

文章编号: 1000-7032(2026)03-0444-09

超小荧光分子实现单层白光电致发光二极管

王金江¹, 王益飞², 邓艳红¹, 陈自立¹, 曹 浩¹,
李 楠¹, 袁晓娇^{3*}, 相恒阳^{2*}

(1. 衡阳师范学院 物理与电子信息工程学院, 湖南 衡阳 421002;

2. 南京理工大学 材料科学与工程学院, 新型显示材料与器件工信部重点实验室,

江苏省量子点显示工程研究中心, 江苏 南京 210094;

3. 石河子大学 能源与材料学院, 新疆 石河子 832000)

摘要: 白光有机发光二极管(WOLEDs)因其节能、轻薄、可柔性显示等优势,在固态照明和全彩显示领域具有广泛应用前景。传统WOLEDs多采用多层结构,通过堆叠不同颜色的发光层(如红、绿、蓝)实现白光发射,但该结构存在工艺复杂、制造成本高等问题。因此,开展溶液工艺加工、设计具有单一发光层的WOLEDs,引起了广泛的研究关注。本研究设计并合成了一种仅由噻二唑受体和噻吩给体构成的超小有机荧光分子(4,7-双(噻吩-2-基)苯并[c][1,2,5]噻二唑,TBT),可以实现450~650 nm范围的黄橙光宽谱发光,峰值在560 nm。经过设计聚(N-乙烯基咔唑)(PVK)、1,3-双(5-(4-(叔丁基)苯基)-1,3,4-恶二唑-2-基)苯(OXD-7)和TBT共混的单一发光层结构,实现了400~650 nm范围的冷白光、纯白光和暖白光发射,器件的最大外量子效率为2.3%,最大亮度可达4 000 cd/m²。这种超小荧光分子兼具低成本简单合成、可溶液加工、高性能发光等优势,为照明、显示等领域的低成本发光应用提供了可行途径。

关键词: 荧光分子; 溶液加工; 发光二极管; 单一发光层; 白光电致发光

中图分类号: TN312.8

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20250271

CSTR: 32170.14.CJL.20250271

Ultra-small Fluorescent Molecules Achieve Single-layer
White Electroluminescent DiodesWANG Jinjiang¹, WANG Yifei², DENG Yanhong¹, CHEN Zili¹, CAO Hao¹, LI Nan¹,
YUAN Xiaojiao^{3*}, XIANG Hengyang^{2*}

(1. College of Physics and Electronics Engineering, Hengyang Normal University, Hengyang 421002, China;

2. Key Laboratory of New Display Materials and Devices, Ministry of Industry and Information Technology,
School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

3. College of Energy and Materials, Shihezi University, Shihezi 832000, China)

* Corresponding Authors, E-mail: xyuan@icq.es; xiang.hengyang@njust.edu.cn

Abstract: White organic light-emitting diodes (WOLEDs) are promising candidates for solid-state lighting and full-color display due to their advantages such as energy conservation, thinness, lightness and flexible display. Traditional WOLEDs mostly adopt multi-layer architectures that stack primary-color emitters (red, green, and blue) to achieve white emission. However, these devices suffer from complicated fabrication and high manufacturing costs. Therefore, solution-processed single emissive layer WOLEDs have attracted extensive research attention. In this study, an ultra-small organic fluorescent molecule (4,7-bis(thiophen-2-yl) benzo[c][1,2,5]thiadiazole, TBT)

收稿日期: 2025-12-05; 修订日期: 2025-12-10

基金项目: 国家重点研发计划(2024YFB3612400); 国家自然科学基金(62505081, 52131304, U24A20286); 江苏省自然科学基金(BK20240187); 湖南省大学生创新创业训练计划(S202410546019)

Supported by National Key Research and Development Program of China (2024YFB3612400); National Natural Science Foundation of China (62505081, 52131304, U24A20286); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20240187); Innovation and Entrepreneurship Training Program for College Students in Hunan Province (S202410546019)

composed solely of a thiadiazole acceptor and a thiophene donor was designed and synthesized, which exhibits a broad yellow-orange emission ranging from 450 nm to 650 nm, with a peak at 560 nm. By blending TBT with poly(*N*-vinylcarbazole) (PVK) and 1,3-bis(5-(4-*tert*-butylphenyl)-1,3,4-oxadiazol-2-yl) benzene (OXD-7) in a single emissive layer, we obtain cool-white, pure-white, and warm-white electroluminescence covering 400–650 nm. The optimized device delivers a maximum external quantum efficiency of 2.3% and a peak luminance of 4 000 cd/m². Owing to its low-cost and simple synthesis, solution processability, and high efficiency, this ultra-small fluorescent molecule provides a feasible approach for low-cost lighting and display applications.

