

文章编号: 1000-7032(2026)02-0321-09

交流电场调控三端 QLED 器件制备与性能研究

郑 聪, 翁书臣, 刘晨亮, 卢红胜, 申异凡, 周雄图, 张永爱*

(福州大学 物理与信息工程学院, 福建 福州 350108)

摘要: 量子点发光二极管 (Quantum dot light-emitting diodes, QLEDs) 以其高色纯度、低功耗和良好的溶液加工性, 将成为下一代显示技术的有力竞争者。然而, 在传统直流驱动模式下, QLED 器件面临载流子注入不平衡导致非辐射复合严重、效率衰减及稳定性不足等问题, 限制了其在显示领域中的应用。因此, 本文提出一种基于交流电场调控的三端 QLED 器件结构, 通过电场动态调制优化载流子平衡, 显著提升器件性能。与传统 QLED 器件相比, 三端 QLED 器件的外量子效率从 7.5% 提高到 18.3%, 亮度从 6 842 cd/m² 提升至 10 374 cd/m², 分别提升了 143.7% 和 51.6%。实验结果表明, 三端 QLED 器件利用交流电波形、电压和频率的协同调控, 可精确控制电子迁移率, 从而有效抑制非辐射复合。该方案不仅能有效解决传统 QLED 中电子-空穴迁移率失配的技术难题, 还为高性能 QLED 器件结构设计提供了新的技术途径, 有望推动 QLED 在显示领域的广泛应用。

关键词: 量子点发光二极管; 三端器件; 交流电场调控; 载流子注入; 外量子效率

中图分类号: TN312.8

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20250237

CSTR: 32170.14.CJL.20250237

Fabrication and Performance of A Three-terminal QLED Device via
An AC Electric Field Regulation

ZHENG Cong, WENG Shuchen, LIU Chenliang, LU Hongsheng, SHEN Yifan,

ZHOU Xiongtu, ZHANG Yongai*

(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

* Corresponding Author, E-mail: yongaizhang@fzu.edu.cn

Abstract: Quantum-dot light-emitting diodes (QLEDs) will become a promising candidate in the next-generation display technology due to their high color purity, low power consumption and good solution processability. However, in the traditional DC drive mode, QLED devices are confronted with problems such as severe non-radiative recombination, efficiency degradation and insufficient stability due to unbalanced carrier injections, which limit their application in the display field. Therefore, this paper proposes a three-terminal QLED device structure based on AC electric field regulation, which optimizes the carrier balance through dynamic modulation of the electric field and significantly enhances the device performance. Compared with traditional QLED devices, the external quantum efficiency (EQE) of the three-terminal QLED device has increased from 7.5% to 18.3%, and the brightness has increased from 6 842 cd/m² to 10 374 cd/m², with increases of 143.7% and 51.6%, respectively. The experimental results show that the three-terminal QLED device can accurately control the electron mobility and effectively suppress non-radiative recombination by utilizing the coordinated regulation of AC waveform, driving voltage and frequency. This solution not only effectively solves the technical problem of electron-hole mobility mismatch in traditional QLED, but also provides a new technological approach for the structural design of high-performance QLED devices, which is expected to promote the wide application of QLED devices in the display field.

Keywords: quantum-dot light-emitting diodes (QLEDs); three-terminal device; AC electric field regulation; carrier injection; external quantum efficiency

收稿日期: 2025-11-10; 修订日期: 2025-11-26

基金项目: 新材料重大专项项目 (2025ZD0616200)

Supported by Advanced Materials-National Science and Technology Major Project (2025ZD0616200)

1 引 言

近年来,胶体量子点(Quantum dots, QDs)由于具有发射宽度窄、发光效率高、发射波长可调等优异特性,在许多光电器件应用中具有显著优势,并得到了广泛研究^[1-3]。其中,量子点发光二极管(Quantum-dot light-emitting diodes, QLEDs)由于具有色彩饱和度高、低成本溶液加工等优点^[4],被认为是下一代全彩显示和固态照明的有力竞争者^[5]。随着 QD 材料和器件结构的快速发展, QLED 器件光电性能已得到了显著提高。据报道,红、绿、蓝、白 QLED 器件外量子效率(External quantum efficiency, EQE)最高达到 42.9%、28.7%、23%、31.05%,与高效有机发光二极管(Organic light-emitting diode, OLEDs)非常接近^[6-8]。

然而,传统双端直流驱动 QLED 器件在实际应用中面临着很多问题^[9],比如,直流电下器件中的电子和空穴注入速率不平衡(电子注入快于空穴),在量子点层或其邻近界面(如氧化锌, Zinc oxide, ZnO)和量子点层、PVK 和量子点层积累多余电子^[10]。多余电子会占据激发态,导致空穴复合抑制而导致发光强度下降;此外,量子点表面缺陷、各功能层(如 ZnO 电子传输层、PVK 空穴传输层)与界面处存在的陷阱态导致非辐射复合,造成热耗散增加和发光效率下降^[11]。当器件在直流电驱动下工作时,注入电子在传输过程中有可能落入陷阱态,由于陷阱能级处在导带下方,电子被俘获并停留在陷阱中,导致电子与空穴在量子点发光区域复合发光效率下降^[12];同时,当陷阱深度很大时,电子需要较高热能或外部激发才能脱离陷阱^[13]。陷阱中的电荷不能流动,就会产生电荷积

