

文章编号: 1000-7032(XXXX)XX-0001-08

三蝶烯衍生的单硼纯红光多重共振发光材料及 电致发光器件研究

曹亚男⁺, 刘孜语⁺, 张晓千⁺, 马鹏燕, 陈思奇,
王温凯, 杨 威^{*}

(三峡大学 生物与制药学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 硼氮多重共振热活化延迟荧光(multi-resonance thermally activated delayed fluorescence, 简称为 MR-TADF)材料在超高清有机发光二极管(organic light-emitting diode, 简称为 OLED)展现优异光学性能。相比于蓝光和绿光材料,高色纯度红光 MR-TADF 材料发展严重滞后,尤其纯红光单硼 MR 分子(受限于 MR 骨架的衍生化与合成难度)。在此,我们提出一协同策略:向 MR 母核引入缺电子吡嗪-三蝶烯与给电子芳胺基团。刚性三蝶烯具有 3D 空间位阻效应,抑制分子非辐射跃迁与结构弛豫;吡嗪延长 π 共轭,外围芳胺增强电荷转移,可实现光谱红移。所构筑单硼纯红光 MR-TADF 分子,其荧光光谱半峰宽仅 46 nm (0.15 eV),光致发光量子产率为 82%,CIE 坐标为 (0.67, 0.33),精确符合国家电视标准委员会的红基色标准;以该分子制备非敏化红光 OLED,器件外量子效率超过 20%。

关键词: 有机发光二极管; 多重共振; 热活化延迟荧光; 三蝶烯; 纯红光

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260195

CSTR: 32170.14.CJL.20260195

Triptycene-Scaffold Single-Boron-Embedded Pure-Red Multi-Resonance Emitter toward the Efficient Organic Light-Emitting Diode

CAO Yanan⁺, LIU Ziyu⁺, ZHANG Xiaoqian⁺, MA Pengyan, CHEN Siqi,
WANG Wenkai, YANG Wei^{1*}

(College of Biological and Pharmaceutical Sciences, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

* Corresponding Author, E-mail: weiyang@ctgu.edu.cn

Abstract: Multi-resonance thermally activated delayed fluorescence (MR-TADF) materials have demonstrated outstanding performance in ultrahigh-definition organic light-emitting diode (OLED) displays. In contrast to blue and green MR-TADF emitters, the development of the red counterpart with excellent color purity remains lag far behind, particularly for single-boron pure-red molecules, primarily due to the derivatization limit of MR polycyclic frameworks and synthetic complexity. Herein, we present a synergistic strategy for a paradigm shift in single-boron pure-red MR-TADF emitters, by incorporating electron-deficient pyrazine-triptycene and electron-donating arylamine substituents into MR parent skeleton. The robust triptycene scaffold not only provides structural rigidity, but also establishes a pronounced steric shielding effect, effectively suppressing non-radiative decay pathways and minimizing molecular structural relaxation. The pyrazine unit extends the π -conjugation length, and the arylamine groups at the periphery of MR fragment enhance the charge transfer effect, concurrently facilitating a bathochromic emission. In virtue of the rational molecular design, the MR-TADF emitter exhibits pure-red narrowband emission with a photolumi-

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 湖北省自然科学基金(2025AFB059); 三峡大学人才启动基金(2024RCKJ084);

Supported by Hubei Provincial Natural Science Foundation of China (2025AFB059); Science Foundation of China Three Gorges University (2024RCKJ084)

⁺共同一作: 曹亚男、刘孜语、张晓千

nescence quantum yield of 82%, full width at half maximum of 46 nm/0.15 eV, and Commission International de l'Eclairage coordinates of (0.67, 0.33), precisely aligning with the National Television Standards Committee (NTSC) standard for the red gamut. In addition, the single-host red MR-OLED achieves a high external quantum efficiency over 20% without using any metal-containing sensitizers.