Keywords: fluorescent molecules; solution processing; light-emitting diodes; single-emitting layer; white electroluminescence

1 引言

白光有机发光二极管(White organic light-emitting diode, WOLEDs)在显示和固态照明领域展现出巨大的应用潜力,尤其是在当前主流消费电子的中小尺寸显示屏上得到了普及性应用,并受到了广泛认可^[1-3]。然而,因有机分子材料及其高精度真空蒸镀制造等方面的成本限制,并且器件涉及红、绿、蓝等多功能层的复杂制造和结构设计,导致基于 OLED 的显示屏价格始终居高不下^[4-5]。因此,开发新型有机发光材料、设计具有结构简单和制造成本低 OLED 技术是领域的迫切需求。

单一发光层型 WOLEDs(Single emissive layer WOLEDs, SEL-WOLEDs)是指白光的电致发光仅来自一个发光层,避免了红、绿、蓝等多颜色的功能层堆叠,简化了制造工艺^[6-8]。近年来,SEL-WOLEDs 受到了广泛的关注和持续的研究,典型的设计策略有:(1)引入激基复合物或电荷转移态^[9-12];(2)设计具有多发射峰的单一分子^[13-15];(3)混合不同发光材料形成复合发光层^[16-18]。其中,核心挑战在于如何通过单一材料体系或单一功能层实现高效、稳定的多色发光,尤其是覆盖红、绿、蓝三基色范围,满足照明、显示等应用需求。而且,开发分子量小、易分散、发光性能优异的荧光分子是实现可溶液加工的低成本 SEL-WOLEDs 的关键。

具有简单化学键结构的超小荧光分子,除了可以更加低成本、更便捷地合成制备之外,在 WOLEDs 器件设计和性能调控上也具有显著的优势:(1)分子结构简单,易于通过化学修饰调控发光颜色;(2)分子间相互作用弱,可有效抑制荧光分子普遍面临的浓度猝灭难题;(3)与聚合物基质相容性好,易形成均匀发光层,便于单一发光层制备^[19-22]。

本研究设计了一种具有给体(D)-受体(A)结构的荧光小分子(4,7-双(噻吩-2-基)苯并[c][1,2,5]噻二唑,TBT,分子量 300 g/mol),通过共轭结构,以及 A 和 D 之间的相互作用,可以实现覆盖 450~650 nm 宽谱范围的黄橙光发射。将 TBT 与经典的聚(*N*-乙烯基咔唑)(PVK)/1,3-双(5-(4-(叔丁基)苯基)-1,3,4-恶二唑-2-基)苯(OXD-7)主体材料混合,可以形成主体材料提供蓝光发光中心、TBT 客体材料提供黄橙光发光中心的单层白光电致发光架构。通过调控 TBT 在发光层中的质量分数(例如,9%、11%、13%),这些 SEL-WOLEDs 可以实现冷白(0.279 5, 0.294 0)、纯白(0.330 2, 0.405 9)、暖白(0.404 5, 0.431 1)的全光谱精准调控,且其最大外量子效率(External quantum efficiency, EQE)为 2.3%,最大亮度可达到近 4 000 cd/m²。这类荧光分子结构简单,具有简单的制造工艺、低成本、可批量化的突出优势,并且可以实现全溶液加工的 SEL-WOLEDs,为低成本照明、显示等应用的开发提供了新思路。

2 实验

2.1 材料

PVK、OXD-7、聚(3,4-乙撑二氧噻吩)聚苯乙炔磺酸盐(PEDOT:PSS)和 1,3,5-三(1-苯基-1H-苯并咪唑-2-基)苯(TPBi)购自西安浴日光能有限公司。TBT 分子及其相应的合成路线见我们前期的工作^[23-24]。

2.2 发光层溶液

将 PVK、OXD-7 和 TBT 分别溶解在氯苯(CB)溶液中,制备成 10 mg/mL 的溶液。随后,将 PVK 与 OXD-7 以 7:3 的比例混合作为空穴传输层/发光层主体溶液。将荧光小分子溶液随后分别以 9%、11%、13% 的质量分数与上述

溶液混合,得到发光层溶液。

2.3 器件制备

使用乙醇和丙酮通过超声波清洗氧化铟锡(Indium tin oxide, ITO)涂层玻璃基板,并进行 15 min 的紫外(Ultraviolet, UV)处理。随后,将 PEDOT:PSS 溶液以 3 000 r/min 的速度在 ITO 玻璃基板上旋涂 45 s,并在 145 °C 下加热 15 min;然后,在 N₂ 环境下的手套箱中以 3 000 r/min 的速度旋涂 PVK:OXD-7:TBT 发光层溶液 30 s,并在 120 °C 下加热 15 min,分别形成基于 9%、11%、13% TBT 掺杂比的器件 A、B 和 C。旋涂后,将其置于高真空热蒸发镀膜系统中,在约 2×10^{-4} Pa 的真空下沉积 TPBi (30 nm)和 LiF/Al(0.5 nm/100 nm)。

2.4 样品表征

使用光谱仪(Cary Eclipse, Agilent, 奥地利)获得 TBT 的光致发光(Photoluminescence, PL)光谱。使用配备单光栅和积分球(Quanta-Phil)的 HORIBA Fluorolog 荧光光谱仪获得 TBT 在 DMSO 溶剂中的光致发光量子产率(Photoluminescence quantum yield, PLQY)。采用 Shimadzu UV-3150 UV-Vis-NIR 光谱仪测得 UV-Vis 光吸收和透射光谱。SEL-WOLEDs 的光电特性、电致发光光谱和色坐标等均由 LED 测试系统(Everfine Photo-E-Info

