

文章编号: 1000-7032(2026)04-0547-07

# 基于 Mg 掺杂载流子产生层的红绿双色可调叠层 OLED 及其防伪应用

庄校笑, 刘士浩\*, 张乐天, 谢文法\*

(吉林大学 电子科学与工程学院, 集成光电子全国重点实验室吉林大学实验区, 吉林 长春 130012)

**摘要:** 颜色可调有机发光器件(OLED)在动态显示、防伪与信息加密等领域具有重要应用潜力。本文采用叠层结构设计,以 Bphen:Mg 作为 n 型掺杂的载流子产生层(CGL),构建了红绿双色可调叠层 OLED。系统研究了 Mg 与 Ag 掺杂对 CGL 载流子注入与复合行为的影响,发现 Mg 掺杂的器件虽电流密度较低,但外量子效率更高(16.9%),更有利于高效发光。通过调控红与绿发光层的堆叠顺序,发现下绿上红结构器件表现出明显的电压依赖颜色可调特性,其 CIE 坐标在 7~19 V 范围内从(0.61, 0.39)移至(0.47, 0.48),颜色变化超出五步 MacAdam 椭圆范围,具备良好的人眼可辨识度。基于该结构,进一步制备了图案化防伪标签,实现了低电压下红色图案与高电压下黄绿色背景的动态切换,验证了其在多级视觉防伪与信息加密中的应用可行性。本研究为高性能颜色可调叠层 OLED 的设计与防伪应用提供了实验依据。

**关键词:** 叠层有机发光二极管; Mg 掺杂载流子产生层; 颜色可调; 电压调控; 图案化防伪标签; 信息加密

中图分类号: TN383<sup>+</sup>.1

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20250286

CSTR: 32170.14.CJL.20250286

## Red-green Color-tunable Tandem OLED Based on Mg-doped Charge Generation Layer and Its Anti-counterfeiting Applications

ZHUANG Xiaoxiao, LIU Shihao\*, ZHANG Letian, XIE Wenfa\*

(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, JLU Region, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

\* Corresponding Authors, E-mail: liushihao@jlu.edu.cn; xiewf@jlu.edu.cn

**Abstract:** Color-tunable organic light-emitting devices (OLEDs) hold significant application potential in dynamic displays, anti-counterfeiting, and information encryption. In this work, a tandem-structured red-green color-tunable OLED is constructed using Bphen:Mg as the n-doped charge generation layer (CGL). The effects of Mg and Ag doping on carrier injection and recombination behavior in the CGL are systematically investigated. Although Mg doping results in a lower current density, it yields a higher external quantum efficiency (16.9%), which is more favorable for efficient luminescence. By adjusting the stacking order of the red and green emitting layers, the device with a green-bottom/red-top configuration exhibits pronounced voltage-dependent color tunability. Its CIE coordinates shift from (0.61, 0.39) at 7 V to (0.47, 0.48) at 19 V, a change that extends beyond the five-step MacAdam ellipse range, ensuring good visual discernibility. Based on this structure, a patterned anti-counterfeiting label is further fabricated, demonstrating dynamic switching between a red pattern at low voltage and a yellow-green background at high voltage, thereby verifying its feasibility for multi-level visual anti-counterfeiting and information encryption. This study provides experimental support for the design and anti-counterfeiting applications of high-performance

收稿日期: 2025-12-22; 修订日期: 2026-01-12

基金项目: 国家自然科学基金(62374071, 62475097, 62574099); 吉林省科技厅自然科学基金(20230101061JC)

Supported by National Natural Science Foundation of China (62374071, 62475097, 62574099); Science and Technology Development Planning of Jilin Province (20230101061JC)

color-tunable tandem OLEDs.

**Keywords:** tandem organic light-emitting device (OLED); Mg-doped charge generation layer; color-tunable; voltage modulation; patterned anti-counterfeiting label; information encryption

## 1 引 言

颜色可调有机发光器件(CTOLED)作为一种能够通过电压动态调节发光颜色的新兴光电子技术,其研究意义远超越了传统显示与照明范畴,尤其在防伪与信息加密领域展现出巨大潜力<sup>[1-3]</sup>。在这一领域,CTOLED的自发光特性使其无需依赖环境光即可提供高对比度的视觉信息,克服了传统电致变色技术的局限<sup>[4]</sup>。通过将特定的颜色变化序列或图案与驱动电压精确关联,CTOLED可以制造出难以复制和仿造的安全标识<sup>[5]</sup>。例如,一个器件可以在不同电压下呈现出截然不同的颜色或显示隐藏的图案,为实现多级信息加密和公众可直观辨别的视觉防伪提供了强大平台,这对于保障药品、奢侈品和重要文件的安全具有重要价值<sup>[6]</sup>。

