

文章编号: 1000-7032(2026)01-0124-09

二维 h-BN 纳米片作为电子阻挡层提升 量子点发光二极管性能

王 宁, 张 玉*, 杨苏文, 胡煜峰, 娄志东, 侯延冰, 滕 枫*

(北京交通大学 物理科学与工程学院, 发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要: 量子点发光二极管(QLED)作为新一代显示技术的重要发展方向,其电子传输层(ETL)通常采用氧化锌(ZnO)材料。然而,ZnO 过高的电子迁移率易导致发光层(EML)中载流子注入失衡,同时其表面氧空位等缺陷会引发非辐射复合。本研究创新性地引入六方氮化硼(h-BN)这一典型二维材料,在 EML 与 ZnO 界面间构建电子阻挡层。实验结果表明,h-BN 的引入有效改善了器件内部载流子平衡,显著抑制了 ZnO 缺陷导致的发光猝灭。经 h-BN 界面修饰后,QLED 器件的外量子效率(EQE)和电流效率(CE)分别达到 17.31% 和 18.80 cd/A,相较参照器件实现了 12.4% 和 7.43% 的提升。该研究不仅揭示了二维材料在 QLED 器件中的创新应用价值,更为其在显示技术领域的深入开发提供了新的研究思路。

关键词: QLED; 六方氮化硼; 电子阻挡层; 载流子注入平衡; 界面修饰

中图分类号: TN312.8

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20250220

CSTR: 32170.14.CJL.20250220

2D h-BN Nanosheets as an Efficient Electron Blocking Layer for Enhanced Performance of Quantum Dot Light-emitting Diodes

WANG Ning, ZHANG Yu*, YANG Suwen, HU Yufeng, LOU Zhidong,

HOU Yanbing, TENG Feng*

(Key Laboratory of Luminescence and Optical Information, Ministry of Education, School of Physical Science and Engineering,
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

* Corresponding Authors, E-mail: zhyu@bjtu.edu.cn; fteng@bjtu.edu.cn

Abstract: Quantum dot light-emitting diodes (QLEDs) have emerged as a novel class of next-generation displays, with zinc oxide (ZnO) serving as a critical electron transport layer (ETL). However, the high electron mobility of ZnO often gives rise to unbalanced charge injection into the emissive layer (EML). Meanwhile, surface defects such as oxygen vacancies induce non-radiative recombination and luminescence quenching. Herein, we introduced hexagonal boron nitride (h-BN), a typical two-dimensional material, as an electron barrier layer between EML and ZnO layer. Incorporating h-BN effectively mitigates the charge carrier imbalance and suppresses the luminescence quenching caused by ZnO. Ultimately, the modification enhances the external quantum efficiency (EQE) and current efficiency (CE) of the QLED device to 17.31% and 18.80 cd/A, corresponding to relative increases of 12.34% and 7.43%, respectively, compared to reference devices. This innovative application of two-dimensional materials in QLED not only optimizes QLED device performance but also opens new avenues for the future utilization of such materials in display technology.

Keywords: QLED; hexagonal boron nitride; electron barrier layer; charge injection balance; interface modification

收稿日期: 2025-09-23; 修订日期: 2025-10-13

基金项目: 中央高校基本科研基金(2025JBZX032); 国家自然科学基金(62375012, 62234004)

Supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities(2025JBZX032); National Natural Science Foundation of China(62375012, 62234004)

1 引言

随着信息技术的迅猛发展,发光与显示器件的需求持续增长^[1]。胶体半导体量子点(QDs)因其发射波长可调、色纯度高、量子产率高、稳定性优异且加工成本低廉等独特优势,已成为领域研究焦点^[2-6]。基于QDs构筑的量子点发光二极管(QLED)在色彩还原度上表现出比有机发光二极管(OLED)更优的性能,其发光材料的稳定性也明显超越有机发光材料^[7-9]。此外,QLED可采用旋涂、喷墨打印等低成本溶液工艺制备,进一步提升了其商业化潜力^[10-13]。凭借以上优势,QLED已成为当前研究热点,并被公认为下一代显示技术的重要候选方案。另外,2023年诺贝尔化学奖授予三位在量子点领域做出杰出贡献的学者,再次凸显了QDs在显示技术中的重要地位^[14-17]。

经过多年发展,当前最前沿的QLED普遍采用有机-无机杂化叠层结构。其中,空穴注入层(HIL)与空穴传输层(HTL)多选用有机材料(如PEDOT:PSS);而电子传输层(ETL)则采用无机氧化物(如ZnO或SnO₂)。由于材料种类差异,电子进入发光层(EML)所需克服的势垒显著低于空穴;同时,ETL材料的载流子迁移率比HTL高1~2个数量级。上述双重因素导致载流子注入严重失衡,使得非辐射复合概率增大,成为制约QLED性能提升的核心瓶颈^[18-22]。为解决该问题,近年来的研究主要沿两条路径展开:(1)开发新型HTL材料(如有机-无机杂化钙钛矿、掺杂有机半导体),以缩小与ETL的迁移率差距^[23-26];(2)在与ETL界面处插入电子阻挡层(EBL),通过抑制电子过多注入实现载流子注入平衡。

2014年,Dai等首次将聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)引入QLED作为EBL,有效抑制了电子溢出与非辐射复合,使红光Cd基器件的外量子效率(EQE)创下当时20.5%的纪录^[27]。随后,Zhang等采用Al₂O₃作为EBL,同时提升了器件效率与使用寿命^[28]。2024年,Wang等利用聚乙烯吡咯烷酮(PVP)改善In基QLED的性能与稳定性^[29]。绝缘阻挡层一方面可精准调控电子注入效率,保障载流子注入平衡;另一方面,能将QD与表面缺陷密度较高的ZnO(或ZnMgO)隔开来抑制发光猝灭,已成为QLED性能优化的重要手段。然而,有机EBL材料在电流-热耦合作用下易发生老化,稳定性不足的缺陷限制了其长期可靠性。