Co., Ltd.)测量,该系统主要由 Keithley 2400 光源仪器和 Konica Minolta CS-2000 光谱仪组成。

3 结果与讨论

3.1 TBT 荧光分子特性

荧光分子发光通常依赖 D-A-D' 或 A-D-A' 结构,因此我们利用苯并[c][1,2,5]噻二唑环作为中心电子受体,在其两侧引入两个噻吩环作为电子给体,得到了这种结构简单、分子量低的荧光小分子(TBT),如图 1(a)所示。我们使用 Gaussian 09 程序,采用 B3LYP/6-31G(d) 基组进行了密度泛函理论(Density functional theory, DFT)计算,以研究 TBT 的前线分子轨道,包括最高占据分子轨道(Highest occupied molecular orbital, HOMO, -5.25 eV)和最低空分子轨道(Lowest unoccupied molecular orbital, LUMO, -2.83 eV),由此可计算得到其光学带隙为 2.42 eV(真空能级为 0 eV)(见图 1(b))。结合这类小分子具有的典型的大斯托克斯位移特征,意味着其具备在 520 nm 以上的荧光发光特性,这与 TBT 实物黄绿色粉末及其紫外光激发下的明亮黄白光发光颜色相一致(图 1(c))。而且,这一 TBT 分子的分子量仅为 300 g/mol,低于目前商用的红绿蓝荧光和磷光分子(图 1(d))^[25-29]。

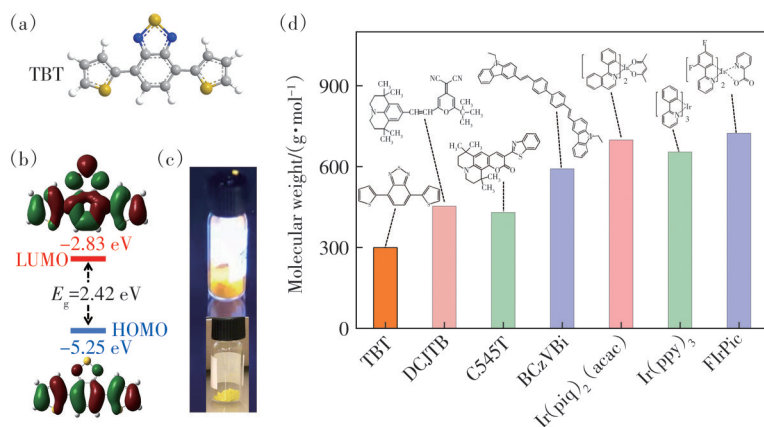


图1 TBT的(a)分子结构及(b)HOMO/LUMO能级和轨道;(c)TBT实物荧光粉末及其在紫外光激发下的发光状态;(d) TBT分子量与商用荧光、磷光分子的对比

Fig.1 (a) Molecular structure, (b) HOMO/LUMO energy levels and orbitals distributions of TBT. (c) TBT fluorescent powder and its emission under UV excitation. (d) Comparison of TBT molecular weight with commercially available fluorescent and phosphorescent molecules

3.2 光学性质

TBT 分子中的中心苯并[c][1,2,5]噻二唑环结构,因为具有强电子受体能力,是黄色、红色发射体的理想材料,而两端的噻吩环表现出深的 HOMO 能级,有助于 DAD' 分子光谱向长波长红

移^[30-33]。图 2 的 TBT 光学吸收、透射和 PL 光谱证实了 TBT 的发光特性。在图 2(a)中,吸收截止峰在 520 nm 附近,这与图 1(b)中 DFT 计算得到的能量带隙相一致。而且,得益于 DAD' 分子结构设计及其较大的斯托克斯位移特性,其发光峰位于

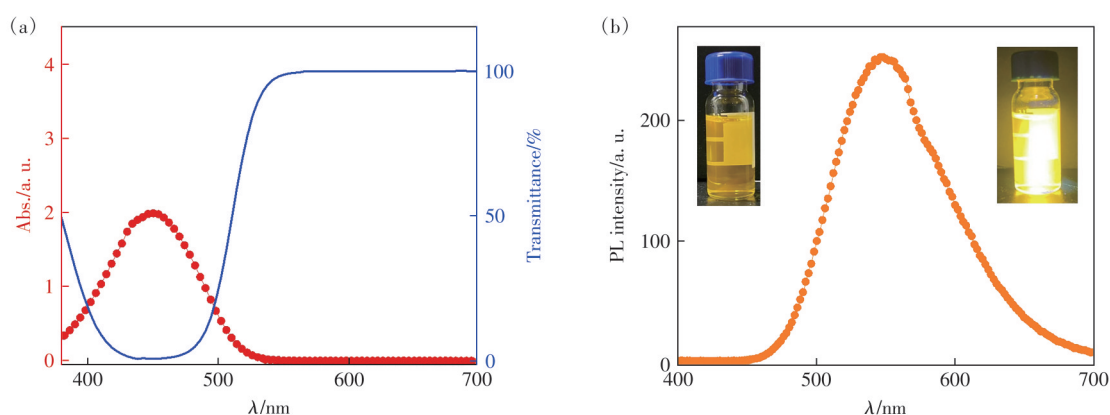


图2 TBT的(a)吸收和透射光谱及(b)PL光谱,插图为TBT溶解在DMSO及其在紫外光激发下的发光照片

Fig. 2 (a) Absorption and transmission spectra and (b) PL spectra of TBT. The inset shows the emission photograph of TBT dissolved in DMSO under UV excitation

550 nm 的黄光区域。如图 2(b) 的插图所示, TBT 溶解在 DMSO 溶剂中呈现出黄橙色颜色, 且在紫外光激发下, 发射出明亮的黄白色, 对应的 PL 量子产率可达到 70.5%, 展现出了优异的宽谱白光发光特性。另外, TBT 分子中的共轭框架, 以及受体单元中引入 S 和 N 元素而产生的 HOMO-LUMO 进一步分离, 也将能增强分子内的电荷转移和相互作用, 提高电荷转移效率, 最终有益于荧

光小分子的发光性能提升。在电致发光器件中, 这些共轭框架也将促进空穴的注入和传输, 增强器件发光的辐射复合效率^[34-35]。同时, 有机发光二极管中使用小分子作为发射层可以有效减少由分子间相互作用和电子耦合引起的荧光猝灭现象^[36-37]。