目前,实现颜色可调的OLED主要依赖三种器件结构策略<sup>[7]</sup>。第一种策略采用单一发光层体系,通过在主体材料中共掺杂多种发光客体,或利用单一发光材料自身所具有的多色发射特性,通过电压调控不同发射路径的激子布居来实现发光颜色的变化<sup>[8]</sup>。第二种策略基于多层发光层结构,在单一器件中依次沉积多个发射层,并通过调控电压来改变激子复合区域在空间上的分布,利用不同位置的发光层中发光染料的差异性,实现发光光谱的连续或离散调节<sup>[9]</sup>。第三种策略为叠层或多单元集成结构,将两个或多个独立的发光单元以垂直堆叠或平面并联的方式集成于单一器件中,通过各单元对驱动电压表现出的差异性载流子注入与复合动力学行为,实现对不同发光单元发射强度的独立调控,从而在宏观上获得电压依赖的发光颜色变化<sup>[10]</sup>。

在上述策略中,单一发光层结构虽具备工艺简单与成本较低的优势,但普遍面临色域范围有限、亮度随电压波动明显以及高效稳定材料体系稀缺等问题。多层发光层结构则常受限于器件效率偏低、色变范围不足以及层间能量转移难以精确调控等挑战。相较于单一发光层与多发光层结构,叠层颜色可调OLED(tandem CT-OLED)通

过垂直集成多个独立发光单元,在理论上可兼顾宽色域调控与较高的发光效率,因而受到广泛关注。近年来,已有研究报道了基于叠层结构的电压可调发光器件,并在色坐标调控范围和器件稳定性方面取得了一定进展<sup>[11]</sup>。然而,该类器件仍普遍面临若干关键问题:其一,载流子产生层(CGL)中载流子生成与注入过程高度依赖掺杂方式,容易导致上下发光单元电流分配失衡;其二,不同发光单元间的载流子动力学差异使得颜色调控行为难以预测和精确设计;其三,颜色可调幅度的提升往往伴随着器件效率的下降。本文围绕颜色可调叠层OLED的性能优化及其防伪应用展开研究。首先,以Bphen:Mg掺杂体系构建CGL,系统考察n型掺杂对载流子注入与复合行为的调控机制<sup>[12-15]</sup>。随后,通过引入双发光层结构,分析其对器件颜色可调范围与调控稳定性的影响。基于优化后的叠层体系,进一步设计并制备图案化防伪标签,验证其在外加电压驱动下的动态颜色切换特性,为该类器件在高级防伪与信息加密领域的应用提供实验依据。

## 2 实 验

### 2.1 样品制备

实验选用预镀氧化铟锡(ITO)的透明玻璃作为器件的衬底。衬底依次进行以下预处理:(1)使用Decon 90清洗剂超声清洗10 min,去除表面油污;(2)用去离子水超声清洗3次,每次5 min,去除残留清洗剂,清洗完成后,通过氮气枪将衬底吹干;(3)在120 °C烘箱中干燥10 min,消除衬底表面水分;(4)置于PDC-32G等离子体清洗腔室中处理5 min,提升衬底表面亲水性与附着力。将预处理后的衬底转移至多源有机分子气相沉积系统中,在真空度低于 $6 \times 10^{-4}$  Pa的条件下,采用热蒸发法沉积各功能层,沉积速率控制在0.02~0.15 nm/s。

### 2.2 样品表征

采用日本大塚电子OLED光电性能测试系统(基于MCPD-9800全光谱阵列光谱仪),在室温和大气环境下测试器件的电流密度-电压-亮度特性、外量子效率-亮度曲线及电致发光光谱。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 器件结构

为探究叠层结构对颜色可调器件性能的影响,我们设计并制备了基于双发光单元的叠层有机电致发光器件(OLED),其结构如图1所示。具体自下而上依次为:钢锡氧化物(ITO)阳极/氧化钼(MoO<sub>3</sub>)/1,1-双[4-(N,N-二对甲苯基氨基)苯基]