近年来,二维(2D)层状材料因带隙可调、界面缺陷少、化学/热稳定性优异而受到广泛关注,涵盖了导体、半导体与绝缘体,已在太阳能电池等领域实现长寿命、高性能应用,为QLED的EBL设计提供了全新思路。其中,二维六方氮化硼(2D h-BN)是典型的宽带隙材料,具有很好的绝缘性,常用来作为器件的绝缘层或者保护层^[30-35]。

本研究利用2D h-BN优异的绝缘性与化学稳定性,将其作为EBL插入EML与ZnO之间,构筑出高效Cd基QLED。h-BN的绝缘特性有效抑制了电子过注入,使器件内部载流子注入趋于平衡;同时,h-BN对EML/ZnO界面缺陷的钝化作用显著抑制了激子猝灭效应,从而大幅提升器件性能。优化后发光器件的EQE达到17.31%,电流效率(CE)达到了18.80 cd/A。本工作为QLED中电荷注入不平衡问题提供了全新解决方案,并进一步彰显了二维材料在推动QLED技术中的巨大潜力。

2 实验

2.1 样品制备

QLED的制备是在已图案化的ITO玻璃基底上完成的。首先,基底依次用洗涤剂、去离子水和异丙醇各超声清洗15 min。随后,将经0.45 μm N66滤头过滤的PEDOT:PSS溶液以5 000 r/min旋涂到ITO玻璃上,并在空气中150 °C烘烤15 min。接着,将带有PEDOT:PSS薄膜的基底转移至氮气手套箱内。继续旋涂HTL,将8.0 mg/mL的TFB氯苯溶液以4 000 r/min旋涂30 s,再于150 °C烘烤30 min。待基底冷却至室温后,将20.0 mg/mL的红色Cd基量子点(分散于正辛烷)以3 000 r/min旋涂30 s。随后,将1.0 mg/mL的h-BN乙醇分散液以不同转速旋涂,并于80 °C烘烤30 min。再将ZnO纳米颗粒(NPs)的乙醇分散液以2 500 r/min旋涂30 s,同样于80 °C烘烤30 min。最后,将完成旋涂的器件移入定制的高真空蒸镀腔(腔内压力≈1×10⁻² Pa(8×10⁻⁵ Torr)),通过掩模板蒸镀100 nm厚度的铝电极。器件制备完成后,使用紫外固化胶进行封装。

2.2 样品表征

扫描电子显微镜图像采用HITACHI公司的SU8020电子显微镜在3.0 kV下测得。拉曼光谱采用WITec公司alpha300进行测定。紫外-可见吸收光谱通过SHIMADZU公司UV3600

iplus 紫外-可见近红外分光光度计进行测定。QLED 的电学和光学表征利用 ENLITECH 公司的 LQ-50X 进行测定。原子力显微镜图像采用 BRUKER 公司的 Dimension Icon 原子力显微镜进行测定。荧光光谱通过 HORIBA 公司的 Fluorolog-3 荧光光谱仪进行测定。时间分辨光致发光衰减曲线采用 Edinburgh Instruments 公司的 FSL1000 进行测定。

3 结果与讨论

h-BN 是一种典型的二维层状材料,由硼、氮原子以石墨烯式的六方晶格排列而成,常被称为“白色石墨烯”。其层间仅靠范德华力结合,易于剥离成超薄纳米片。尽管与石墨烯结构相似,但 h-BN 具有大的禁带宽度,带隙约为 5.75 eV,故在电子器件中多用作绝缘层或封装层^[35]。图 1(a)给出了分散在硅片上的 h-BN 纳米片的扫描电镜(SEM)图像,插图为本研究所用 h-BN 乙醇分散液的照片。利用 514 nm 激光对 SiO₂/Si 基底上的 h-BN 进行拉曼测试,结果如图 1(b)所示。位于 1 366 cm⁻¹的特

征峰对应 h-BN 的 E_{2g} 振动模式,而位于 521 cm⁻¹ 的特征峰则来源于 SiO₂/Si 基底^[36-37]。X 射线光电子能谱(XPS,补充文件图 S1)进一步给出 B 1s(≈190.7 eV)与 N 1s(≈398.3 eV)峰位,与文献报道一致,且无峰位偏移,表明 h-BN 未发生氧化或其他化学修饰^[38]。尽管已有大量 h-BN 的力学与电学特性的研究,但不同来源 h-BN 的关键能级参数(带隙、价带顶位置及功函数)仍存在差异。本文采用紫外-可见吸收光谱对其光学性质进行了系统表征。如图 S2 所示,谱线在约 250 nm 处出现吸收峰,该峰源于 h-BN 生长过程中引入的缺陷态^[39]。将吸收曲线转换为 Tauc 图(图 1(c))得到光学带隙约为 5.75 eV。进一步利用紫外光电子能谱(UPS,图 1(d))测定 h-BN 的功函数与价带顶位置,依据公式

$$E_{VB} = h\nu - E_{cutoff} + E_{onset}, \quad (1)$$

计算得到其价带顶与导带底分别位于 -8.6 eV 与 -2.85 eV。同样测得 ZnO 的价带顶与导带底分别为 -7.41 eV 与 -3.9 eV(图 S3、S4)。能级排列表明, h-BN 导带底显著高于 ZnO,可在界面处形成