Keywords: organic light-emitting diodes; multi-resonance; thermally activated delayed fluorescence; triptycene; pure-red

热活化延迟荧光(thermally activated delayed fluorescence, 简称为 TADF)材料能通过高效反向系间窜越(reverse intersystem crossing, 简称为 RISC)过程实现单、三线态激子全利用,在有机发光二极管(organic light-emitting diode, 简称为 OLED)中,其已成为继贵金属磷光配合物后的第三代发光材料^[1-6]。其中,硼氮多重共振(multi-resonance, 简称为 MR)诱导的 TADF 材料因其窄发射特性而备受关注,适用于高清显示^[7-12]。在 MR-TADF 分子体系,缺电子硼原子与富电子氮原子可诱导最高占据分子轨道(highest occupied molecular orbital, 简称为 HOMO)与最低未占分子轨道(lowest unoccupied molecular orbital, 简称为 LUMO)在相邻原子上交替分布,使基态(S_0)与单线态(S_1)分子之间的振动耦合被抑制,并限制激发态的振动弛豫^[13-18],可实现窄峰宽、小斯托克斯位移及高光致发光量子产率(photoluminescence quantum yield, 简称为 PLQY)。目前,已有很多发光波长低于 620 nm 的硼氮 MR 分子被报道^[19-26]。

与蓝光和绿光 MR 材料相比,长波长红光 MR 分子的研究进展仍很滞后,尤其是基于单硼骨架的纯红光 MR 体系^[27-31],这主要因为 MR 骨架的共轭扩展较为困难。而多硼红光 MR 分子的合成步骤普遍较繁琐,以及其较大的分子量致使蒸镀困

难。现有的红光 MR 分子设计策略,仍主要为对位 B- π -B 与 N- π -N 结构骨架。为解决这一难题,已有一些漂亮的工作对单硼红光 MR 材料进行了研究。例如:吉利大学李成龙教授等通过在 MR 骨架外围引入辅助的给体和受体基团,报道了一种旋涂型单硼纯红光 MR 分子^[32];清华大学段炼教授等提出了基于共轭电荷转移的分子设计策略,构建出单硼红光 MR 材料^[33]。尽管已有这些优秀的工作,高效纯红光 MR-OLED 的制备常依赖于贵金属 Ir 敏化剂掺杂于发光层,易致使器件结构复杂。同时,高性能单硼纯红光 MR-TADF 材料仍有待开发。

在此,本研究通过在 MR 骨架外围引入芳胺给体,并拓展分子 π 共轭体系,构筑出两个单硼 MR 分子 TpBN-CzDPA 和 TpBN-*t*BuCz(图 1)。刚性的 3D 三蝶烯骨架具有显著的空间位阻效应,有效抑制非辐射跃迁,并减弱激发态分子的振动弛豫,使其兼具高发光效率和窄谱带发光特性。缺电子吡嗪基团,延长了 MR 母核骨架(BNCz)的 π 共轭长度,可增强分子内电荷转移效应;结合外围给电子芳胺基团,可促进发光光谱的红移。因此,相比于 TpBN-*t*BuCz, TpBN-CzDPA 具有更强的电荷转移效应,且相较于经典硼氮 MR 分子 BNCz,其发射光谱红移 143 nm,展现出 624 nm 的纯红光

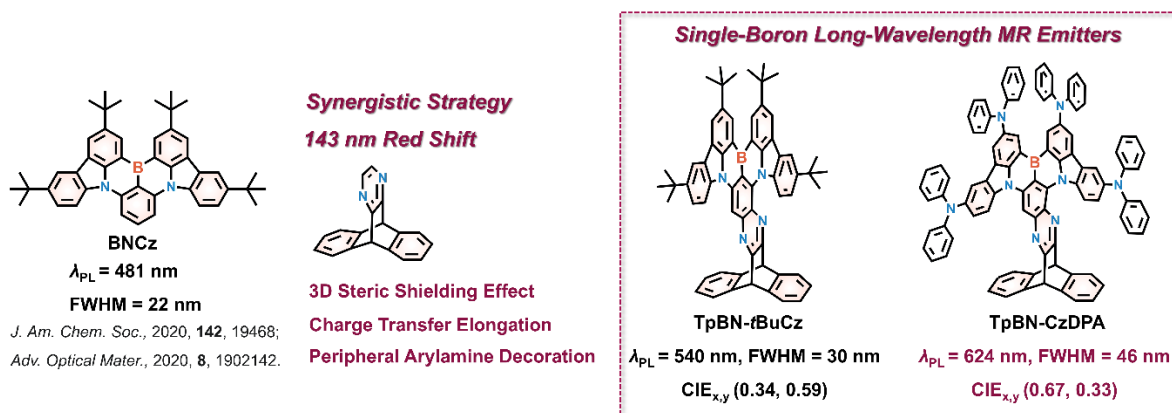


图 1 长波长单硼 MR 分子 TpBN-CzDPA 和 TpBN-*t*BuCz 的分子设计策略。

Fig. 1 Molecular design concept of the long-wavelength single-boron-embedded MR molecules TpBN-CzDPA and TpBN-*t*BuCz.