环己烷(TAPC)/三(4-吡啶-9-基苯基)胺(TCTA)/第一发光层(EML-bottom)/Bphen/CGL/MoO<sub>3</sub>/TAPC/TCTA/第二发光层(EML-top)/Bphen/Ag 阴极。本文选用 CBP:10% Ir(ppy)<sub>3</sub> 作为绿光发光层(G-EML),CBP:5% Ir(MDQ)<sub>2</sub>(acac)作为红光发光层(R-EML),通过将两种颜色的发光层分别置于上下单元,并结合两者不同的载流子动力学行为,实现基于电压调节的颜色可调叠层变色器件。

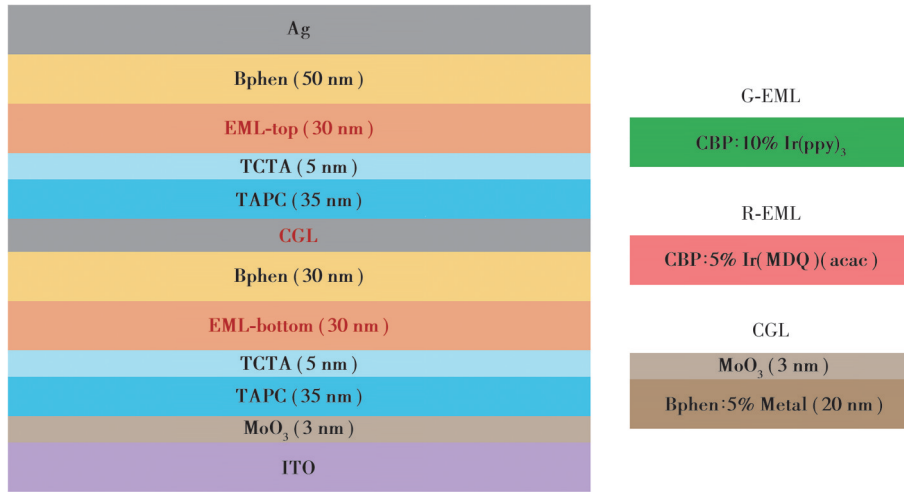


图1 颜色可调叠层 OLED 器件结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of color-tunable tandem OLED device structures

#### 3.2 n型掺杂调控 CGL 载流子生成与注入研究

在本研究中,我们首先制备了以绿光为上下发光单元的单色叠层器件,其中中间连接层(CGL)采用 MoO<sub>3</sub> 与 n 型掺杂的 Bphen 电子传输层共同构成<sup>[16]</sup>。n 型掺杂分别使用 Mg(质量分数 5%)和 Ag(质量分数 5%)两种金属,旨在系统探究不同金属 n 型掺杂对 CGL 内载流子生成与注入行为的影响。

图2展示了基于两种金属掺杂 CGL 的器件光电性能。从电流密度-电压-亮度曲线(图2(a))可见,Mg 掺杂与 Ag 掺杂器件的开启电压基本一致,约为 6.2 V。但在相同电压下,Ag 掺杂器件表现出更高的电流密度与亮度。例如,在 15 V 电压下,Ag 掺杂器件的电流密度达到 38.3 mA·cm<sup>-2</sup>,亮度为 12 131 cd·m<sup>-2</sup>;而 Mg 掺杂器件分别为 11.6 mA·cm<sup>-2</sup> 和 6 765 cd·m<sup>-2</sup>。这表明,Ag 掺杂更能促进载流子