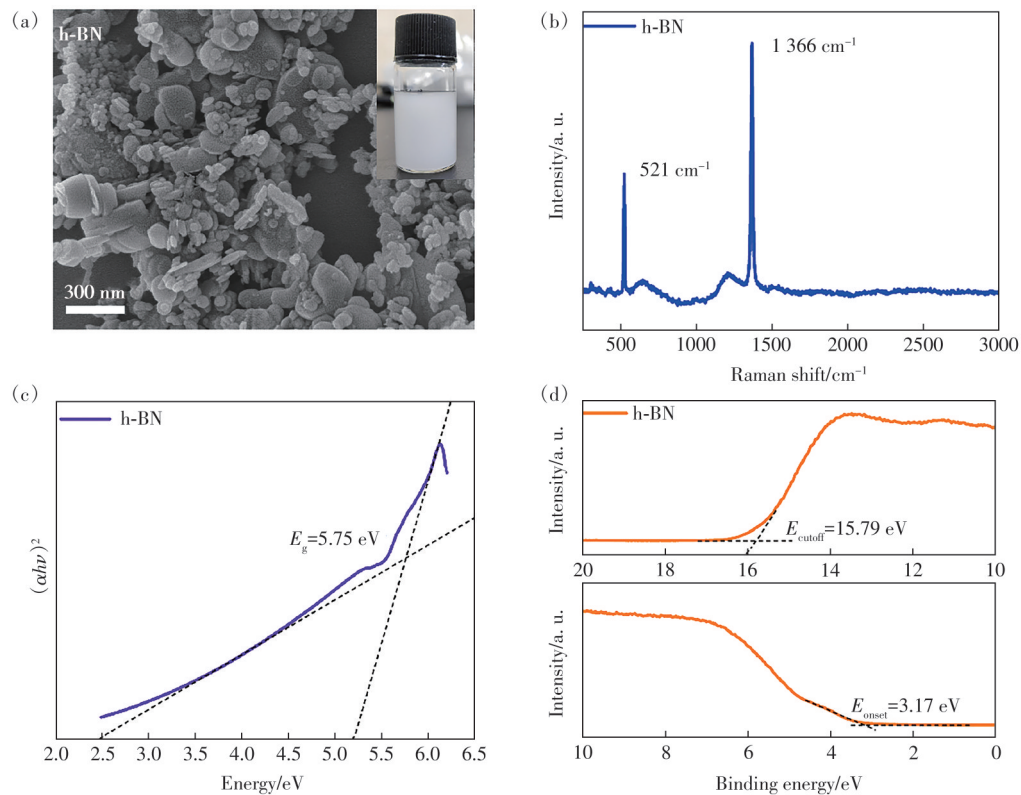


图 1 (a)h-BN 的扫描电镜照片,插图为 h-BN 纳米片的乙醇分散液;(b)h-BN 的拉曼光谱;(c)h-BN 的 Tauc 曲线;(d)h-BN 的 UPS 光谱

Fig.1 (a)SEM image of h-BN. The inset shows an ethanol dispersion of h-BN nanoflakes. (b)Raman spectra of h-BN films spin-coated onto a SiO₂/Si substrate. (c)Tauc plot of h-BN between $(\alpha h\nu)^2$ versus photon energy. (d)The UPS spectra of h-BN

电子注入势垒,从而有效抑制电子过注入。

为系统研究h-BN作为EBL对QLED性能的影响,本文采用全溶液工艺制备了结构为glass/ITO/PEDOT:PSS/TFB/QDs/h-BN/ZnO/Al的器件(图2(a)),并以不含h-BN的glass/ITO/PEDOT:PSS/TFB/QDs/ZnO/Al器件作为对照。其中,PEDOT:PSS和TFB分别作HIL和HTL,二维h-BN纳米片和ZnO分别作为EBL和ETL,CdZnSe/CdZnS/ZnS量子点作为EML。其光致发光(PL)峰位于627 nm,半峰宽(FWHM)为20 nm(图S5)。图2(b)给出了器

件截面SEM图像,展示了PEDOT:PSS和TFB层的厚度约为35 nm,QD层的厚度约为45 nm左右,h-BN和ZnO层的厚度约为70 nm。图2(c)所示的能级排列图表明,h-BN导带底显著高于ZnO,可在EML/ETL界面处形成电子注入势垒,从而抑制电子过注入。此外,CIE色坐标是评价色彩表现的标准体系,图2(d)中的黑色星形标记点显示,引入h-BN后器件的发光颜色与对照器件几乎一致,光谱轨迹紧贴标准深红色域,表明其具有高色纯度与饱和度的深红发射,适合高色域显示应用。

