANGBO S, HU L, HOANG A T, *et al.* Wafer-scale monolithic integration of full-colour micro-LED display using MoS₂ transistor [J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2022, 17(5): 500-506.
- [16] BEHRMAN K, KYMISSIS I. Micro light-emitting diodes [J]. *Nat. Electron.*, 2022, 5(9): 564-573.
- [17] JamesLEDinside. 三星电子在 CES 2020 前夕重磅发布 Micro LED 等新品 [EB/OL]. [2024-04-11]. https://www.sohu.com/a/365110971_115028.
- JamesLEDinside. Samsung Electronics releases new products such as Micro LED before CES 2020 [EB/OL]. [2024-04-11]. https://www.sohu.com/a/365110971_115028. (in Chinese)
- [18] 钟经文. 全球首发! 利亚德携手 TCL 华星展现最新技术成果会 [EB/OL]. [2024-04-11]. <https://cn.chinadaily.com.cn/a/202111/19/WS61976cb8a3107be4979f9131.html>.
- ZHONG J W. Global debut! Liard collaborates with TCL Huaxing to showcase the latest technological achievements [EB/OL]. [2024-04-11]. <https://cn.chinadaily.com.cn/a/202111/19/WS61976cb8a3107be4979f9131.html>. (in Chinese)
- [19] Andygui. 揭秘业界首款 20in1, 看国星光电领跑 MiniLED 显示行业 [EB/OL]. [2024-04-11]. <https://www.ledinside.cn/qiye/202109+22-50617.html>.
- Andygui. Unveiling the industry's first 20in1, watching Guoxing optoelectronics lead the MiniLED display industry [EB/OL]. [2024-04-11]. <https://www.ledinside.cn/qiye/20210922-50617.html>. (in Chinese)
- [20] WitsView. Meta 公开首款 Micro LED AR 眼镜原型 Orion [EB/OL]. [2024-04-11]. <https://news.qq.com/rain/a/20240927A08IWT00>.
- WitsView. Meta releases its first Micro LED AR glasses prototype Orion [EB/OL]. [2024-04-11]. <https://news.qq.com/rain/a/20240927A08IWT00>. (in Chinese)
- [21] YANG X, LI J C, PENG X H, *et al.* Super retina TFT based full color microLED display *via* laser mass transfer [J]. *Sci. China Inf. Sci.*, 2024, 67(11): 210401.
- [22] 卢梦琪. 辰显光电: 做 Micro-LED 大尺寸商显“开路先锋” [EB/OL]. [2024-04-11]. <https://www.cena.com.cn/display/20240520/123694.html>
- LU M Q. Chenxian optoelectronics: pioneer in Micro LED large size commercial display [EB/OL]. [2024-04-11]. <https://www.cena.com.cn/display/20240520/123694.html>. (in Chinese)
- [23] Akwan. 三星显示发布首款 MicroLED 可穿戴显示器原型, 亮度 4 000 尼特 [EB/OL]. [2024-04-11]. <https://www.ledinside.cn/products/20250110-58713.html>.
- Akwan. Samsung display releases its first MicroLED wearable display prototype with a brightness of 4 000 nits [EB/OL]. [2024-04-11]. <https://www.ledinside.cn/products/20250110-58713.html>. (in Chinese)
- [24] GUO W J, CHEN N, LU H, *et al.* The impact of luminous properties of red, green, and blue mini-LEDs on the color gamut [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2019, 66(5): 2263-2268.
- [25] ZHENG X, XU X F, TONG C D, *et al.* Chromatic properties of InGaN-based red, green, and blue micro-LEDs grown on silicon substrate [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2024, 124(5): 051103.
- [26] HUANG S L, WANG Z Y, HONG Y X, *et al.* Luminous properties of all-in-one packaged Mini-LED devices for transparent displays [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2024, 71(12): 7584-7589.
- [27] TONG C D, LI G Y, ZHENG X, *et al.* Luminous properties of red, green, and blue micro-LEDs and the impacts on color