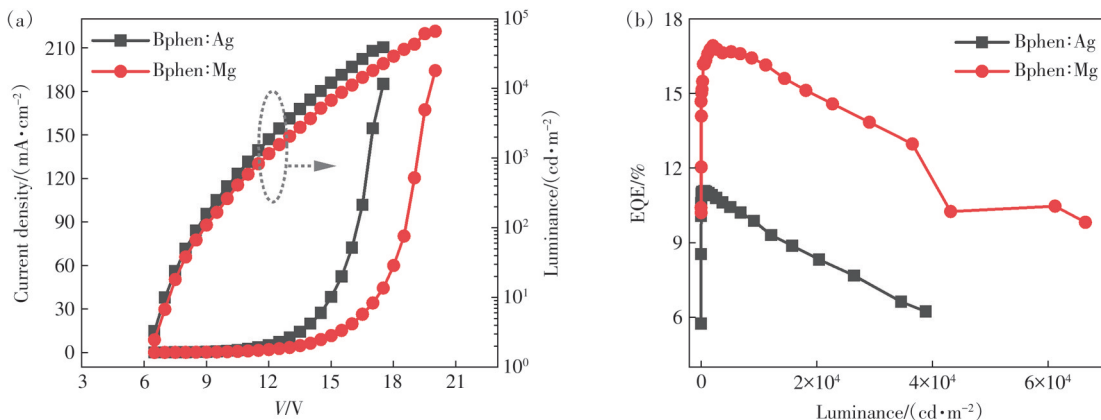


图2 采用 Mg 掺杂与 Ag 掺杂 CGL 的绿光叠层器件的(a)电流密度-电压-亮度曲线及(b)外量子效率-亮度曲线  
Fig.2 (a) Current density-voltage-luminance (*J-V-L*) and (b) external quantum efficiency-luminance (*EQE-L*) characteristics of the green tandem OLEDs with Mg-doped and Ag-doped CGLs

的生成与注入,有利于提升器件的电流与亮度输出。然而,从外量子效率(EQE)-亮度曲线(图2(b))可以看出,Ag掺杂器件的最大外量子效率(EQE<sub>max</sub>)为11.1%,低于Mg掺杂器件的16.9%。这表明,尽管Ag掺杂能显著提升电流,但同时可能引入了额外的漏电流通道,导致部分载流子未参与辐射复合,从而限制了器件效率的提高。尽管Mg掺杂CGL在载流子生成与注入能力上不及Ag掺杂,导致其电流密度与亮度相对较低,但其产生的载流子能够更有效地参与辐射复合,从而使基于Mg掺

杂CGL的叠层器件实现了更高的发光效率和稳定性<sup>[17-19]</sup>。

### 3.3 双色叠层发光器件颜色可调性能研究

基于Mg掺杂CGL在叠层器件中表现出的良好发光效率,我们进一步设计了两种双色叠层发光器件,分别将红光发光层(R-EML)与绿光发光层(G-EML)置于不同的堆叠顺序中:器件RG的下发光单元为R-EML,上发光单元为G-EML;器件GR则相反,下单元为G-EML,上单元为R-EML。图3展示了这两种器件的光电性能。