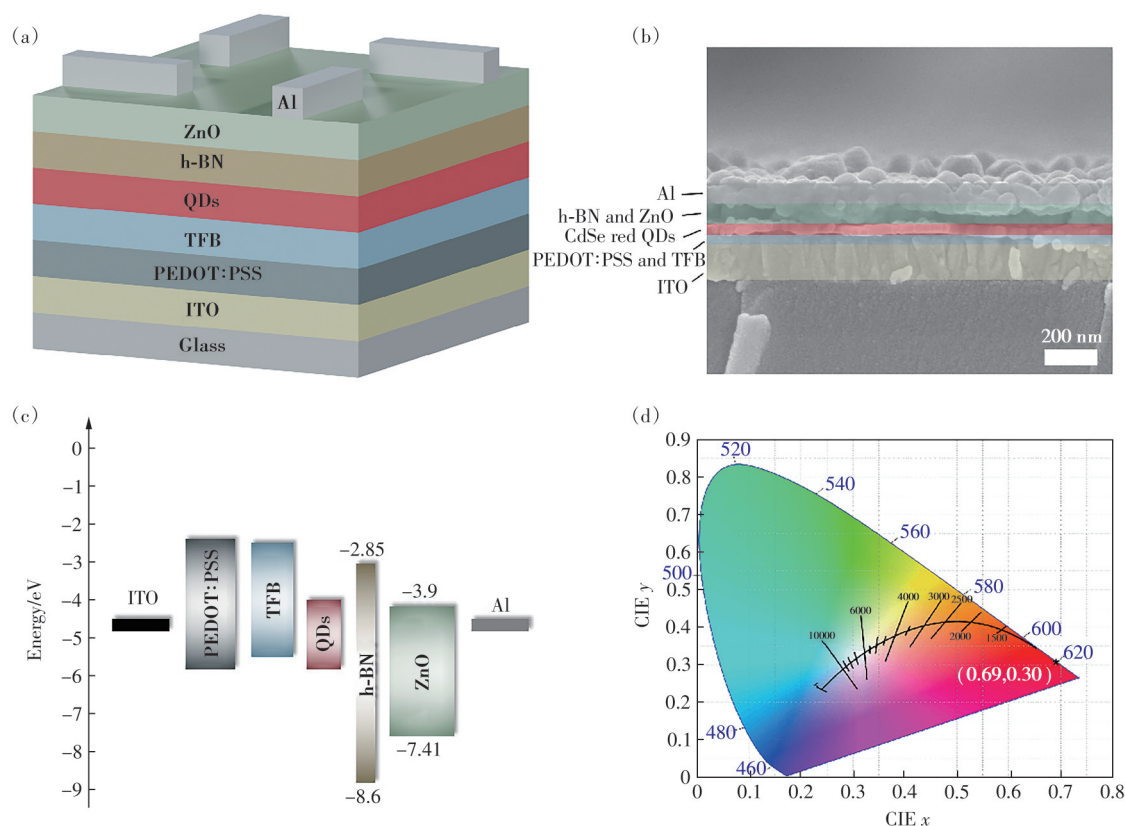


图2 (a)QLED器件结构示意图;(b)QLED器件的截面扫描电镜照片;(c)QLED器件的各层能级示意图;(d)QLED器件的CIE坐标图

Fig.2 (a) Schematic illustration of the QLED device structure. (b) Cross-sectional SEM image of the QLED device. (c) Energy level diagram of each functional layer of the device. (d) The corresponding CIE coordinates of QLED

为进一步研究h-BN厚度对QLED性能的影响,我们通过调节旋涂转速控制h-BN厚度,制备了一系列器件。图3(a)给出了不同转速下器件的电流密度-亮度-电压特性。引入h-BN后,器件电流密度显著降低,这归因于其绝缘特性(带隙约5.75 eV)及较高的导带底位置(-2.85 eV)所产生的电子阻挡效应;同时,h-BN的插入有效抑制了漏电流。在3 500,4 000,4 500 r/min三种转速下,最大亮度($L_{\max}$)分别为78 400,79 942,74 742 cd/m²。EQE与CE亦呈现相同趋势(图3(b)、(c)),当旋涂转

速为4 000 r/min时,器件性能最佳:EQE_{max}与CE_{max}相较于未引入h-BN的参照器件分别提升12.40%与7.43%,详细数据列于表1。同时,分别统计了多个参照器件与h-BN修饰器件的EQE值,证实了h-BN阻挡层对器件性能的优化效果具有可重复性(如图S6所示)。图3(d)显示,所有器件的电致发光(EL)光谱峰位及FWHM几乎完全一致,表明h-BN的引入未改变QLED的发光特性和器件色纯度,光谱稳定性得以保持。另外,我们对比研究了参照器件与h-BN处理的QLED稳定性,如图S7所

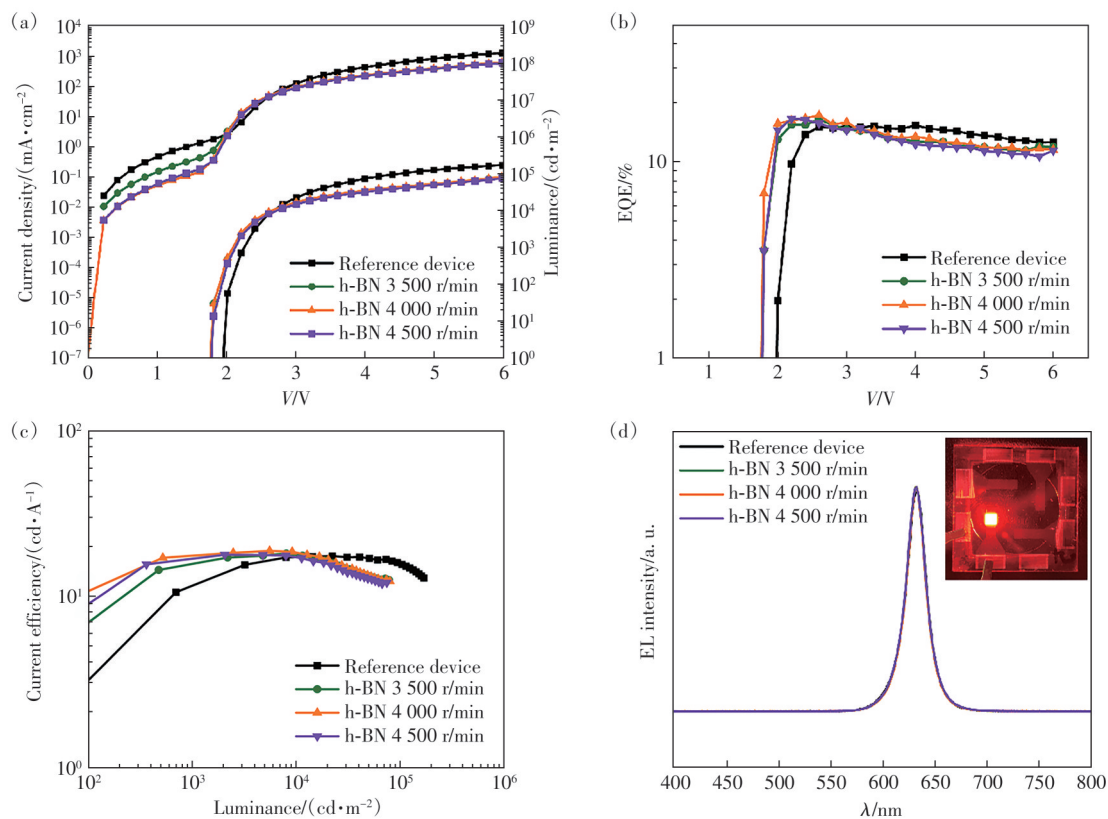


图 3 (a)电流密度-亮度-电压曲线;(b)外量子效率-电压曲线;(c)电流效率-亮度曲线;(d)QLED 器件在 3 V 电压下的归一化电致发光光谱,插图为工作时的器件照片