因此, 我们提出了一种基于 TBT 小分子的单层白光电致发光架构, 如图 3 所示。结合 TBT 的

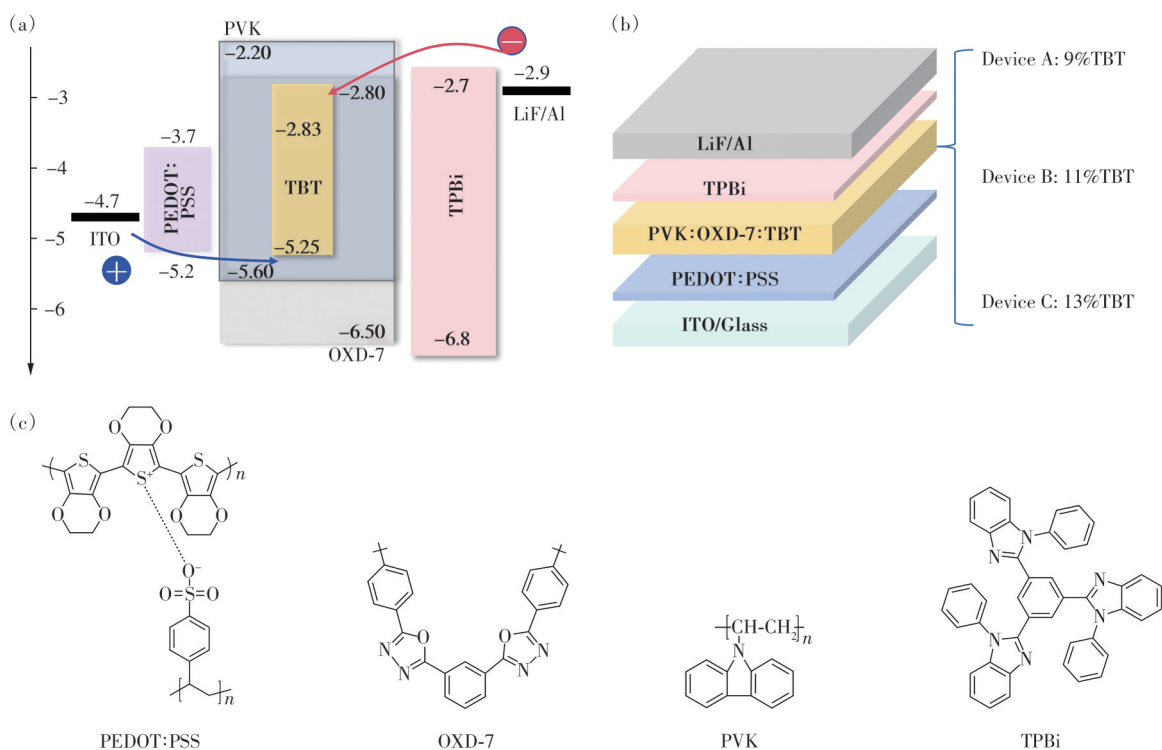


图3 (a) SEL-WOLEDs 功能层的能级排列示意图; (b) SEL-WOLEDs 器件结构示意图及掺杂浓度调控策略; (c) PEDOT:PSS、OXD-7、PVK 和 TPBi 的分子结构式

Fig. 3 (a) Energy-level alignment of the functional layers in SEL-WOLEDs. (b) Device architecture and the doping-concentration tuning strategy employed in SEL-WOLEDs. (c) Molecular structural formulas of PEDOT:PSS, OXD-7, PVK, and TPBi

HOMO/LUMO 能级匹配,为实现载流子平衡并抑制激子泄漏,我们选用 PVK 与 OXD-7 作为主体材料(PVK:OXD-7=7:3, w/w)。其中,PVK 的 HOMO/LUMO 约为 -5.8/-2.2 eV,且三重态能量较高($T_1 \approx 3.0$ eV)^[38],能有效地限制激子泄露。而且 OXD-7 的 HOMO/LUMO 约为 -6.5/-2.8 eV,进一步调节载流子传输。相应的器件能级示意图见图 3(a)^[39-42]。空穴经 ITO 电极、PEDOT:PSS 和 PVK 的 HOMO 能级注入到发光层,而电子经 LiF/Al 复合电极、TPBi 和 OXD-7 的 LUMO 能级注入到发光层。同时,PVK 的高 LUMO 能垒、OXD-7 的低 HOMO 能垒可以有效地阻挡电子和空穴向两边传输层的泄漏,提升载流子在发光层中的辐射复合效率。基于上述能级结构,我们构筑了基于单一发光层的 SEL-WOLEDs,器件结构为 ITO/PEDOT:PSS/EML/TPBi(30 nm)/LiF(0.5 nm)/Al(100 nm),如图 3(b)所示,旨在实现如图 2(b)中观察到的明亮暖白光发射。通过调控 TBT 的添加量(9%、11%、13%),制备器件 A、B 和 C,以系统优化这一 SEL-WOLEDs 的电致发光性能。