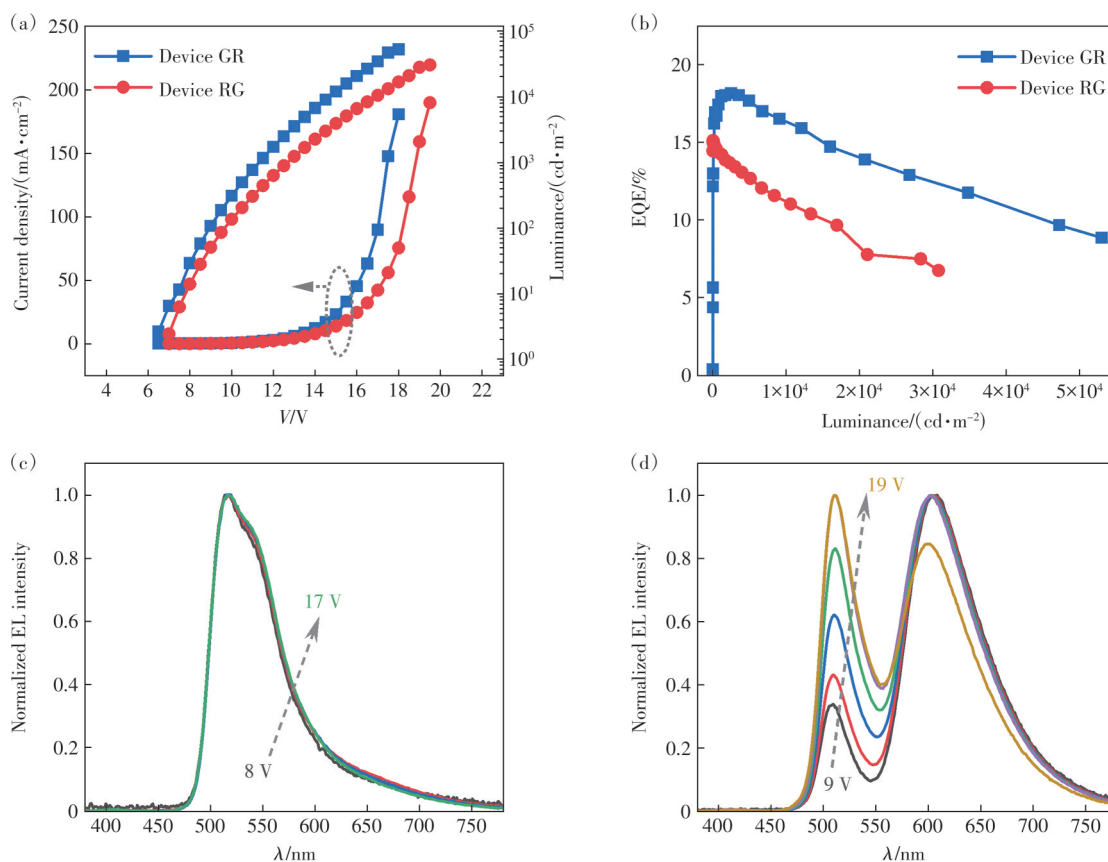


图3 器件RG与GR的光电性能。(a)电流密度-电压-亮度特性曲线;(b)外量子效率-亮度特性曲线;(c)器件RG在不同电压下的归一化电致发光光谱;(d)器件GR在不同电压下的归一化电致发光光谱

Fig.3 Optoelectronic performances of devices RG and GR. (a)Current density-voltage-luminance ( $J$ - $V$ - $L$ ) characteristics. (b)External quantum efficiency *versus* luminance (EQE- $L$ ) characteristics. (c)Normalized electroluminescence spectra of device RG at various voltages. (d)Normalized electroluminescence spectra of device GR at various voltages

从电流密度-电压-亮度曲线(图3(a))可看出,R-EML与G-EML的相对位置显著影响了器件的载流子传输行为。器件GR的开启电压为6.5V,而器件RG的开启电压略高,为7.0V。在相同电压下,器件GR的电流密度与亮度均低于器件RG。例如,在15V电压下,器件RG的电流密度和亮度分别为23.1 mA·cm<sup>-2</sup>和12 065 cd·m<sup>-2</sup>,而器件GR

仅为13.8 mA·cm<sup>-2</sup>和3 950 cd·m<sup>-2</sup>。这一差异可能与CGL向下单元注入电子的能力弱于其向上单元注入空穴的能力有关,致使器件电流主要受到下单元载流子传输能力的限制。在下单元中,这两种发光染料对空穴的捕获能力存在明显差异。文献报道<sup>[20]</sup>,Ir(ppy)<sub>3</sub>具有较浅的HOMO能级,且在本实验中的掺杂浓度比Ir(MDQ)<sub>2</sub>(acac)

高一倍,因此其空穴陷阱效应更为显著,导致器件GR中的电流输运受到更强抑制。在效率方面,器件GR同样落后于器件RG。如图3(b)所示,器件GR的 $EQE_{max}$ 为15.1%,而器件RG可达18.2%。该效率差异不仅源于载流子动力学的不同,也与红、绿发光层在叠层内部所处位置对光取出效率的影响有关<sup>[21]</sup>。

在颜色可调特性方面,两种器件表现出明显不同的行为:器件RG在不同电压下仅显示上单元发出的绿光,而器件GR则表现出明显的电压依赖颜色可调特性。这可能同样与CGL向下单元注入电子的能力弱于其向上单元注入空穴的能力有关。对于器件GR, Ir(ppy)<sub>3</sub>较强的空穴捕获作用促使空穴在下单元积累,增强了CGL与下单元发光层之间的电场,进而促进电子注入下单元并产生绿光发射。而在器件RG中, Ir(MDQ)<sub>2</sub>(acac)对空穴的束缚较弱,空穴容易直接注入CGL层,导致下单元无法有效复合发光。基于上述结果,器件GR展现出更显著的颜色可调特性,因此后续颜色可调叠层OLED研究将以其为基础展开。

### 3.4 颜色可调器件及其图案化防伪标签研究

器件GR在9V电压下发光以上单元的红光为主,下单元的绿光虽可见但较弱;而当电压升至19V时,绿光发光逐渐占据主导。这一变化印证了我们之前的推断:CGL向下单元注入电子的能力弱于其向上单元注入空穴的能力。在9~19V绿光占比显著提升的现象进一步表明,因其注入效率相对更低,CGL向下单元的电子注入对电压更为敏感。