Fig.3 (a)Current density and luminance *versus* voltage plot. (b)External quantum efficiency *versus* voltage plot. (c)Current efficiency *versus* luminance plot. (d)Normalized EL spectra of QLEDs with and without h-BN layer at 3 V. The inset shows the luminescence photograph of the device

表 1 有无 h-BN 修饰的 QLED 器件的电致发光性能汇总
Tab. 1 Summary of EL performance for QLED without and with the h-BN layer

Sample	EL/FWHM (nm/nm)	EQE _{max} / %	CE _{max} / (cd·A ⁻¹)	V _{on} / V
Reference device	631/25	15.40	17.50	1.95
With h-BN(3 500 r/min)	631/25	16.50	18.14	1.76
With h-BN(4 000 r/min)	631/25	17.31	18.80	1.76
With h-BN(4 500 r/min)	631/25	16.64	17.81	1.76

示。可以看出,经过 h-BN 修饰后,器件的 T_{95} 寿命也得到了一定提升。h-BN 的引入促进了载流子平衡,抑制了过量电子引发的非辐射复合及 ZnO 表面的缺陷对 QD 发光的猝灭作用;同时,h-BN 高的热导率可以传导器件热量,避免局部过热导致材料老化,进而延长了器件寿命。

为进一步探究 h-BN 对 QLED 性能的影响机制,本文采用原子力显微镜(AFM)对 h-BN 薄膜的表面形貌及粗糙度进行了表征。功能层表面平整度与界面缺陷密度密切相关,降低粗糙度可有效抑制器件漏电流。为此,制备了结构为 ITO/PEDOT:

PSS/TFB/QDs/h-BN(n)的系列样品,其中 n 为 h-BN 旋涂转速(0,3 500,4 000,4 500 r/min)。图 4 给出了不

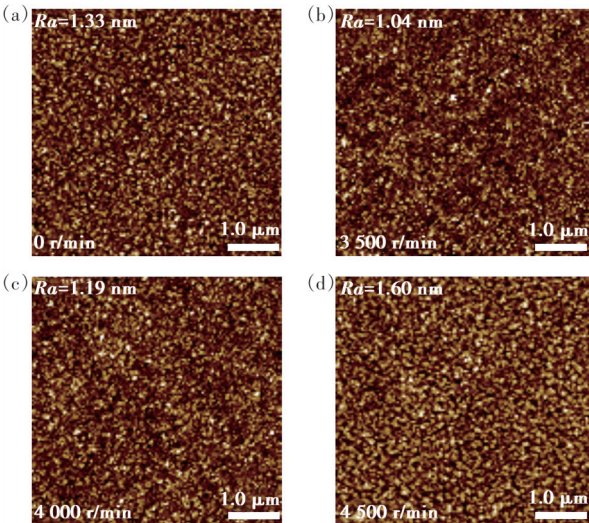


图 4 不同转速旋涂下薄膜的 AFM 图像:(a)0 r/min;(b)3 500 r/min;(c)4 000 r/min;(d)4 500 r/min

Fig.4 AFM images of the films after spin-coating h-BN at different speeds. (a) 0 r/min. (b) 3 500 r/min. (c) 4 000 r/min. (d) 4 500 r/min

同转速下h-BN薄膜的AFM形貌图。未引入h-BN的QDs参考层表面粗糙度(R_a)为1.33 nm(图4(a));而在3 500,4 000,4 500 r/min条件下,h-BN层的 R_a 依次为1.04,1.19,1.60 nm(图4(b)~(d))。结果表明,随着转速升高,薄膜粗糙度先降低,4 000 r/min时取得最小值,随后在4 500 r/min处急剧增大。后者粗糙度突增归因于过高转速导致h-BN前驱液溶剂挥发过快,抑制了液膜流平。值得注意的是,在3 500~4 000 r/min范围内,适当厚度的h-BN覆盖层使表面粗糙度较原始QDs层显著降低,与图3(a)中器件漏电流被有效抑制的趋势一致。

为深入阐明h-BN对电子注入的调控机制,我们构筑了单电子器件,其结构为ITO/ZnO/QDs/h-BN(n)/ZnO/Al,其中 n 代表h-BN的旋涂转速(0,3 500,4 000,4 500 r/min),以实现h-BN修饰与未修饰条件的对比。如图5(a)所示,单电子器件的电流密度随h-BN旋涂转速的提高呈非单调变化:先减小后增大,并在4 000 r/min时达到最低值,与该转速下器件性能最优相对应。一般认为 $R_{\max}$ 对