累,导致局部电场变化,影响注入与发光效率^[14];此外,陷阱释放不稳定也会引起非辐射损失增大和发光波动,造成器件发光效率下降^[15],并且纯直流电驱动发光恒定,无法实现高频开关、亮度可调、发光频闪或脉冲信号调制^[16],将限制在显示、光通信、光神经接口等领域的应用。研究人员利用交流电场在正负方向交替施加于器件,可以周期性改变电荷移动方向和注入平衡,提高注入效率,延长发光稳定性^[17-18]。此外,周期性交流电场干扰陷阱电势,提供额外激发能量,有利于被俘获的电子脱离出来,重新参与迁移或复合,有助于发光稳定提升和光强波动减少^[19]。交流电场具备频率、幅值、波形可调性,可用于控制发光亮度、闪烁频率、脉冲信号传输等,实现动态调光、灰阶控制、光调制通信、可视化反馈等功能^[20]。

本文设计并制备了一种基于交流电场调控的三端 QLED 器件,器件结构如图 1(a)所示。在传统两端 QLED 器件(玻璃/ITO/PEDOT:PSS/PVK/QDs/ZnO/Ag)基础上^[21],通过原子层沉积引入了一层 Al_2O_3 绝缘层,并在其上制备了第三个电极,即 Ag 栅极。其中,ITO 阳极与 Ag 阴极作为驱动电极,用于施加直流偏压,提供发光的基准能量;Ag 栅极则作为调控电极,用于施加交流信号,实现对发光过程的动态调制。该三端结构设计通过增设额外电源端口,使 QLED 器件具备同时接受直流电驱动与交流电调控能力。相较于传统单端 QLED 驱动方案,该结构实现了“直流供电、交流调控”的创新驱动模式,可实现对电流分布和载流子动态过程的精准调控。该模式能够依托直流电提供稳定电流输出,保障器件稳定发光,又能借助交流电的周期性特性清除积累,激发陷阱释放,抑

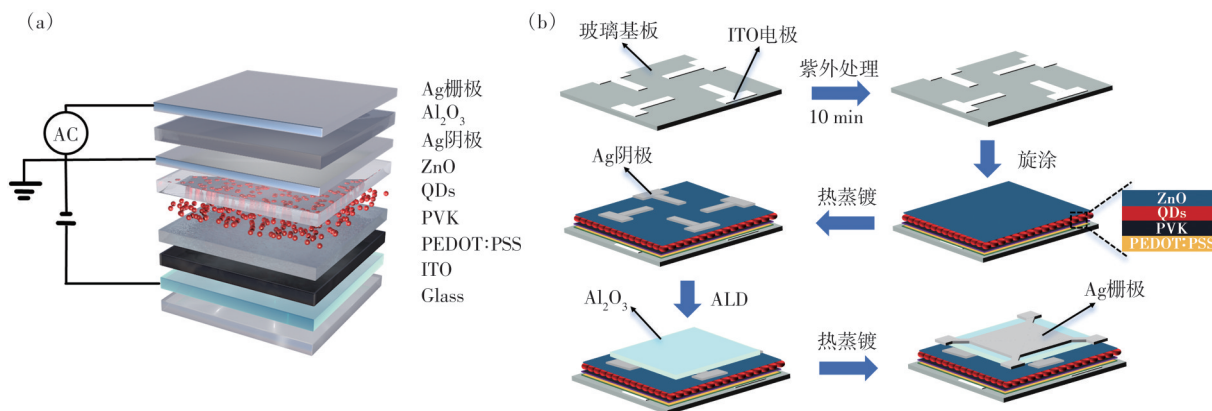


图1 (a)三端QLED器件结构示意图;(b)三端QLED器件制备工艺流程图

Fig.1 (a) Schematic structure of a three-terminal QLED device. (b) Process flowchart for the preparation process of three-terminal QLEDs

制热积累效应,减缓材料老化速度和实现可控发光^[22],有效提升了器件光电性能。

2 器件制备与实验方法

2.1 三端 QLED 器件制备

图 1(b)是三端 QLED 器件的制备工艺流程图,包括 ITO 阳极电极制备和表面处理,空穴注入、传输层、量子点发光层和电子传输层制备,阴极、绝缘层和栅极制备。利用光刻工艺制备图案化 ITO 薄膜(2 mm×2 mm,阳极)作为玻璃基底(3 cm×3 cm),并通过紫外臭氧处理 10 min 优化衬底表面特性。将 PEDOT:PSS 溶液经 0.5 μm 过滤器后,利用旋涂工艺(转速 3 000 r/min,时间 40 s)在 ITO 基板上涂覆一层 PEDOT:PSS 薄膜,经 150 °C 烘烤 20 min 后形成厚度为 35 nm 的空穴注入层(Hole injection layer, HIL);将溶解于氯苯中的 PVK 溶液(5 mg/mL)经 0.22 μm 过滤器后,利用旋涂工艺(转速 3 000 r/min,时间 40 s)在 PEDOT:PSS 薄膜表面涂覆一层 PVK 薄膜,经 100 °C 退火 15 min 固化后,获得厚度为 55 nm 的空穴传输层(Hole transport layer, HTL)。将 CdZnSe/ZnS/CdZnS 量子点溶液经 0.22 μm 过滤器净化后,利用旋涂工艺(转速 3 000 r/min,时间 40 s)在空穴传输层表面涂覆一层量子点薄膜,经 65 °C 下热处理 15 min 后形成厚度为 25 nm 的量子点发光层。ZnO 溶液经 0.22 μm 过滤器过滤后,利用旋涂工艺(转速 3 000 r/min,时间 40 s)在量子点发光层表面涂覆一层 ZnO 薄膜,经 65 °C 下热处理 15 min 后,获得厚度为 45 nm 的电子传输层(Electron transport layer, ETL)。利用真空镀膜机(Lesco, Spectros PVD 150)在电子传输层表面沉积一层厚度 100 nm 图案化金属 Ag 薄膜(Ag 阴极),采用原子层沉积技术(Atomic layer deposition, ALD)在 Ag 阴极表面沉积一层厚度为 60 nm 的 Al₂O₃绝缘层,最后再利用真空镀膜机在 Al₂O₃绝缘层表面沉积一层厚度为 100 nm 的金属 Ag 薄膜(Ag 栅极),从而成功地制备出玻璃/ITO/PEDOT:PSS/PVK/QDs/ZnO/Ag/Al₂O₃/Ag 的三端 QLED 器件。