为探究器件的颜色调控能力,我们绘制了不同电压下的色坐标图(图4(a))。随着驱动电压升高,色坐标发生明显偏移:器件的CIE 1931坐标从7V时的(0.61,0.39)移动至19V时的(0.47,0.48),在12V的电压变化范围内实现了(0.14,0.11)的坐标变化。MacAdam椭圆是色度图上表征人眼分辨阈值的区域,椭圆内的颜色与中心颜色在人眼中视为不可区分<sup>[22-23]</sup>。图4(b)计算并给出了器件GR色坐标的五步MacAdam椭圆,结果显示,随着偏压改变,器件GR的颜色偏移明显超出椭圆范围,说明该颜色变化足以被人眼清晰识别。这进一步证实,通过调节偏置电压可实现显著且可区分的颜色切换。

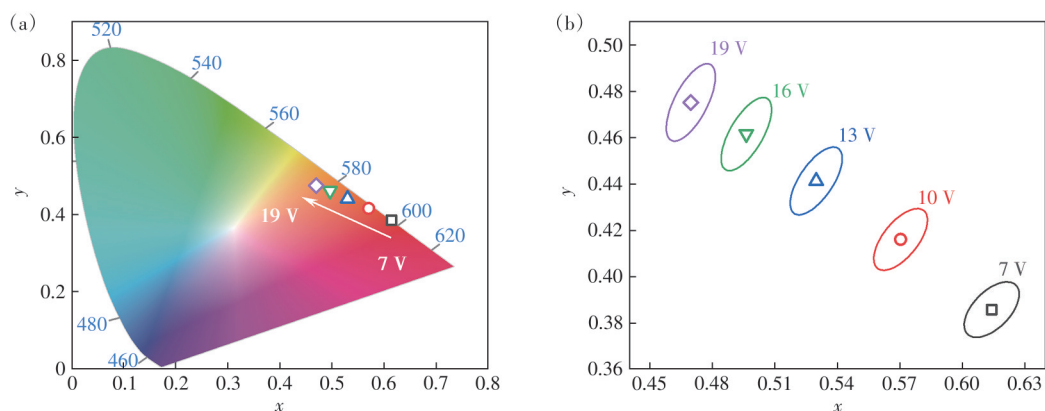


图4 器件GR在不同电压下的色坐标变化。(a)CIE 1931色坐标(7~19V);(b)基于器件色坐标绘制的五步麦克亚当椭圆,用于评估人眼可辨性

Fig.4 Color coordinate variation of device GR under different applied voltages. (a)CIE 1931 chromaticity coordinates (from 7 V to 19 V). (b)Five-step MacAdam ellipses plotted based on the device coordinates to evaluate the perceptibility of color shifts

在器件GR的基础上,我们进一步采用“大面积下单元-CGL-图案化上单元”结构,制备了红绿双色可调防伪标签。其中,上单元红色发光层R-EML通过掩膜技术形成“玫瑰花”图案,图案区域覆盖红色磷光材料CBP:5% Ir(MDQ)<sub>2</sub>(acac),非图案区域则无该材料覆盖,如图5所示。

当对图案化标签施加低电压(7V)时,仅在图

案化区域可观测到红光发光,非图案区域无电致发光响应,呈现“红色玫瑰花+暗背景”;当施加高电压(16V)时,底部绿光单元被激发,图案区域因红光与绿光叠加呈现橙黄色,非图案区域发出绿光,形成“黄色玫瑰花+绿色背景”。通过这种随电压变化的发光图案差异,器件实现了高防伪辨识度。

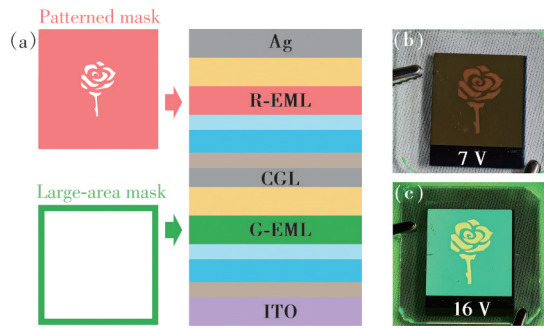


图5 电压调制的图案化显示。(a)标签的层状结构及制备示意图;(b)~(c)不同偏压下的电致发光图像:在7 V低电压下(b),仅图案化的红色玫瑰花可见;在16 V高电压下(c),背景发出绿光,从而形成绿色背景上的黄色玫瑰花图案