发射,半峰宽仅为 0.15 eV(46 nm),CIE 色坐标为 (0.67, 0.33),精准符合国家电视标准委员会(National Television Standards Committee, 简称为 NTSC)的红色色域标准。此外,与大多报道的贵金属敏化红光 MR-OLED 不同,以 TpBN-CzDPA 制备的非敏化红光 OLED,器件效率超过 20%。

TpBN-*t*BuCz 和 TpBN-CzDPA 的合成依据我们近期报道的方法进行^[34]。两分子的刚性构象,使其热稳定性优异,分子的热分解温度(T_d)均超过 400 °C,且在 250 °C 以下未观察到玻璃化转变温度(图 S1),表明其具备蒸镀器件制备的要求。为阐明分子结构和电子性质,本工作进行了密度泛函理论(Density Functional Theory, 简称为 DFT)和含时密度泛函理论(Time-Dependent Density Functional Theory, 简称为 TD-DFT)计算。前沿分子轨道(Frontier molecular orbital, 简称为 FMO)表明, TpBN-*t*BuCz 和 TpBN-CzDPA 具有部分杂化的 π 键与非键轨道特征。母核骨架 BNCz 保留了 MR 型 FMO 分布(图 2),这有利于维持分子的窄谱带

发光特性。强吸电子吡嗪单元与氮原子孤对电子的协同作用,扩展了 FMO 离域范围,有效延长了 MR 骨架的 π 共轭长度。与 TpBN-*t*BuCz 相比, TpBN-CzDPA 的 HOMO 在外围芳胺给体也有分布,其能隙($E_g = 2.49$ eV)比 TpBN-*t*BuCz($E_g = 3.03$ eV)更窄,表明 TpBN-CzDPA 具有更强电子耦合以及更红的吸收。TpBN-*t*BuCz 和 TpBN-CzDPA 的计算 S_1 态能级分别为 2.63 eV 和 2.19 eV,表明 TpBN-CzDPA 具有更红的发光特性; TpBN-*t*BuCz 的单、三线态能级差(ΔE_{ST})为 0.52 eV,远大于 TpBN-CzDPA 能级差(0.30 eV),说明: TpBN-*t*BuCz 的 RISC 通道很有可能被限制以及 TADF 发射被抑制。两分子的振子强度(f)均高于 0.2,有利于高效的发光。自然跃迁轨道(natural transition orbital, 简称为 NTO)进一步证实两分子的 S_1 态均展现出 MR 轨道分布特征(图 S2)。此外,两分子的激发态偶极矩矢量方向与 x - y 平面一致(图 S3),有利于水平偶极取向和提升器件的光耦合输出效率。

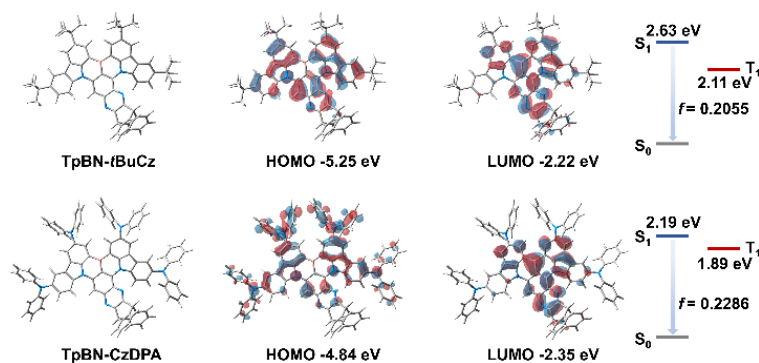


图 2 TpBN-*t*BuCz 和 TpBN-CzDPA 的优化构型, HOMO 和 LUMO 电子云分布、能级计算及振子强度。

Fig. 2 The optimized configurations, HOMO and LUMO energies, distributions, calculated energy gaps, and oscillator strengths of TpBN-*t*BuCz and TpBN-CzDPA.