2.2 表征和器件测量

实验采用扫描电子显微镜(SEM, Thermo Scientific, Verios G4)表征了 CdZnSe/ZnS/CdZnS 量子点的微观结构。采用直流电源、交流信号发生器和电学表征设备测试三端 QLED 器件的光电性能。测试过程中,直流电源连接 ITO 阳极与 Ag 阴

极,提供 0~20 V 可调直流偏压;通过探针接触 Ag 栅极,交流信号发生器输出正弦波和方波信号。在室温条件下,利用半导体测试仪(Keithley 4200)同步采集阳极和阴极电流、电压数据来分析三端 QLED 器件电学特性,包括亮度、EQE、电流效率、功率效率等。

3 结果与讨论

图 2(a)是 CdZnSe/ZnS/CdZnS 量子点 SEM 图,插图展示了核-壳型 QD 结构示意图,图 2(b)展示了三端 QLED 器件横截面 SEM 图。从图中可以看出,QD 表面和各功能层的分布较为均匀。图 2(c)是三端 QLED 器件的能级分布图,能保证器件载流子的顺利注入。图 2(d)是器件分别在栅压(Gate voltage, V_g)为 5V_{pp} 和 15V_{pp}(V_{pp} 是交流信号峰峰值电压)下的电致发光(Electroluminescence, EL)光谱。从图中可以看出,在不同幅值栅压下,光谱峰值波长基本重合,集中在 620 nm 附近,说明栅极调控不改变发光主峰波长。光强随栅压增大而显著提升,光强峰值在栅压幅值 15V_{pp} 时最高,0V_{pp} 时光强最弱。实验结果表明,栅压幅值越大,器件发射光的强度越高,且光谱形状相似,说明发光机制没有因为栅压而改变,且无新发光峰产生,不同栅压幅值 V_{pp} 调控不改变光谱主峰波长。

3.1 交流电场调控三端 QLED 器件的载流子调控与复合发光机理

三端 QLED 器件中 Ag 栅极不参与电子注入,而是通过调控局部电场分布来实现调控 Ag 阴极的电子注入。基于载流子转移过程,本文提出一种电子迁移率为核心的简化模型,分析 QD 薄膜的栅压调控工作机制。器件在初始状态下没有电流,量子点处于平衡态;当外电场施加到 QLED 器件上时,量子点发光层能带将发生弯曲,如图 3(a)所示(箭头表示电场方向)。当仅有直流调控时,从阳极到阴极,导带与价带均向下弯曲,能带向上弯曲程度随直流电压增大而增强^[23]。此外,周期性交流电场有助于释放被捕获在量子点表面态和界面态中的电荷,从而有效抑制非辐射复合^[24]。当施加正向栅压时,ZnO 表面能带发生剧烈弯曲,在 ZnO/Al₂O₃界面处形成极窄的三角形势垒,为空穴通过 F-N 隧穿注入提供了必要条件。如图 3(b)所示,在正向交流电半周期内,价带向下弯曲更加剧烈,导带向上弯曲更为陡峭,发光层倾斜角度增