光电器件的性能影响较大^[40-41],结合SEM和AFM的结果(图S8和表S1),3 500 r/min时,h-BN薄膜虽算术平均粗糙度最低($R_a=1.04$ nm),但其最大峰谷差($R_{\max}=20.4$ nm)、偏度($R_{sk}=0.828$)以及峰度($R_{ku}=6.66$)均高,表面存在尖锐突起与团聚颗粒,易导致电场集中,大幅削弱绝缘性。4 000 r/min时,h-BN薄膜 $R_a=1.19$ nm及 $R_{\max}=12.3$ nm比例合理,且 $R_{ku}=3.2$ 接近理想正态分布($R_{ku}=3$),无尖锐缺陷,颗粒少,利于电场均匀分布,绝缘阻挡效果最佳。4 500 r/min时,h-BN薄膜粗糙度对称 $R_{sk}=0.048$ 以及 $R_{ku}=2.62$,避免了电场局部集中。但其 $R_a=1.60$ nm,表面颗粒密度高于4 000 r/min的薄膜,导致其绝缘性略低于4 000 r/min薄膜,但优于存在尖锐缺陷的3 500 r/min薄膜。此外,h-BN薄膜是由离散的纳米片堆叠而成,堆叠过程中在薄膜内部产生纳米尺度的空隙和通道。当转速为3 500 r/min时,电流密度反而升高,我们推断,较厚的堆叠可能因形成疏松多孔的结构而引入额外的电子隧穿或泄漏通道^[42-45]。图5(b)通过模型简要阐述了h-BN的引入利用“阻挡电子注入、促进载

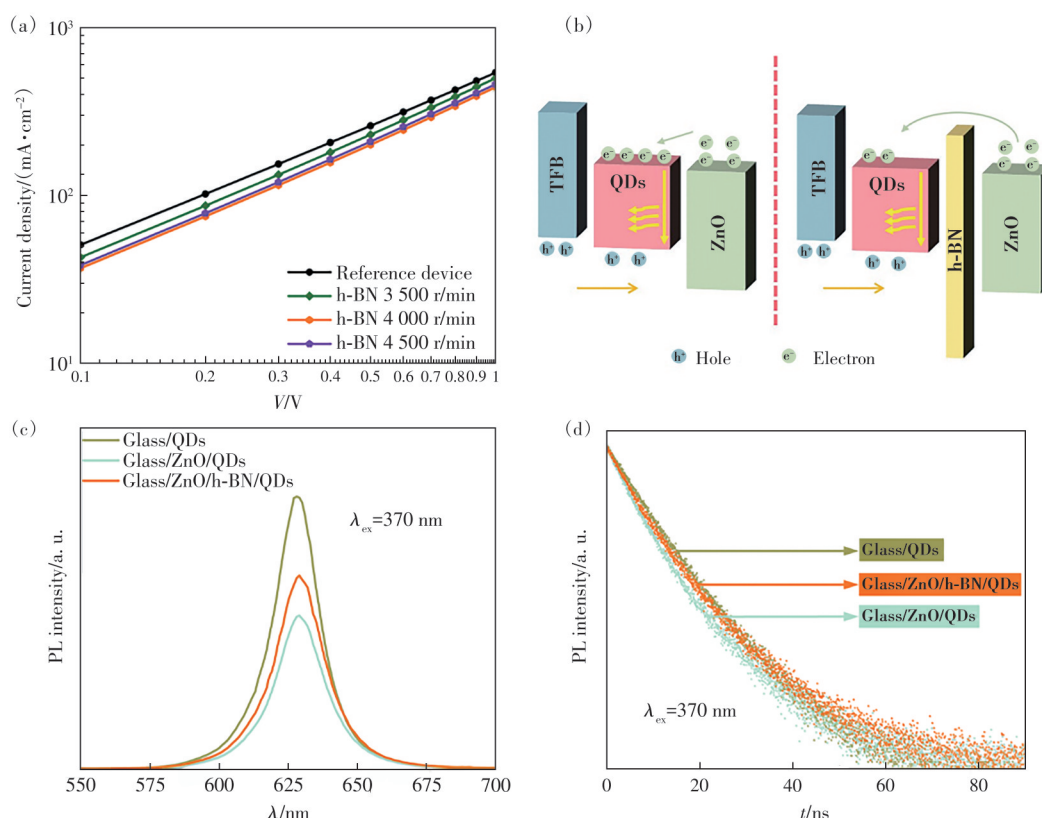


图5 (a)单电子器件的电流密度-电压曲线;(b)电荷积累示意图;(c)量子点薄膜的光致发光光谱;(d)量子点薄膜的时间分辨光致发光衰减曲线

Fig.5 (a)Current density versus voltage plot of the electron-only devices. (b)Schematic illustration of charge accumulation process. (c)Photoluminescence spectra of the QDs film. (d)Time-resolved photoluminescence decay profiles of the QDs film

流子平衡”的机制,最终实现器件性能的提升。此外,利用PL和时间分辨光致发光(TrPL)衰减曲线进一步研究了h-BN对EML/ETL界面的影响,如图5(c)所示。纯QDs薄膜的PL强度最高;而直接旋涂于ZnO上的QDs薄膜PL强度最低;在QDs与ZnO之间插入h-BN(4 000 r/min)后,PL强度有明显恢复。该结果证实ZnO表面缺陷态对QDs存在显著猝灭效应,而h-BN的引入可有效屏蔽该猝灭,提升辐射复合效率。

TrPL测试(图5(d))进一步揭示了激子动力学行为。Cd基量子点的衰减曲线按照双指数衰减模型拟合。平均寿命按如下公式计算:

$$\tau_{\text{ave}} = A_1\tau_1 + A_2\tau_2, \quad (2)$$

其中 τ_1 和 τ_2 分别为两种激发态激子的寿命, A_1 和 A_2 分别为相应寿命所占的权重,相关参数列于表S2。纯QDs的平均寿命 τ_{ave} 为10.35 ns;旋涂ZnO后降至8.77 ns,表明界面非辐射复合加剧;插入h-BN后的平均寿命 τ_{ave} 回升至9.84 ns,说明非辐射通道被有效抑制,该趋势与器件结果一致:h-BN修饰使EQE提升12.40%,CE提升7.43%。随