3.3 电致发光(Electroluminescence, EL)性能

我们对所制备的 SEL-WOLEDs 进行了光电性

能测试(图 4),详细的性能参数列于表 1 中。从器件的电致发光光谱(图 4(a)~(c))可以看出,其发光特性随着器件中 TBT 掺杂浓度的变化而变化。一方面,除了 TBT 本征的黄光发射(560 nm),还有一个明显位于 460 nm 纯蓝光波段的发射峰;另一方面,因为 TBT 掺杂浓度的不同,蓝、黄两个发光峰的相对强度具有明显差异,并且随着 TBT 掺杂浓度的提升,黄光波段的发光强度逐渐增强,从而展现出蓝光强于黄光的冷白光、蓝光与黄光强度均衡的纯白光和黄光强于蓝光的暖白光,以及白光光色精准调控的特点。而且,它们的 EL 峰值在不同电压下(如 6 V、7 V、8 V)没有明显偏移,CIE 坐标的偏移量分别仅为(0.010 4, 0.016 3)、(0.009 1, 0.013 6)、(0.002 0, 0.010 5),意味着空穴和电子均衡地注入到发光层,并发生稳定高效的辐射复合。从电流-电压-亮度曲线图 4(d)~(f)可以看出,这些器件均展现出良好的肖特基曲线特性和超过 1 000 cd/m² 的亮度水平,尤其是在纯白光和暖白光器件上获得了超过 3 000 cd/m² 的峰值亮度和超过 2% 的最大 EQE(图 4(g)~(i))。这些高亮度、低成本的 SEL-WOLEDs 在新型照明和显示等领域具有巨大的应用潜力。

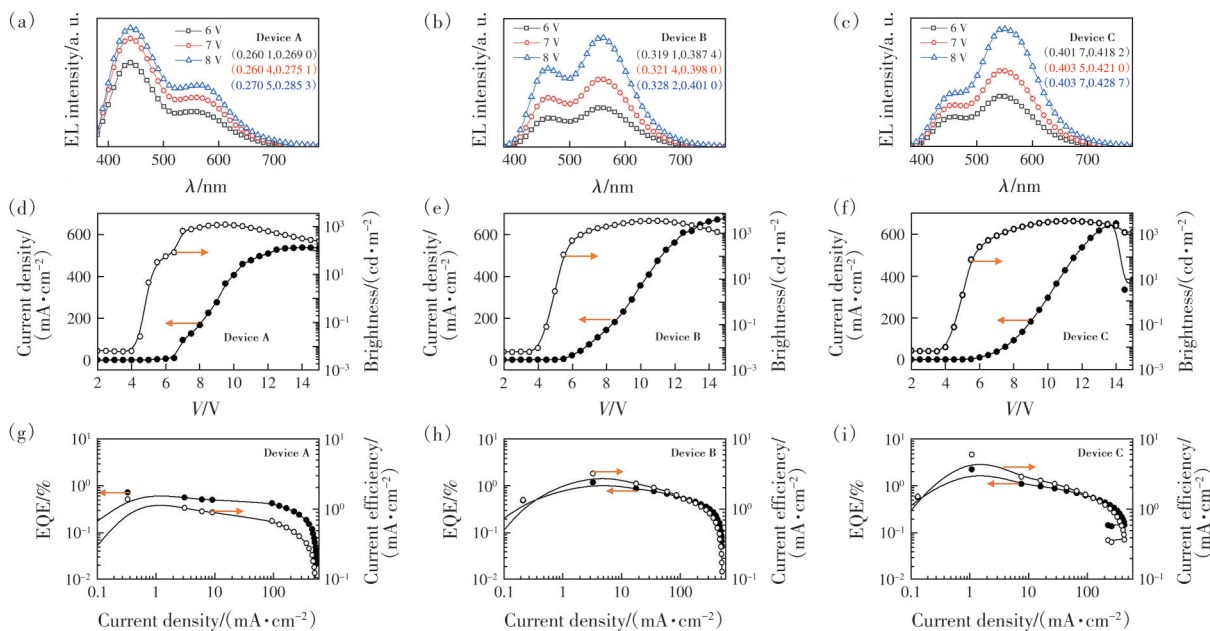


图 4 器件 A、B 和 C 的电致发光光谱((a)~(c))、电流密度-电压-亮度曲线((d)~(f))、EQE-电流密度-电流效率曲线((g)~(i))

Fig.4 The electroluminescence spectra ((a)~(c)), current density-voltage-luminance curves ((d)~(f)), and EQE-current density-current efficiency curves ((g)~(i)) of devices A, B, and C

3.4 白光发光机制探究

如我们在器件电致发光中所观察到的,上述器件 A、B 和 C 均出现了本征黄色电致发光之外的蓝光发射,而这个 459 nm 的纯蓝光发射很可能来

源于主体材料及其界面发光。因此,我们基于 ITO/PEDOT:PSS/发光层/TPBi/LiF/Al 这一结构制备了发光层分别为 PVK、OXD-7、PVK:OXD-7 以及 PVK:OXD-7:TBT 的器件,并采集这些器件的

表 1 器件 A、B 和 C 的光电性能总结

Tab. 1 Photoelectric performance summary for devices A, B, and C

Device	V_{ON}^{a}	$L_{\text{max}}/(\text{cd}\cdot\text{m}^{-2})^{\text{b}}$	EQE_{max} at voltage(V)/%	CIE at L_{max}
A	4.51	1695.98	0.72/5.0	(0.279 5, 0.294 0)
B	4.54	3188.76	2.60/5.5	(0.330 2, 0.405 9)
C	4.38	3975.92	1.18/5.5	(0.404 5, 0.431 1)

^a在亮度为 1 $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 时的开启电压; ^b下标“max”表示最大值。