Fig.5 Voltage-switchable patterned display. (a) Schematic of the label's layer structure and fabrication. (b)~(c) EL images under different biases: at a low voltage of 7 V (b), only the patterned red rose is visible; at a high voltage of 16 V (c), the background emits green light, resulting in a yellow rose against a green background

## 4 结 论

本研究成功设计并制备了基于 Mg 掺杂 CGL

的颜色可调叠层 OLED,系统探讨了 n 型掺杂、发光层堆叠顺序及器件结构对颜色可调性能的影响。研究表明, Mg 掺杂 CGL 在叠层器件中表现出优异的载流子复合效率,虽载流子注入能力略低于 Ag 掺杂体系,但外量子效率显著提升(16.9%),更适用于高效率颜色可调器件。通过调控红绿发光层的堆叠顺序,发现“下绿上红”结构因  $\text{Ir}(\text{ppy})_3$  的空穴捕获作用与 CGL 电子注入的电压敏感性,实现了从红光主导到绿光增强的连续颜色调节, CIE 坐标在 7~19 V 范围内变化达(0.14, 0.11),颜色偏移超出人眼可辨阈值,具备良好的调控性与视觉区分度。进一步基于该结构设计并制备了图案化防伪标签,在 7 V 与 16 V 电压下分别呈现“红色图案+暗背景”和“黄色图案+绿色背景”两种发光状态,验证了其在动态防伪与信息加密中的实际应用潜力。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:  
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250286>

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 汪涛, 金雨泽, 梁维龙, 等. 基于  $\text{MAPbI}_3$  电子传输层的颜色可调倒置有机发光器件 [J]. 发光学报, 2025, 46(9): 1714-1721.  
 WANG T, JIN Y Z, LIANG W L, *et al.* Color-tunable inverted organic light-emitting devices based on  $\text{MAPbI}_3$  electron transport layer [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(9): 1714-1721. (in Chinese)
- [ 2 ] ZOU S J, SHEN Y, XIE F M, *et al.* Recent advances in organic light-emitting diodes: toward smart lighting and displays [J]. *Mater. Chem. Front.*, 2020, 4(3): 788-820.
- [ 3 ] LEE H, CHO H, BYUN C W, *et al.* Color-tunable organic light-emitting diodes with vertically stacked blue, green, and red colors for lighting and display applications [J]. *Opt. Express*, 2018, 26(14): 18351-18361.
- [ 4 ] MU G, RAO T Y, QI Y W, *et al.* Color-tunable organic light-emitting displays for interactive multi-signal visualization [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 33(32): 2301280.
- [ 5 ] YANG D L, LU Y F, CHEN X, *et al.* A dual-response multicolor electrochromic polymer dispersed liquid crystal for display and anti-counterfeiting applications [J]. *Chem. Eng. J.*, 2025, 513: 162833.
- [ 6 ] KOO J H, JEONG S, SHIM H J, *et al.* Wearable electrocardiogram monitor using carbon nanotube electronics and color-tunable organic light-emitting diodes [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(10): 10032-10041.
- [ 7 ] YU X W, ZHANG H Y, YU J H. Luminescence anti-counterfeiting: from elementary to advanced [J]. *Aggregate*, 2021, 2(1): 20-34.
- [ 8 ] WANG T, SONG X F, HUANG Z Y, *et al.* Color-tunable TADF conjugated polymers toward voltage-regulating white OLEDs for intelligent lighting [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2024, 12(15): 2303067.
- [ 9 ] ZHANG C, ZHANG D D, BIN Z Y, *et al.* Color-tunable all-fluorescent white organic light-emitting diodes with a high external quantum efficiency over 30% and extended device lifetime [J]. *Adv. Mater.*, 2022, 34(22): 2103102.
- [ 10 ] FRÖBEL M, SCHWAB T, KLIEM M, *et al.* Get it white: color-tunable AC/DC OLEDs [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2015, 4(2): e247.