- gamut [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2023, 70(4): 1733-1738.
- [28] VAN DRIEL W D, JACOBS B, WATTE P, *et al.* Reliability of LED-based systems [J]. *Microelectron. Reliab.*, 2022, 129: 114477.
- [29] 宿然, 郑喜凤, 陈宇, 等. 温度波动对 LED 显示屏白平衡主要参数及图像色调的影响 [J]. *发光学报*, 2023, 44(2): 346-355.
- SU R, ZHENG X F, CHEN Y, *et al.* Effect of temperature fluctuation on white balance main parameters and hue of LED panel [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(2): 346-355. (in Chinese)
- [30] 詹永波, 张健伟, 曾建雄, 等. 小电流 LED 屏白平衡色温的控制 [J]. *发光学报*, 2016, 37(11): 1390-1398.
- ZHAN Y B, ZHANG J W, ZENG J X, *et al.* Control of white balance color temperature for low current LED screen [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2016, 37(11): 1390-1398. (in Chinese)
- [31] HETZEL R, LEISING G. Current density impact on the emission behavior of GaN-based blue emitting LEDs in the temperature range of 4.2–400 K [J]. *Phys. Status Solidi (A)*, 2014, 211(7): 1660-1667.
- [32] YEE K, KIM C S, KIM J H, *et al.* Temperature-and bias-dependent study of photocurrent spectroscopy in an InGaN light-emitting diode operating near 400 nm [J]. *J. Korean Phys. Soc.*, 2010, 57(4): 793-796.
- [33] 张熬, 陈鹏, 周婧, 等. 半导体的禁带宽度与温度关系研究 [J]. *光电子技术*, 2019, 39(3): 160-167.
- ZHANG A, CHEN P, ZHOU J, *et al.* Study on temperature dependence of semiconductor bandgap [J]. *Optoelectron. Technol.*, 2019, 39(3): 160-167. (in Chinese)
- [34] LI Q, XU S J, XIE M H, *et al.* Origin of the ‘S-shaped’ temperature dependence of luminescent peaks from semiconductors [J]. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2005, 17(30): 4853-4858.
- [35] PÄSSLER R. Parameter sets due to fittings of the temperature dependencies of fundamental bandgaps in semiconductors [J]. *Phys. Status Solidi (B)*, 1999, 216(2): 975-1007.
- [36] WANG T, BAI J, SAKAI S, *et al.* Investigation of the emission mechanism in InGaN/GaN-based light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, 78(18): 2617-2619.
- [37] YANG F, XU Y, LI L, *et al.* Optical and microstructural characterization of Micro-LED with sidewall treatment [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2022, 55(43): 435103.
- [38] CHO I W, LEE B, RYU M Y, *et al.* Luminescence properties of InGaN/GaN light-emitting diodes with violet, blue, and green emission [J]. *J. Korean Phys. Soc.*, 2021, 78(4): 275-279.
- [39] HO C H, CHEN S M, WU Y R. Study of the factors limiting the efficiency of vertical-type nitride-and AlInGaP-based quantum-well micro-LEDs [J]. *Processes*, 2022, 10(3): 489.
- [40] ZHANG Y W, XU R Q, KANG Q S, *et al.* Recent advances on GaN-based micro-LEDs [J]. *Micromachines*, 2023, 14(5): 991.
- [41] CHEN J, HARDEV V, YUREK J. Quantum-dot displays: giving LCDs a competitive edge through color [J]. *Inf. Disp.*, 2013, 29(1): 12-17.



黄研培(2001–),男,江西抚州人,硕士研究生,2022年于南昌大学获得学士学位,主要从事 Micro-LED 芯片可靠性相关的研究。

E-mail: 19820221153855@stu.xmu.edu.cn



黄凯(1980–),男,福建福州人,博士,教授,博士生导师,2007年于南京大学获得博士学位,主要从事宽禁带半导体材料及其器件应用的研究。

E-mail: k_huang@xmu.edu.cn



李金钗(1979–),女,福建漳平人,博士,教授,博士生导师,2008年于厦门大学获得博士学位,主要从事宽禁带半导体材料及其器件应用的研究。

E-mail: jinchaili@xmu.edu.cn