后,我们也将2D h-BN引入到以ZnMgO为电子传输层的红光Cd基QLEDs中,同样实现了对于较高效率发光器件的性能提升,同样反映了h-BN作为阻挡层的重要作用,具体如图S9和表S3所示。

4 结 论

本研究将h-BN成功引入QLED结构,实现了对器件载流子动力学的有效调控。h-BN作为EBL一方面有效抑制电子过注入,促进载流子平衡;另一方面降低EML/ETL界面粗糙度,显著抑制漏电流,并削弱ZnO对量子点的发光猝灭效应。与参照器件相比,h-BN修饰使器件EQE提升12.40%,CE提升7.43%。本工作不仅验证了二维材料在QLED中的应用潜力,也为高效量子点显示技术的发展提供了新的材料体系与依据。

本文补充文件和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.20250220>

参 考 文 献:

- [1] TAN Z N, XU J, ZHU T, *et al.* Bright and color-saturated quantum dot light-emitting diodes: new star for next generation displays and solid state lighting [C]. *Proceedings Volume 7518, Photonics and Optoelectronics Meetings (POEM) 2009: Solar Cells, Solid State Lighting, and Information Display Technologies, Wuhan, 2009: 751801.*
- [2] CHEN O, ZHAO J, CHAUHAN V P, *et al.* Compact high-quality CdSe-CdS core-shell nanocrystals with narrow emission linewidths and suppressed blinking [J]. *Nat. Mater.*, 2013, 12(5): 445-451.
- [3] SHANG Y Q, NING Z J. Colloidal quantum-dots surface and device structure engineering for high-performance light-emitting diodes [J]. *Nat. Sci. Rev.*, 2017, 4(2): 170-183.
- [4] CHENG Y, WAN H Y, LIANG T Y, *et al.* Continuously graded quantum dots: synthesis, applications in quantum dot light-emitting diodes, and perspectives [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2021, 12(25): 5967-5978.
- [5] CARUGE J M, HALPERT J E, WOOD V, *et al.* Colloidal quantum-dot light-emitting diodes with metal-oxide charge transport layers [J]. *Nat. Photonics*, 2008, 2(4): 247-250.
- [6] MENG T T, ZHENG Y T, ZHAO D L, *et al.* Ultrahigh-resolution quantum-dot light-emitting diodes [J]. *Nat. Photonics*, 2022, 16(4): 297-303.
- [7] JIN X, XIE K L, ZHANG T T, *et al.* Cation exchange assisted synthesis of ZnCdSe/ZnSe quantum dots with narrow emission line widths and near-unity photoluminescence quantum yields [J]. *Chem. Commun.*, 2020, 56(45): 6130-6133.
- [8] HSIANG E, YANG Z Y, YANG Q, *et al.* Prospects and challenges of mini-LED, OLED, and micro-LED displays [J]. *J. Soc. Inform. Dis.*, 2021, 29(6): 446-465.
- [9] 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.
- [10] SONG J J, WANG O Y, SHEN H B, *et al.* Over 30% external quantum efficiency light-emitting diodes by engineering quantum dot-assisted energy level match for hole transport layer [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2019, 29(33): 1808377.
- [11] CHEN M, XIE L M, WEI C T, *et al.* High performance inkjet-printed QLEDs with 18.3% EQE: improving interfacial contact by novel halogen-free binary solvent system [J]. *Nano Res.*, 2021, 14(11): 4125-4131.