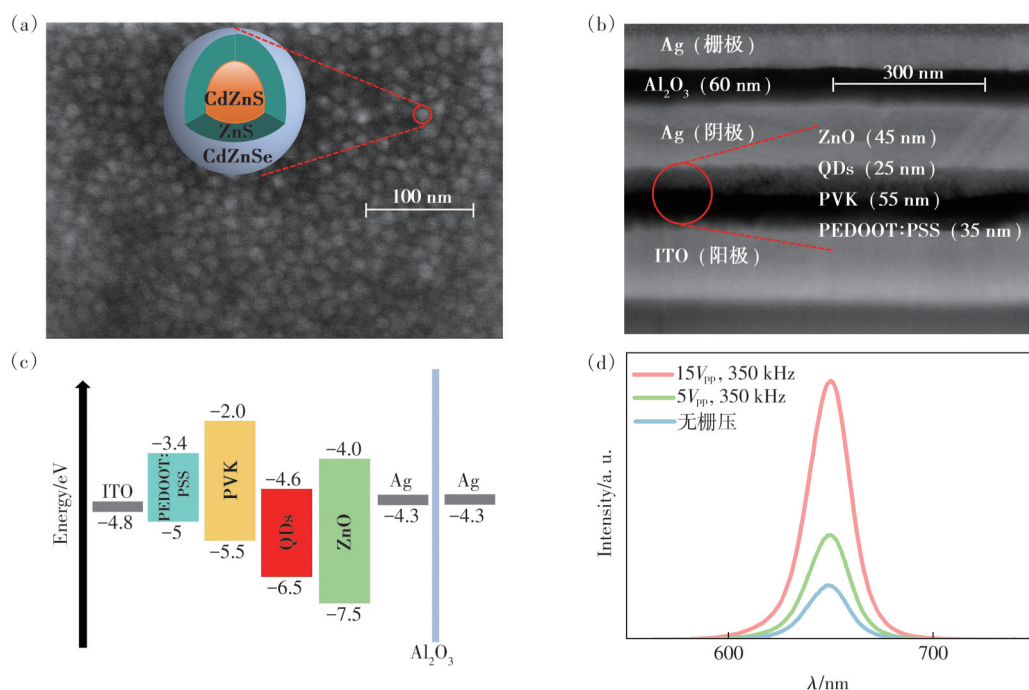


图2 (a) CdZnSe/ZnS/CdZnS 量子点 SEM 图, 插图是核-壳型 QD 结构示意图; (b) 三端 QLED 器件的横截面 SEM 图; (c) 三端 QLED 器件能级结构图; (d) 三端 QLED 器件的 EL 光谱与栅电的关系

Fig.2 (a) SEM image of CdZnSe/ZnS/CdZnS QDs and the inset shows a schematic diagram of the core-shell QD structure. (b) Cross-sectional SEM image of three-terminal QLEDs. (c) Energy level diagram of three-terminal QLEDs. (d) EL spectra *versus* gate voltage of a three-terminal QLED

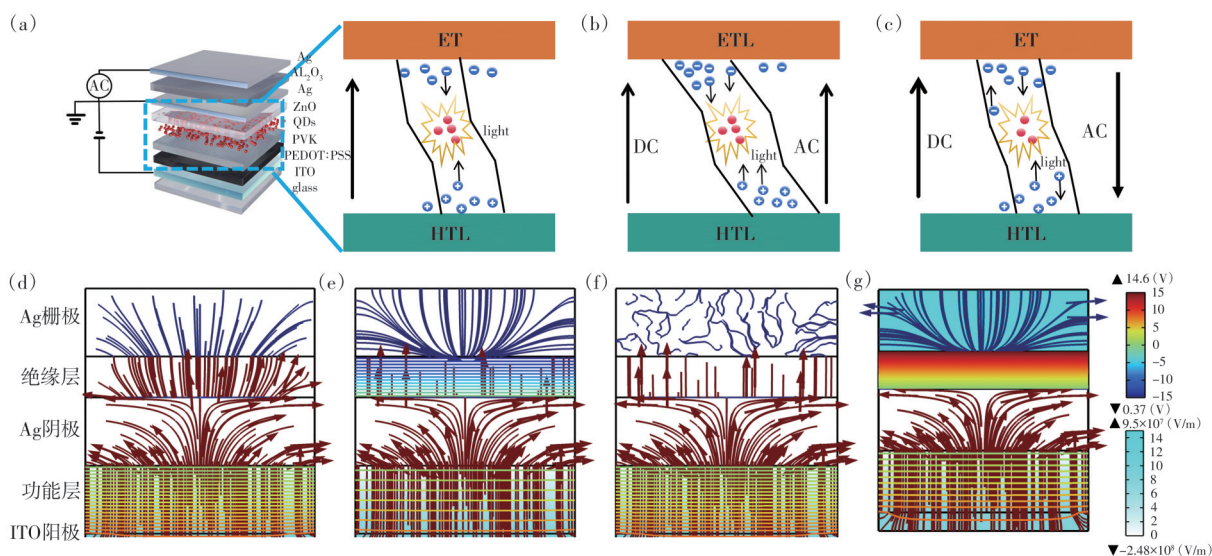


图3 (a) 无栅压时三端 QLED 器件能级示意图; (b) 正向栅压下能带弯曲示意图; (c) 反向栅压下能带弯曲示意图; 三端 QLED 器件的有限元模型: (d) 无栅压时电势分布, (e) 正向栅压时电势与电场线分布, (f) 交流电正负方向临界时电势与电场线分布, (g) 反向栅压时电势与电场线分布; 右侧彩色和浅蓝色色标分别表示电势值和电场强度

Fig.3 (a) Schematic diagram of energy levels of three-terminal QLED devices without gate voltage. (b) Schematic diagram of energy band bending under forward gate voltage. (c) Schematic diagram of energy band bending under reverse gate voltage. Finite element model of three-terminal QLED devices: (d) potential distribution without gate voltage, (e) distribution of electric potential and electric field lines under forward gate voltage, (f) distribution of electric potential and electric field line at the critical points of the AC signal (positive and negative directions), (g) distribution of electric potential and electric field line under reverse gate voltage. The color scale on the right indicates the potential value (rainbow) and electric field strength (light blue), respectively

大,加剧了能带弯曲,使得ITO阳极的费米能级进一步降低;同时,空穴传输层的HOMO能级势垒变得更窄,促进了空穴从ITO阳极的注入,并可能影响电子从Ag阴极的注入。在强电场下,绝缘层、银电极和ZnO之间形成极薄的三角形势垒,为载流子量子隧穿创造了条件。如图3(c)所示,在负向交流电半周期,能带弯曲程度减轻或发生反向变化。交流调制通过周期性调节能带弯曲,降低注入势垒,促进隧穿效应,并实现电荷的积累-释放循环,产生瞬时高浓度载流子注入,从而提高量子点层的发光强度。

图3(d)是三端QLED器件有限元模型,其中等值线表示电势分布(伏特,V),箭头沿电场线和电场方向,浅蓝色代表了电场强度(伏特/米,V/m)的大小,电势和电场强度的大小均通过图片右侧的色标表示。仅施加直流电时,电场垂直分布均匀但缺乏局部增强,电子注入效率低,如图3(d)所示。施加正向交流信号后,顶部电极电势增强