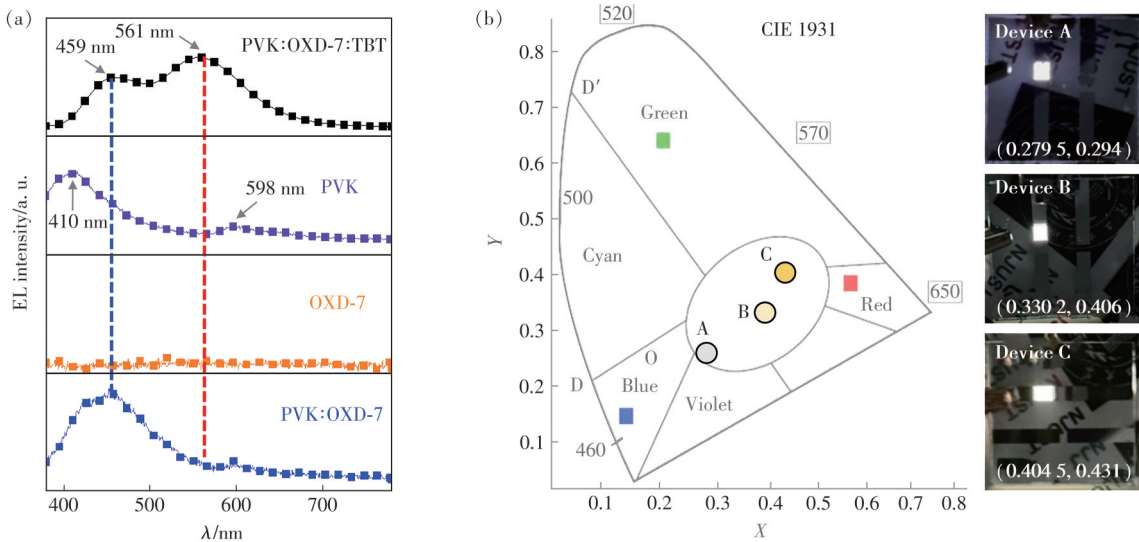


图 5 (a)采用 PVK、OXD-7、PVK:OXD-7、PVK:OXD-7:TBT 作为发光层的器件电致发光光谱;(b)SEL-WOLEDs 器件 A~C 的 CIE 1931 色坐标在色域图中的位置,插图为它们的电致发光照片

Fig.5 (a) Electroluminescence spectra of devices employing PVK, OXD-7, PVK:OXD-7, or PVK:OXD-7:TBT as the emissive layer. (b) CIE 1931 chromaticity coordinates of SEL-WOLEDs devices A~C, the inset shows their electroluminescence photographs

因此,我们所设计的主客体混合形成的单一发光层为主客体材料形成均匀界面提供了条件,这为载流子均匀注入发光层提供了有效通道。而且,通过调控主客体的掺杂质量分数(9%、11%、13%),实现了蓝光和黄光发光强度的可控调控。我们在实现不同偏压下稳定发光光谱的同时,也实现了白光光谱在整个白光范围内从冷白(器件 A)到纯白(器件 B),再到暖白(器件 C)的精准调控(图 5(b)),对应的 CIE 色坐标分别为(0.279 5, 0.294 0)、(0.330 2, 0.405 9)、(0.404 5, 0.431 1),对应的显色指数(CRI)分别为 89,85,81。尤其是在发光的色温(CCT)上,器件 A、B 和 C 在其最大亮度下的数值分别是 11 434 K、5 780 K、3 582 K。这些色温范围与自然光条件下早晨的蓝天(10 000 K)、正午的日光(6 000 K)和傍晚的夕阳(2 000 K)的色温大体吻合,证实了上述的 SEL-WOLED 是一种极具潜力的高质量白光光源。

电致发光光谱,如图 5(a)所示。单纯 PVK 的 EL 光谱峰值在 410 nm,并伴有 598 nm 处的激子复合峰,这与文献报道相一致^[40,43-44]。单纯的 OXD-7 具有极其微弱的紫外发光(330 nm)^[41,45],因此在可见光范围,我们没有测到明显的光谱信号。而 PVK:OXD-7 混合作为发光层后,其 EL 光谱在 459 nm 处显示出明显的发光,这与我们在上述 SEL-WOLEDs 中观察到的光谱相吻合,意味着蓝光部分的发光来自 PVK 和 OXD-7 的界面。

4 结 论

本文基于一种超小分子量荧光分子,设计并制备了单一发光层白光电致发光器件。通过与 PVK 和 OXD-7 共掺杂,这些溶液加工的 SEL-WOLEDs 表现出稳定且高亮度的白光电致发光,最大 EQE 达到 2.3%,最高亮度近 4 000 cd/m^2 。得益于 PVK 与 OXD-7 的界面蓝光发光、TBT 本征黄光发光,以及单一发光层结构赋予的空穴/电子均衡高效注入和辐射复合,这些 SEL-WOLEDs 可以在白光范围内实现冷白、纯白、暖白的精准调控。结合这类分子的超低分子量和优异的溶液加工能力,展现出低成本 WOLED 制造的巨大潜力,是新型照明、显示应用的理想光源。

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.20250271>

参 考 文 献:

- [1] FUKUZAKI S, SASAKI T, NOWATARI H, *et al.* High-luminance and highly reliable tandem OLED display including new intermediate connector designed for photolithography applications [J]. *J. Soc. Inf. Disp.*, 2024, 32(5): 309-319.
- [2] LIU J K. The application of organic materials used in OLED display [J]. *Results Opt.*, 2025, 21: 100856.
- [3] FAN X C, WANG K, SHI Y Z, *et al.* Ultrapure green organic light-emitting diodes based on highly distorted fused π -conjugated molecular design [J]. *Nat. Photonics*, 2023, 17(3): 280-285.
- [4] FO W Z, LI J, ZHANG Z L, *et al.* High-efficiency blue fluorescent OLEDs enabled by a cost-effective blade-coated planar source evaporation strategy [J]. *Chem. Eng. J.*, 2025, 520: 166364.
- [5] ZENG X Y, TANG Y Q, CAI X Y, *et al.* Solution-processed OLEDs for printing displays [J]. *Mater. Chem. Front.*, 2023, 7(7): 1166-1196.
- [6] XIANG H Y, WANG R, CHEN J W, *et al.* Research progress of full electroluminescent white light-emitting diodes based on a single emissive layer [J]. *Light. Sci. Appl.*, 2021, 10(1): 206.
- [7] ZOU S J, ZENG X Y, LI Y Q, *et al.* The strategies for high-performance single-emissive-layer white organic light-emitting diodes [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2021, 15(3): 2000474.
- [8] FAN P, HUA L, LAI X Y, *et al.* High-performance solution processable single-emitting-layer white circularly polarized electroluminescence [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(14): 2418790.
- [9] LUO D X, CHEN Q Z, GAO Y, *et al.* Extremely simplified, high-performance, and doping-free white organic light-emitting diodes based on a single thermally activated delayed fluorescent emitter [J]. *ACS Energy Lett.*, 2018, 3(7): 1531-1538.
- [10] WU Z B, YU L, ZHAO F C, *et al.* Precise exciton allocation for highly efficient white organic light-emitting diodes with low efficiency roll-off based on blue thermally activated delayed fluorescent exciplex emission [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2017, 5(20): 1700415.
- [11] LIU X K, CHEN Z, QING J, *et al.* Remanagement of singlet and triplet excitons in single-emissive-layer hybrid white organic light-emitting devices using thermally activated delayed fluorescent blue exciplex [J]. *Adv. Mater.*, 2015, 27(44): 7079-7085.
- [12] 边浩冬, 李佳睿, 张春芳, 等. 基于激基复合物主体的高效杂化白光有机发光二极管 [J]. *发光学报*, 2024, 45(7): 1163-1172.
- BIAN H D, LI J R, ZHANG C F, *et al.* High efficiency hybrid white organic light-emitting diodes based on exciplex host [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(7): 1163-1172. (in Chinese)
- [13] RETTIG W. Charge separation in excited states of decoupled systems—TICT compounds and implications regarding the development of new laser dyes and the primary process of vision and photosynthesis [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 1986, 25(11): 971-988.
- [14] LI D F, HU W D, WANG J, *et al.* White-light emission from a single organic compound with unique self-folded conformation and multistimuli responsiveness [J]. *Chem. Sci.*, 2018, 9(26): 5709-5715.
- [15] TU D S, LEONG P, GUO S, *et al.* Highly emissive organic single-molecule white emitters by engineering *o*-carborane-based luminophores [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2017, 56(38): 11370-11374.
- [16] LI K, TONG G S M, WAN Q Y, *et al.* Highly phosphorescent platinum(II) emitters: photophysics, materials and biological applications [J]. *Chem. Sci.*, 2016, 7(3): 1653-1673.
- [17] LIAO J L, CHI Y, YE H C C, *et al.* Near infrared-emitting tris-bidentate Os(II) phosphors: control of excited state characteristics and fabrication of OLEDs [J]. *J. Mater. Chem. C.*, 2015, 3(19): 4910-4920.
- [18] TUNG Y L, LEE S W, CHI Y, *et al.* Organic light-emitting diodes based on charge-neutral Ru^{II} phosphorescent emitters [J]. *Adv. Mater.*, 2005, 17(8): 1059-1064.
- [19] DHARA A, SADHUKHAN T, SHEETZ E G, *et al.* Zero-overlap fluorophores for fluorescent studies at any concentration [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2020, 142(28): 12167-12180.
- [20] GRIMM J B, MUTHUSAMY A K, LIANG Y J, *et al.* A general method to fine-tune fluorophores for live-cell and *in vivo* imaging [J]. *Nat. Methods*, 2017, 14(10): 987-994.
- [21] AKPINAR H, BALAN A, BARAN D, *et al.* Donor-acceptor-donor type conjugated polymers for electrochromic applications:

- benzimidazole as the acceptor unit [J]. *Polymer*, 2010, 51(26): 6123-6131.
- [22] 陶伟, 崔林松. 蓝光热激活延迟荧光分子设计策略概述 [J]. 功能高分子学报, 2023, 36(3): 240-260.
TAO W, CUI L S. An overview of molecular design strategies for blue thermally activated delayed fluorescence [J]. *J. Funct. Polym.*, 2023, 36(3): 240-260. (in Chinese)
- [23] YUAN X J, WANG C, VALLAN L, *et al.* Organic conjugated trimers with donor-acceptor-donor structures for photocatalytic hydrogen generation application [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 33(15): 2211730.
- [24] DENG Y H, WANG Y F, CHEN Z S, *et al.* Organic π -conjugated trimers as fluorescent molecules for colorful electroluminescence [J]. *New J. Chem.*, 2024, 48(44): 18987-18994.
- [25] WANG X D, LI S X, YU B, *et al.* Study on the conductivity and exciton recombination zone of the 2FPPICz emission layer of crystalline OLED [J]. *ACS Appl. Electron. Mater.*, 2024, 6(5): 3084-3088.
- [26] KISHORE KESAVAN K, JAYAKUMAR J, LEE M, *et al.* Achieving a 32% EQE solution-processed simple structure OLED via exciplex system [J]. *Chem. Eng. J.*, 2022, 435(Pt 3): 134879.
- [27] LIU Y D, SONG X C, WANG H S, *et al.* Increasing the efficiency of the blue OLED device with a double-emitting layer structure [J]. *J. Opt.*, 2024, 53(3): 1964-1971.
- [28] ZHOU L, XIANG H Y, SHEN S, *et al.* High-performance flexible organic light-emitting diodes using embedded silver network transparent electrodes [J]. *ACS Nano*, 2014, 8(12): 12796-12805.
- [29] XIANG H Y, LI Y Q, ZHOU L, *et al.* Outcoupling-enhanced flexible organic light-emitting diodes on ameliorated plastic substrate with built-in indium-tin-oxide-free transparent electrode [J]. *ACS Nano*, 2015, 9(7): 7553-7562.
- [30] XIE Z L, CHEN C J, XU S D, *et al.* White-light emission strategy of a single organic compound with aggregation-induced emission and delayed fluorescence properties [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2015, 54(24): 7181-7184.
- [31] MA Z Y, TENG M J, WANG Z J, *et al.* Mechanically induced multicolor switching based on a single organic molecule [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2013, 52(47): 12268-12272.
- [32] SAVITHA G, MOUSSALLEM C, ALLAIN M, *et al.* Low band gap donor-acceptor conjugated systems based on 3-alkoxy or 3-pyrrolidino-4-cyanothiophene and benzothiadiazole units [J]. *Chem. Asian J.*, 2017, 12(15): 1935-1943.
- [33] 常鹏, 韩春苗, 许辉. 近红外有机小分子电致发光材料研究进展 [J]. 液晶与显示, 2021, 36(1): 62-77.
CHANG P, HAN C M, XU H. Research progress of near infrared organic small-molecule electroluminescent materials [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2021, 36(1): 62-77. (in Chinese)
- [34] WANG Y, WU H, HU W P, *et al.* Color-tunable supramolecular luminescent materials [J]. *Adv. Mater.*, 2022, 34(22): 2105405.
- [35] SASABE H, KIDO J. Multifunctional materials in high-performance OLEDs: challenges for solid-state lighting [J]. *Chem. Mater.*, 2011, 23(3): 621-630.
- [36] HONG Y N, LAM J W Y, TANG B Z. Aggregation-induced emission [J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2011, 40(11): 5361-5388.
- [37] WANG S P, YAN X J, CHENG Z, *et al.* Highly efficient near-infrared delayed fluorescence organic light emitting diodes using a phenanthrene-based charge-transfer compound [J]. *Angew. Chem.*, 2015, 127(44): 13260-13264.
- [38] PINA J, SEIXAS DE MELO J, BURROWS H D, *et al.* On the triplet state of poly(*N*-vinylcarbazole) [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2004, 400(4-6): 441-445.
- [39] FUKAGAWA H, SHIMIZU T, IWASAKI Y, *et al.* Operational lifetimes of organic light-emitting diodes dominated by Förster resonance energy transfer [J]. *Sci. Rep.*, 2017, 7(1): 1735.
- [40] CHANG C J, CHENG Y Y, WANG M H, *et al.* Miscibility effect on the energy transfer induced luminescence enhancement of polyimide/PVK blends [J]. *Thin Solid Films*, 2005, 477(1-2): 14-18.
- [41] SAGHAEI J, RUSSELL S M, JIN H, *et al.* Rivers of light—ternary exciplex blends for high efficiency solution-processed red phosphorescent organic light emitting diodes [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2022, 32(8): 2108128.
- [42] AIZAWA N, PU Y J, WATANABE M, *et al.* Solution-processed multilayer small-molecule light-emitting devices with high-efficiency white-light emission [J]. *Nat. Commun.*, 2014, 5(1): 5756
- [43] JIANG J Y, ZHANG S, SHAN Q S, *et al.* High-color-rendition white QLEDs by balancing red, green and blue centres in eco-friendly ZnCuGaS:In@ZnS quantum dots [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(21): 2304772.
- [44] 王超, 李向峰, 刘泽美, 等. 激基复合物和磷光超薄层相结合的高效率非掺杂白光有机发光二极管 [J]. 发光学报,

2022, 43(1): 85-93.

WANG C, LI X F, LIU Z M, *et al.* High efficiency doping-free white organic light emitting diodes by combining exciplex and phosphorescent ultrathin layer [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022. 43(1): 85-93. (in Chinese)

- [45] XU T, XIE G H, HUANG T A, *et al.* Solution-processed multiple exciplexes *via* spirofluorene and S-triazine moieties for red thermally activated delayed fluorescence emissive layer OLEDs [J]. *Org. Electron.*, 2021, 96: 106184.



王金江(1985-),男,湖南永州人,博士研究生,讲师,2020年于南华大学获得硕士学位,主要从事微纳光电材料与器件的研究。

E-mail: wangjj_391@163.com



相恒阳(1990-),男,江苏赣榆人,博士,副教授,硕士生导师,2019年于法国巴黎索邦大学获得博士学位,主要从事半导体材料与器件的研究。

E-mail: xiang.hengyang@njust.edu.cn



袁晓娇(1989-),女,四川达州人,博士,教授,博士生导师,2020年于法国巴黎萨克雷大学获得博士学位,主要从事有机半导体、有机小分子结构设计,以及光/电/热催化研究。

E-mail: xyuan@iciq.es