- [12] WEI C T, XU B, ZHANG M, *et al.* Highly ordered inkjet-printed quantum-dot thin films enable efficient and stable QLEDs with EQE exceeding 23% [J]. *eScience*, 2024, 4(3): 100227.
- [13] ZHU T, SHANMUGASUNDARAM K, PRICE S C, *et al.* Mist fabrication of light emitting diodes with colloidal nanocrystal quantum dots [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 92(2): 023111.
- [14] GARCÍA DE ARQUER F P, TALAPIN D V, KLIMOV V I, *et al.* Semiconductor quantum dots: technological progress and future challenges [J]. *Science*, 2021, 373(6555): eaaz8541.
- [15] AHN N, LIVACHE C, PINCHETTI V, *et al.* Colloidal semiconductor nanocrystal lasers and laser diodes [J]. *Chem. Rev.*, 2023, 123(13): 8251-8296.
- [16] EFROS A L, BRUS L E. Nanocrystal quantum dots: from discovery to modern development [J]. *ACS Nano*, 2021, 15(4): 6192-6210.
- [17] MANNA L. The bright and enlightening science of quantum dots [J]. *Nano Lett.*, 2023, 23(21): 9673-9676.
- [18] WU H, ZHANG Y, ZHANG X Y, *et al.* Enhanced stability and performance in perovskite nanocrystal light-emitting devices using a ZnMgO interfacial layer [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2017, 5(20): 1700377.
- [19] WANG H L, TANG X Q, SUN G L, *et al.* All-solution-processed perovskite light-emitting diodes based on a thiol-modified ZnO electron-transporting layer [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2023, 14(25): 5827-5833.
- [20] LIU B C, LAN L H, LIU Y Y, *et al.* Improved performance of quantum dot light-emitting diodes by hybrid electron transport layer comprised of ZnO nanoparticles doped organic small molecule [J]. *Org. Electron.*, 2019, 74: 144-151.
- [21] ALSHARAFI R, ZHU Y B, LI F S, *et al.* Boosting the performance of quantum dot light-emitting diodes with Mg and PVP co-doped ZnO as electron transport layer [J]. *Org. Electron.*, 2019, 75: 105411.
- [22] QASIM K, WANG B P, ZHANG Y P, *et al.* Solution-processed extremely efficient multicolor perovskite light-emitting diodes utilizing doped electron transport layer [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2017, 27(21): 1606874.
- [23] XIE L M, SU W M. Recent progress in hole-transporting materials and inkjet-printing QLEDs [J]. *Flex. Print. Electron.*, 2023, 8(3): 033004.
- [24] FANG Y F, BAI P L, LI J Y, *et al.* Highly efficient red quantum dot light-emitting diodes by balancing charge injection and transport [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2022, 14(18): 21263-21269.
- [25] CHEN S, CAO W R, LIU T L, *et al.* On the degradation mechanisms of quantum-dot light-emitting diodes [J]. *Nat. Commun.*, 2019, 10(1): 765.
- [26] DENG Y Z, PENG F, LU Y, *et al.* Solution-processed green and blue quantum-dot light-emitting diodes with eliminated charge leakage [J]. *Nat. Photonics*, 2022, 16(7): 505-511.
- [27] DAI X L, ZHANG Z X, JIN Y Z, *et al.* Solution-processed, high-performance light-emitting diodes based on quantum dots [J]. *Nature*, 2014, 515(7525): 96-99.
- [28] ZHANG H, SUI N, CHI X C, *et al.* Ultrastable quantum-dot light-emitting diodes by suppression of leakage current and exciton quenching processes [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2016, 8(45): 31385-31391.
- [29] WANG S B, YANG W Y, LI Y, *et al.* Efficient and long lifetime red InP-based QLEDs enabled by simultaneously improved carrier injection balance and depressed leakage [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2025, 13(12): 2402677.
- [30] QIN Z X, CHEN Y T, ZHU K C, *et al.* Two-dimensional materials for perovskite solar cells with enhanced efficiency and stability [J]. *ACS Mater. Lett.*, 2021, 3(9): 1402-1416.
- [31] ZHENG D Q, ZHAO Z M, HUANG R, *et al.* High-performance piezo-phototronic solar cell based on two-dimensional materials [J]. *Nano Energy*, 2017, 32: 448-453.
- [32] SHAKER L M, ABDULAMIE A A, AL-AMIERY A A. Graphene-enabled advancements in solar cell technology [J]. *J. Alloys Compd.*, 2025, 1020: 179583.
- [33] XING R F, ZHANG X L, FAN X S, *et al.* Coupling strategies of multi-physical fields in 2D materials-based photodetectors [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37(16): 2501833.
- [34] ARYAL U K, AHMADPOUR M, TURKOVIC V, *et al.* 2D materials for organic and perovskite photovoltaics [J]. *Nano Energy*, 2022, 94: 106833.
- [35] MA K Y, KIM M, SHIN H S. Large-area hexagonal boron nitride layers by chemical vapor deposition: growth and applications for substrates, encapsulation, and membranes [J]. *Acc. Mater. Res.*, 2022, 3(7): 748-760.
- [36] JI Y X, CALDERON B, HAN Y M, *et al.* Chemical vapor deposition growth of large single-crystal mono-, bi-, tri-layer

- hexagonal boron nitride and their interlayer stacking [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(12): 12057-12066.
- [37] TAY R Y, LI H L, TSANG S H, *et al.* Trimethylamine borane: a new single-source precursor for monolayer h-BN single crystals and h-BCN thin films [J]. *Chem. Mater.*, 2016, 28(7): 2180-2190.
- [38] ZHANG C H, FU L, ZHAO S L, *et al.* Controllable co-segregation synthesis of wafer-scale hexagonal boron nitride thin films [J]. *Adv. Mater.*, 2014, 26(11): 1776-1781.
- [39] ZHANG X H, LI L L, LU Z M, *et al.* Effects of carbon and oxygen impurities on luminescence properties of BCNO phosphor [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2014, 97(1): 246-250.
- [40] KIM K B, TAK Y H, HAN Y S, *et al.* Relationship between surface roughness of indium tin oxide and leakage current of organic light-emitting diode [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2003, 42: L438-L440.
- [41] BALAKRISHNAN L, GOWRISHANKAR S, ELANCHEZHIAN J, *et al.* Influence of Al concentration on electrical, structural and optical properties of Al-As codoped *p*-ZnO thin films [J]. *Phys. B: Condens. Matter*, 2011, 406(23): 4447-4452.
- [42] LIN D X, GUO J H, JIANG X H. Flexible, thermally conductive, electrically insulated, and high-temperature resistant PDMS@BN composite films with high orientation degree of BN sheets prepared by facile spin-coating [J]. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2024, 141(36): e55907.
- [43] NAGAURA T, ASHOK A, ALOWASHEIR A, *et al.* Mesoporous semiconductive Bi₂Se₃ films [J]. *Nano Lett.*, 2023, 23(12): 5424-5429.
- [44] KELLY A G, O'SUILLEABHAIN D, GABBETT C, *et al.* The electrical conductivity of solution-processed nanosheet networks [J]. *Nat. Rev. Mater.*, 2022, 7(3): 217-234.
- [45] LIN Z Y, LIU Y, HALIM U, *et al.* Solution-processable 2D semiconductors for high-performance large-area electronics [J]. *Nature*, 2018, 562(7726): 254-258.



王宁(2001-),男,河北张家口人,硕士研究生,2023年于河北大学获得学士学位,主要从事量子点及其电致发光器件方面的研究。
E-mail: 23121809@bjtu.edu.cn



滕枫(1969-),男,辽宁丹东人,博士,教授,1998年于中国科学院长春物理研究所获得博士学位,主要从事有机光电子材料与器件构筑的研究。
E-mail: fteng@bjtu.edu.cn



张玉(1989-),女,湖北孝感人,博士,副教授,2016年于北京大学获得博士学位,主要从事新型低维纳米材料及其光、电子器件方面的研究。
E-mail: zhyu@bjtu.edu.cn