了电子注入方向的电场,电势梯度增大,电子迁移加快并集中,利于高效辐射复合,如图3(e)显示。交流信号处于临界转换位置时,器件处于瞬时弱电场状态,电子注入被抑制,陷阱态电子开始释放或重新分布,如图3(f)显示。图3(g)中,负向交流电产生反向瞬时电场,抑制过量电子注入并激发积聚的滞留电子。

3.2 调控波形、频率与电压对三端 QLED 器件性能的影响

调控率是指施加栅压后的数据(R_2)与没有施加电压之前的数据(R_1)差的绝对值与没有施加电压之前的数据(R_1)的比值,即 $|R_2 - R_1|/R_1$ 。其中,提升率= $(R_2 - R_1)/R_1 \times 100\%$,正值($R_2 > R_1$)表示性能提升;降低率= $(R_1 - R_2)/R_1 \times 100\%$,负值($R_2 < R_1$)表示性能降低;最大调控幅度是指同一测试条件下,最大提升率与最大降低率的绝对值的最大值。图4是在低频方波和正弦波驱动下三端QLED器件性能调控响应特性。实验环境条件为25℃、湿度

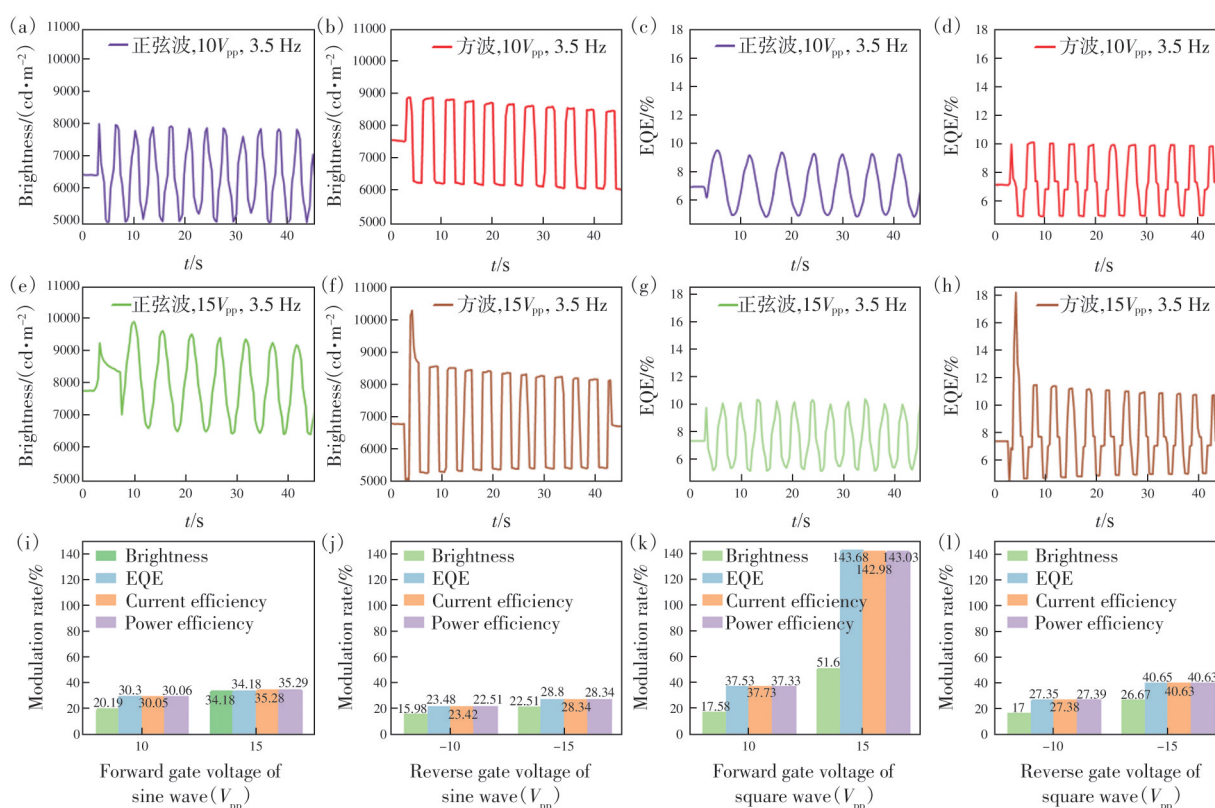


图4 低频方波和正弦波驱动下三端QLED器件性能调控:(a)~(d)栅压幅值10V_{pp}调控下三端QLED器件亮度与外量子效率随时间的演变规律;(e)~(f)栅压幅值15V_{pp}调控下三端QLED器件亮度与外量子效率随时间的演变规律;(i)~(l)栅压幅值与三端QLED器件调控率的关系曲线

Fig.4 Performance control of three-terminal QLED devices under the role of low-frequency square wave and sine wave. (a)~(d) Evolution of brightness and EQE of three-terminal QLED devices under the control of gate voltage amplitude of 10V_{pp}. (e)~(f) Evolution of brightness and EQE of three-terminal QLED devices under the control of gate voltage amplitude of 15V_{pp}. (i)~(l) Relationship curve between gate voltage amplitude and modulation rate of three-terminal QLED devices