本工作对两材料的光物理性质进行了研究。在甲苯溶液中, TpBN-*t*BuCz 在 520 nm 处呈现强而尖锐的吸收峰, 摩尔消光系数(ϵ)为 3.2×10^4 M⁻¹ cm⁻¹; TpBN-CzDPA 的吸收峰位于 575 nm, ϵ 为 2.2×10^4 M⁻¹ cm⁻¹(图 3a 和 3b)。这些吸收带归属为短程电荷转移(short-range charge transfer, 简称为 SRCT)特征的 $S_0 \rightarrow S_1$ 跃迁, 高的 ϵ 与它们大的 f 相关。TpBN-CzDPA 和 TpBN-*t*BuCz 的发射峰和半峰宽(full width at half maximum, 简称为 FWHM)分别为: 624 nm 和 46 nm(0.15 eV), 540 nm 和 30 nm(0.13 eV), 均保持了窄谱带发光特性。同时也表明: 外围芳胺给体的引入, 增强了电子耦合及 CT

作用, 致使吸收光谱和发射光谱的红移。TpBN-CzDPA 还呈现出纯红光发射, 其 CIE 色坐标为 (0.67, 0.33), 精准符合 NTSC 红色标准。根据荧光光谱和低温磷光光谱的起峰计算, TpBN-CzDPA 的 S_1 和 T_1 能级分别为 2.16 和 2.07 eV, TpBN-*t*BuCz 的 S_1 和 T_1 能级分别为 2.42 和 2.14 eV(图 3c); TpBN-CzDPA 所得更窄的 ΔE_{ST} (0.09 eV) 有利于高效的 RISC 过程。通过测试其在甲苯中的瞬态光致发光光谱(图 S4a), TpBN-CzDPA 呈现出较短的延迟寿命特征, τ_d 为 2.1 μ s, 这主要归因于其较小的单、三线态能级差; 与之不同, 由于 TpBN-*t*BuCz 的激发态之间能级较大, 荧光寿命为