- [ 11 ] ZHAO D, HUANG W, QIN Z N, *et al.* Emission spectral stability modification of tandem organic light-emitting diodes through controlling charge-carrier migration and outcoupling efficiency at intermediate/emitting unit interface [J]. *ACS Omega*, 2018, 3(3): 3348-3356.
- [ 12 ] YING S A, WU Y B, SUN Q, *et al.* High efficiency color-tunable organic light-emitting diodes with ultra-thin emissive layers in blue phosphor doped exciplex [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2019, 114(3): 033501.
- [ 13 ] 聂君心, 朱来攀, 王中林. 掺杂硫化锌摩擦电致发光薄膜研究进展 [J]. *发光学报*, 2025, 46(6): 961-980.  
NIE J X, ZHU L P, WANG Z L. Progress of doped ZnS films on triboelectrification-induced electroluminescence [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(6): 961-980. (in Chinese)
- [ 14 ] 景姝, 王华, 刘慧慧, 等. 基于 LiF/Al/F4-TCNQ/NPB 电荷产生层的叠层有机电致发光器件的特性研究 [J]. *液晶与显示*, 2014, 29(6): 886-892.  
JING S, WANG H, LIU H H, *et al.* Characteristic of tandem organic light emitting diodes with charge generation layer of LiF/Al/F4-TCNQ/NPB [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2014, 29(6): 886-892. (in Chinese)
- [ 15 ] 于瑶瑶, 陈星明, 金玉, 等. 利用 CsN<sub>3</sub> n 型掺杂电子传输层改善 OLED 器件性能的研究 [J]. *液晶与显示*, 2016, 31(8): 773-777.  
YU Y Y, CHEN X M, JIN Y, *et al.* Improved properties of organic light-emitting devices by utilizing CsN<sub>3</sub> n-type doped electron transport layer [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2016, 31(8): 773-777. (in Chinese)
- [ 16 ] 李怀坤, 张方辉, 程君, 等. BPhen 作为发光层间隔层对黄光 OLED 的影响 [J]. *发光学报*, 2016, 37(1): 38-43.  
LI H K, ZHANG F H, CHENG J, *et al.* Effects of BPhen as spacer layer in light emitting layer on yellow OLED [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2016, 37(1): 38-43. (in Chinese)
- [ 17 ] ZHOU H J, ZHUANG X X, XU M X, *et al.* AC-driven color-tunable white organic light-emitting diodes with micron-scale patterned carrier transport layers [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2025, 19(8): 2401884.
- [ 18 ] WANG Q, MA D G. Management of charges and excitons for high-performance white organic light-emitting diodes [J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2010, 39(7): 2387-2398.
- [ 19 ] 林雯嫣, 陈宁, 吴志军, 等. 基于 B<sub>3</sub>PyMPM:Cs 高效叠层 OLED 器件的制备 [J]. *光子学报*, 2020, 49(1): 0123003.  
LIN W Y, CHEN N, WU Z J, *et al.* Preparation of highly-efficient tandem OLED based on B<sub>3</sub>PyMPM:Cs [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2020, 49(1): 0123003. (in Chinese)
- [ 20 ] LINDLA F, BOESING M, VAN GEMMERN P, *et al.* Employing exciton transfer molecules to increase the lifetime of phosphorescent red organic light emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 98(17): 173304.
- [ 21 ] ZHOU T Y, WANG T, BAI J L, *et al.* High-performance tandem quantum-dot light-emitting diodes based on bulk-heterojunction-like charge-generation layers [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(25): 2313888.
- [ 22 ] PAN T, LIU S H, ZHANG L T, *et al.* A flexible, multifunctional, optoelectronic anticounterfeiting device from high-performance organic light-emitting paper [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2022, 11(1): 59.
- [ 23 ] MACADAM D L. Visual sensitivities to color differences in daylight [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1942, 32(5): 247-274.



庄校笑 (2001-), 女, 江苏泰州人, 硕士研究生, 2023 年于贵州大学获得学士学位, 主要从事叠层发光器件及其防伪应用的研究。

E-mail: zhuangxx23@mails.jlu.edu.cn



谢文法 (1978-), 男, 福建三明人, 博士, 教授, 博士生导师, 2004 年于吉林大学获得博士学位, 主要从事有机光电子学方面的研究。

E-mail: xiewf@jlu.edu.cn



刘士浩 (1992-), 男, 山东聊城人, 博士, 副教授, 2018 年于吉林大学获得博士学位, 主要从事薄膜发光器件方面的研究。

E-mail: liushihao@jlu.edu.cn