40%。由于施加的交流电频率较低,积分球检测到的亮度和外量子效率曲线较好地与调控波形一致。在正弦波栅压条件下,三端 QLED 器件亮度和外量子效率曲线均呈现出周期性的波动特征。电子在电场作用下经历缓慢加速与减速过程后,整体迁移呈渐变状态,如图 4(a)、(c)、(e)、(g)所示。当栅压为 3.5 Hz、10V_{pp} 的正弦波时,亮度和外量子效率曲线随时间周期性起伏,变化过程平滑且无明显突变,如图 4(a)、(c)所示。相较之下,方波驱动下的响应则表现出明显的电子注入阶跃变化,如图 4(b)、(d)、(f)、(h)所示。电场瞬时切换导致电流发生突变,进而亮度曲线和外量子效率曲线也随之变化,产生的快速响应有助于清理陷阱中的电子,避免它们长时间积累。

在栅压频率为 3.5 Hz 和不同栅压幅值条件下,方波调控对性能的增强更为显著,如表 1 和表 2 所示。主要是因为方波具有近乎无穷大的

dV/dt(电压变化率),能产生瞬态和极强的电场脉冲,更有效地扰动陷阱势垒,为被俘获的电荷提供足够的能量使其脱陷。相比之下,正弦波的 dV/dt 是渐变的,其最大电场变化率有限,可能导致部分深能级陷阱中的电子无法被有效激发而部分残留。因此,方波驱动能更彻底地清理陷阱,避免载流子积累和非辐射复合。从图 4(j)、(l)可以看出,栅压幅值从 -10V_{pp} 变化到 -15V_{pp} 时,三端 QLED 器件调控率整体上升,说明电场反向时电子流向 ZnO 层,减少量子点层电子过量积累,电子周期性的减少降低了焦耳热使得间接提升了功率效率。在相同栅压下,如图 4(i)、(k)所示,方波调控率高于正弦波,瞬时高电场带来较高亮度调控但稳定性差。正弦波调控正负向栅压协同实现电子动态平衡,正向栅压的调控效果普遍优于负向栅压,表明器件在正向栅偏置下更易实现有效调控。接下来,我们横向对比了交流电压与频率的调控作用。

表 1 三端器件在 3.5 Hz 正弦波和方波条件下的亮度变化

Tab. 1 Variation of luminance in the three-terminal device under 3.5 Hz sine wave and square wave conditions

栅压条件	调控前/(cd·m ⁻²)	调控最小亮度/(cd·m ⁻²)	调控最大亮度/(cd·m ⁻²)
10 V, 3.5 Hz, 正弦波	7 830	6 507(-16.9%)	9 957(27.2%)
15 V, 3.5 Hz, 正弦波	6 539	5 073(-22.42%)	8 115(24.10%)
10 V, 3.5 Hz, 方波	7 581	6 078(-19.82%)	8 915(17.60%)
15 V, 3.5 Hz, 方波	6 842	5 017(-26.67%)	10 374(51.62%)

表 2 三端器件在 3.5 Hz 正弦波和方波条件下的 EQE 变化

Tab. 2 EQE variation of the three-terminal device under 3.5 Hz sine and square wave conditions

栅压条件	调控前	最小 EQE	调控最大 EQE
10 V, 3.5 Hz, 正弦波	7.92%	5.90%(-25.51%)	10.32%(30.30%)
15 V, 3.5 Hz, 正弦波	7.50%	5.25%(-30%)	10.49%(39.87%)
10 V, 3.5 Hz, 方波	7.62%	5.53%(-27.43%)	10.48%(37.53%)
15 V, 3.5 Hz, 方波	7.51%	4.45%(-40.75%)	18.30%(143.67%)

图 5(a)~(d)是固定频率为 350 kHz,阳极工作电压为 10 V,方波栅压幅值分别为 5V_{pp}、10V_{pp} 和 15V_{pp} 条件下三端 QLED 器件外量子效率、亮度、电流效率和功率效率随工作时间变化的关系。从图中可以看出,在栅压频率不变情况下,随着栅压幅值 V_{pp} 增大,调控电场增加,有效降低了 ZnO 和 QD 发光层界面势垒,电子隧穿概率增长,三端 QLED 器件 EQE、亮度、电流效率及功率效率随时间变化幅度及其平均值均显著提升,器件亮度变化在图 5(g)中也能直观看出。图 5(e)、(f)分别是在栅压幅值为 10V_{pp} 和不同栅极调控频

率条件下三端 QLED 器件外量子效率、亮度随工作时间变化的关系。从图中可看出,三端 QLED 器件外量子效率和亮度随着调控频率增加而呈现出增大趋势,并且在 1 kHz 时达到了最大值。此外,在较高频率(1 kHz, 10 kHz, 100 kHz)条件下,三端 QLED 器件亮度随栅压波动极小,稳定在 1 100~1 110 cd/m²,表现出优异的稳定性。主要原因在于交流栅压方向切换周期远短于载流子输运与复合时间,使得电子与空穴注入及其在发光层内的浓度能够动态维持在一个稳定的平衡点,从而实现了光输出的高度稳定。相比之下,在低频