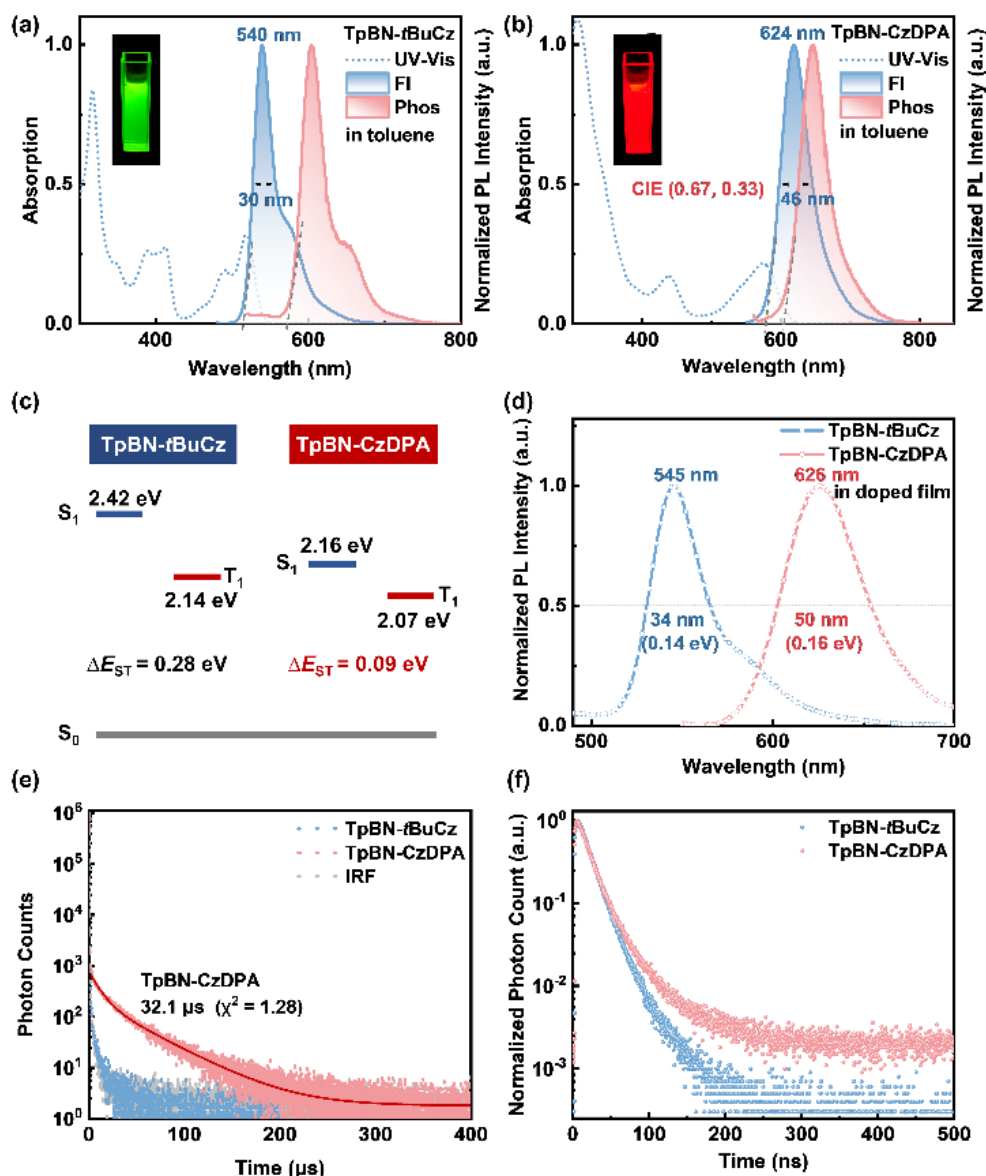


图3 (a/b) TpBN-CzDPA 和 TpBN-tBuCz 在甲苯溶液 (1×10^{-5} M) 的紫外-可见吸收光谱、归一化荧光光谱 (300 K) 及磷光光谱 (77 K)。(c) 基于分子在甲苯中的荧光和低温磷光光谱起峰计算的能级分布示意图。(d) 1 wt% 掺杂膜的归一化光致发光光谱。(e/f) 掺杂膜的归一化瞬态光致发光光谱, IRF 代表仪器底噪。

Fig. 3 (a/b) UV/Vis absorption, normalized fluorescence (300 K) and phosphorescence (77 K) spectra of TpBN-CzDPA and TpBN-tBuCz in toluene (1×10^{-5} M). (c) Illustration of the calculated energy distributions based on the onsets of the fluorescence and phosphorescence spectra. (d) Normalized photoluminescence (PL) spectra of 1 wt% emitter-doped DMIC-TRZ thin films. (e/f) Normalized transient PL spectra of the two emitters in doped films. IRF represents the instrument response function.

12 ns(图 S4b), 表明传统荧光发射特征。受益于刚性三蝶烯骨架, TpBN-CzDPA 和 TpBN-tBuCz 的 PLQY 分别高达 82% 和 96%。此外, 通过在正己烷、甲苯、二氯甲烷和四氢呋喃的溶剂化效应实验, 发现两分子在不同极性溶剂中的吸收光谱和发射光谱均未发生明显红移现象(图 S5a-S5d), 证明两 MR 分子具有典型的 SRCT 特性。

随后, 将两 MR 材料掺杂于主体材料 DMIC-

TRZ(即 1,3-二氢-1,1-二甲基-3-(3-(4,6-二苯基-1,3,5-三嗪-2-基)苯基)茚并[2,1-*b*]呋唑), 制备出掺杂薄膜。选择 1 wt% 低掺杂浓度, 以确保高效的能量转移, 并减弱聚集猝灭效应。TpBN-CzDPA 和 TpBN-tBuCz 的掺杂膜分别呈现出窄谱带红光和绿光发射(图 3d), 发射峰位于 626 nm 和 545 nm, FWHM 分别为 50 nm 和 34 nm。相比于分子在甲苯溶液的发射光谱, 掺杂膜的光谱略有展宽

(FWHM 变宽了 4 nm)。这一展宽现象主要由于掺杂膜态的客体与主体之间具有一定分子间相互作用,且相比于非极性的甲苯溶液,主体(DMIC-TRZ)提供了一定的极性环境,致使分子在掺杂膜中的荧光光谱略有展宽。此外,由于展宽幅度较小,且掺杂膜与甲苯溶液的最大发射峰值几乎未发生明显变化,因此该展宽效应对器件最终色纯度的影响较小。此外, TpBN-CzDPA 的瞬态光致发光光谱呈现出明显的双指数衰减曲线特征,拟合出的长寿命和短寿命分别为 32.1 μ s 和 22.1 ns (图 3e 和 3f),证实其典型的 TADF 性质。然而, TpBN-*t*BuCz 的 ΔE_{ST} 很大,致使其瞬态光谱仅为单指数衰减动力学特征,瞬时荧光寿命为 17.8 ns,说明其为普通的荧光材料。

本工作将两 MR 材料用于制备蒸镀 OLED,对其电致发光(electroluminescence, EL)性能进行了研究。器件结构如下: ITO/HATCN (5 nm)/TAPC (30 nm)/TCTA (15 nm)/mCBP (10 nm)/EML (20 nm)/PO-T2T (10 nm)/ANT-BIZ (40 nm)/LiQ (1.5 nm)/Al (100 nm)。其中,氧化铟锡(ITO)和铝(Al)分别作为阳极和阴极;二吡嗪并[2,3-*f*:2',3'-*h*]喹喔啉-2,3,6,7,10,11-六腈(HATCN)与 8-羟基喹啉锂(LiQ)分别作为空穴和电子注入层;1,1-双((二-4-甲基氨基)苯基)环己

烷(TAPC)和三(4-(9H-咔唑-9-基)苯胺(TCTA)作为空穴传输层;1-(4-(10-([1,1'-联苯]-4-基)蒽-9-基)苯基)-2-乙基-1H-苯并[d]咪唑(ANT-BIZ)作为电子传输层;而 3,3-二(9H-咔唑-9-基)联苯(mCBP)与 1,3,5-三嗪-2,4,6-三基三(苯-3,1-二基)三(二苯基氧化膦)(PO-T2T)分别作为激子阻挡层。因 DMIC-TRZ 具有平衡的电荷传输性能和优异的敏化性能,故将其作为主体材料^[35,36]。同时,将 MR 分子以 1 wt% 的掺杂浓度掺入主体材料,共蒸镀为发光层。

图 4 和图 S6 反映了所制备 OLED 的器件性能,相关参数汇总于表 1。器件的起亮电压仅约 2.6 V,表明器件中的载流子注入与传输达到有效平衡。基于 TpBN-CzDPA 和 TpBN-*t*BuCz 的 OLED,器件分别呈现红光和绿光发射,EL 光谱的发射峰分别为 620 nm 和 548 nm, FWHM 为和 0.20 eV 和 0.22 eV, CIE 坐标为 (0.63, 0.36) 和 (0.40, 0.56),与掺杂膜的 PL 光谱吻合,且未观察到主体发射峰,表明发光层里主体到 MR 客体分子的能量转移充分。相较于 MR 母核分子 BNCz, TpBN-CzDPA 的 EL 光谱展现出超过 130 nm 的红移^[28]。与它们在稀甲苯溶液的发射光谱相比,其 EL 光谱有所展宽,这主要由于发光层的主/客体分子之间具有一定相互作用。此外,已报道的红