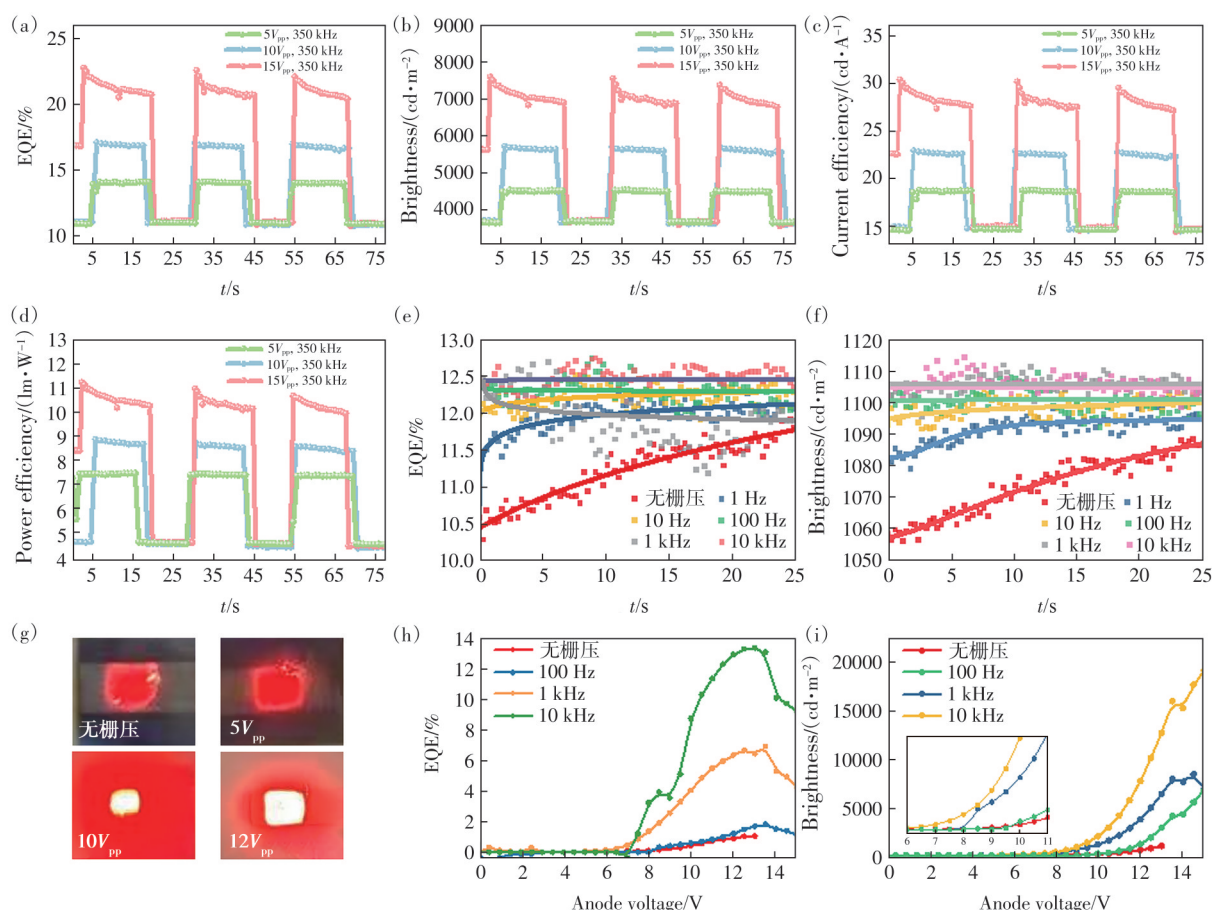


图5 不同栅压幅值条件下三端 QLED 器件性能随工作时间变化的关系:(a)外量子效率,(b)亮度,(c)电流效率,(d)功率效率;不同栅压频率条件下三端 QLED 器件性能随工作时间变化的关系:(e)外量子效率,(f)亮度;(g)三端 QLED 器件亮度随栅压变化;(h)三端 QLED 器件外量子效率与阳极电压的关系;(i)三端 QLED 器件亮度与阳极电压的关系

Fig.5 Relationship between the performance of three-terminal QLED devices and operating time under different gate voltage amplitudes: (a)EQE, (b)brightness, (c)current efficiency, (d)power efficiency. Relationship between the performance of three-terminal QLED devices and operating time under different gate voltage frequencies: (e)EQE, (f)brightness. (g) Brightness variation of three-terminal QLED device with gate voltage. (h) EQE of three-terminal QLED devices *versus* anode voltage. (i)Brightness of three-terminal QLED devices *versus* anode voltage

(1 Hz, 10 Hz)或无栅压驱动条件下,三端 QLED 器件外量子效率和亮度随栅压呈现明显的线性上升趋势和波动,主要原因可归因于复合区域分散及较高的非辐射复合比例。

图 5(h)、(i)分别展示了固定栅压幅值(10V_{pp})、不同频率(100 Hz, 1 kHz, 10 kHz)条件下三端 QLED 器件外量子效率与亮度随阳极电压的变化曲线。从图中可以看出,无栅压驱动时,QLED 器件外量子效率与亮度随阳极电压增长缓慢,表明电子与空穴注入不平衡,复合效率低下。施加交流栅压后,三端 QLED 器件性能得到显著提升,表现为在相同阳极电压下获得更高的外量子效率和亮度。进一步地,高频(10 kHz)栅压在较高阳极

电压区间展现出最明显的优势,主要归因于高频交变电场能更有效地在发光层附近诱导并积累空间电荷,动态优化载流子的输运平衡,从而同时提升电子与空穴的注入效率,增强辐射复合。

4 结 论

本文成功地制备了一种基于交变电场调控的三端 QLED 器件,通过利用施加在栅极的电压波形、幅值和频率协同调控,可有效地调节电子迁移,从而减少载流子注入和复合的不平衡性。与无栅压时相比,三端 QLED 器件 EQE 从 7.5% 提高到 18.3%,亮度从 6 842 cd/m² 提高到 10 374 cd/m²,分别提高了 143.7% 和 51.6%。实验结果表

明,利用交变电场调控器件电子迁移是一种有效优化载流子平衡的策略,该方案不仅能有效地提升 QLED 器件的光学性能,还为解决传统 QLED 器件中载流子注入不平衡技术难题提供了新的技术途径,有望推动 QLED 器件在显示领域的广泛

应用。

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.20250237>

参 考 文 献:

- [1] PAN Z X, RAO H S, MORA-SERÓ I, *et al.* Quantum dot-sensitized solar cells [J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2018, 47(20): 7659-7702.
- [2] JIA H R, WANG F Z, TAN Z A. Material and device engineering for high-performance blue quantum dot light-emitting diodes [J]. *Nanoscale*, 2020, 12(25): 13186-13224.
- [3] LITVIN A P, MARTYNENKO I V, PURCELL-MILTON F, *et al.* Colloidal quantum dots for optoelectronics [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2017, 5(26): 13252-13275.
- [4] LIU Y T, SUN Y Y, YAN X H, *et al.* Realizing low voltage-driven bright and stable quantum dot light-emitting diodes through energy landscape flattening [J]. *Light Sci. Appl.*, 2025, 14(1): 50.
- [5] HUANG Y M, SINGH K J, HSIEH T H, *et al.* Gateway towards recent developments in quantum dot-based light-emitting diodes [J]. *Nanoscale*, 2022, 14(11): 4042-4064.
- [6] FAN J P, HAN C F, YANG G J, *et al.* Recent progress of quantum dots light-emitting diodes: materials, device structures, and display applications [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(37): 2312948.
- [7] KIM J, ROH J, PARK M, *et al.* Recent advances and challenges of colloidal quantum dot light-emitting diodes for display applications [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(20): 2212220.
- [8] KIM J, SONG S, KIM Y H, *et al.* Recent progress of quantum dot-based photonic devices and systems: a comprehensive review of materials, devices, and applications [J]. *Small Struct.*, 2021, 2(3): 2000024.
- [9] LIU Y B, XU M L, LONG H, *et al.* Alternating current electroluminescence devices: recent advances and functional applications [J]. *Mater. Horiz.*, 2024, 11(21): 5147-5180.
- [10] QI H, WANG S J, JIANG X H, *et al.* Research progress and challenges of blue light-emitting diodes based on II - VI semiconductor quantum dots [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2020, 8(30): 10160-10173.
- [11] BAE W K, PARK Y S, LIM J, *et al.* Controlling the influence of Auger recombination on the performance of quantum-dot light-emitting diodes [J]. *Nat. Commun.*, 2013, 4(1): 2661.
- [12] MELNYCHUK C, GUYOT-SIONNEST P. Multicarrier dynamics in quantum dots [J]. *Chem. Rev.*, 2021, 121(4): 2325-2372.
- [13] HANEED H F, ZEIDELL A M, JURCHESCU O D. Charge carrier traps in organic semiconductors: a review on the underlying physics and impact on electronic devices [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2020, 8(3): 759-787.
- [14] JIANG N, MA G Q, SONG D D, *et al.* Defects in lead halide perovskite light-emitting diodes under electric field: from behavior to passivation strategies [J]. *Nanoscale*, 2024, 16(8): 3838-3880.
- [15] CHENG H Y, FENG Y M, FU Y, *et al.* Understanding and minimizing non-radiative recombination losses in perovskite light-emitting diodes [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2022, 10(37): 13590-13610.
- [16] GACIO D, ALONSO J M, GARCIA J, *et al.* PWM series dimming for slow-dynamics HPF LED drivers: the high-frequency approach [J]. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2012, 59(4): 1717-1727.
- [17] YUE X Y, FAN J J, XIANG Q J. Internal electric field on steering charge migration: modulations, determinations and energy-related applications [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2022, 32(12): 2110258.
- [18] SONG J Z, LI J H, XU L M, *et al.* Room-temperature triple-ligand surface engineering synergistically boosts ink stability, recombination dynamics, and charge injection toward EQE - 11.6% perovskite QLEDs [J]. *Adv. Mater.*, 2018, 30(30): 1800764.
- [19] LIN T L, HUANG Y, ZHONG S C, *et al.* Passive trapping of biomolecules in hotspots with all-dielectric terahertz meta-materials [J]. *Biosens. Bioelectron.*, 2024, 251: 116126.

- [20] WANG L, XIAO L, GU H S, *et al.* Advances in alternating current electroluminescent devices [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2019, 7(7): 1801154.
- [21] HE G F, PFEIFFER M, LEO K, *et al.* High-efficiency and low-voltage *p-i-n* electrophosphorescent organic light-emitting diodes with double-emission layers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 85(17): 3911-3913.
- [22] DU J R, WANG X M, SUN S, *et al.* Pushing trap-controlled persistent luminescence materials toward multi-responsive smart platforms: recent advances, mechanism, and frontier applications [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(37): 2314083.
- [23] HO S, LIU S Y, CHEN Y, *et al.* Review of recent progress in multilayer solution-processed organic light-emitting diodes [J]. *J. Photonics Energy*, 2015, 5(1): 057611.
- [24] YAMAO T, SHIMIZU Y, TERASAKI K, *et al.* Organic light-emitting field-effect transistors operated by alternating-current gate voltages [J]. *Adv. Mater.*, 2008, 20(21): 4109-4112.



郑聪(2001-),男,山东泰安人,硕士研究生,2023年于聊城大学获得学士学位,主要从事交流电调控三端QLED器件的研究。

E-mail: 1983865816@qq.com



张永爱(1977-),男,江西永丰人,博士,研究员,博士生导师,2011年于福州大学获得博士学位,主要从事新型功能集成器件、微纳LED显示的研究。

E-mail: yongaizhang@fzu.edu.cn