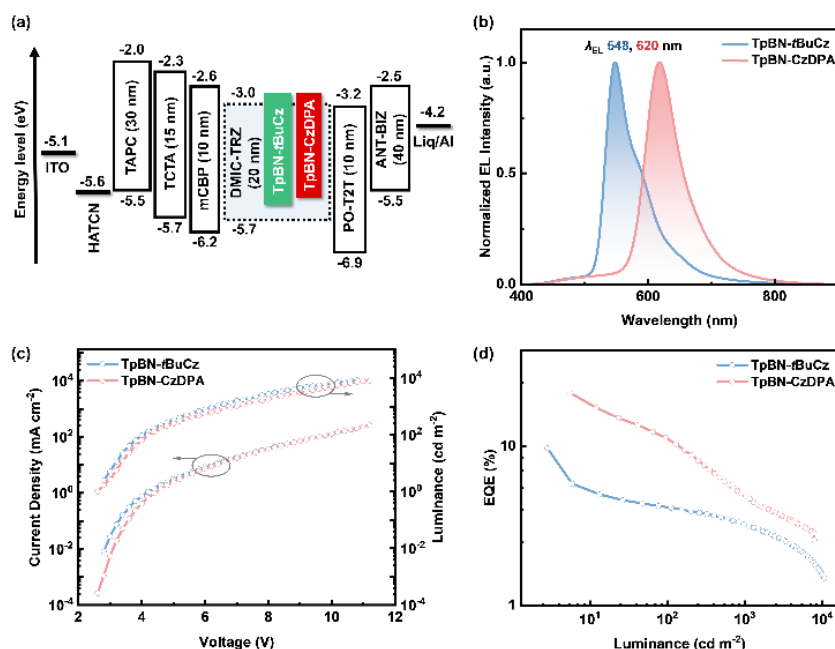


图 4 以 TpBN-CzDPA 和 TpBN-*t*BuCz 制备 OLED 的器件性能。(a) 器件结构及能级示意图。(b) EL 光谱。(c) 亮度和电流密度随电压变化曲线。(d) 外量子效率随亮度变化曲线。

Fig. 4 OLED characteristics for TpBN-CzDPA and TpBN-*t*BuCz. (a) Device configuration and the energy level diagrams. (b) EL spectra of the devices. (c) Luminance and current density *versus* voltage characteristics. (d) External Quantum Efficiency *versus* luminance curves.

表 1 器件数据汇总

Tab. 1 Summary of the devices data.

材料	$V_{on}^{[a]}$ (V)	$\lambda_{EL}^{[b]}$ (nm)	FWHM ^[b] (eV/nm)	CIE ^[b] (x, y)	$L_{max}^{[c]}$ (cd m ⁻²)	PE _{max} ^[c] (lm W ⁻¹)	CE _{max} ^[c] (cd A ⁻¹)	EQE _{max} ^[c] (%)
TpBN- <i>t</i> BuCz	2.7	548	0.22/55	(0.40, 0.56)	10640	38.8	34.6	9.7
TpBN-CzDPA	2.6	620	0.20/64	(0.63, 0.36)	7950	30.0	30.5	21.6

^[a] Turn-on voltage at 1 cd m⁻²; ^[b] electroluminescence peak wavelength, full-width at half-maximum, and CIE coordinates; ^[c] maximum luminance, maximum power efficiency, maximum current efficiency, and maximum external quantum efficiency.

光 MR-OLED 大多需在发光层加入贵金属敏化剂 (如铱配合物) 以提升器件效率, 但在本工作, 以 TpBN-CzDPA 制备的红光 MR-OLED, 在未使用任何金属敏化剂的条件下, 其器件效率达到 21.6%。而由于 TpBN-*t*BuCz 为普通荧光材料, 以其制备的 OLED 最大外量子效率仅为 9.7%。两材料制备的 OLED, 器件效率滚降较为明显, 这主要归因于其较大 ΔE_{ST} 及较长延迟寿命致使 RISC 缓慢。

综上所述, 本工作通过在经典 MR 母核骨架 (BNCz) 修饰吡嗪-三蝶烯与芳胺取代基, 合成出两例三蝶烯衍生的单硼 MR 发光材料。其中, TpBN-CzDPA 展现出纯红光发射, TpBN-*t*BuCz 为窄谱带绿光发射。研究证实: 刚性 3D 结构的三蝶

烯, 因其显著的空间位阻效应, 有效抑制了分子的非辐射跃迁和振动弛豫; 而引入的强吸电子吡嗪和给电子芳胺基团, 促进了分子的电子耦合与电荷转移作用, 使分子的发光红移。同时, TpBN-CzDPA 和 TpBN-*t*BuCz 的 PLQY 高达 82% 和 96%; 与 BNCz 分子相比, TpBN-CzDPA 的发射光谱红移了 143 nm, 展现出纯红光发射, 发射峰位于 624 nm, FWHM 为 0.15 eV (46 nm), CIE 坐标为 (0.67, 0.33), 精准符合 NTSC 红光标准。此外, 在未使用任何含贵金属的磷光敏化剂, 以 TpBN-CzDPA 制备的红光 MR-OLED, 实现了超过 20% 的优异外量子效率。本工作为单硼纯红光 MR-OLED 发光材料的设计提供了新思路。

参 考 文 献:

- [1] YANG W, XIE C L, CHEN T H, *et al.* Dynamic reversible full-color piezochromic fluorogens featuring through-space charge-transfer thermally activated delayed fluorescence and their application as X-ray imaging scintillators [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2024, 63(20): e202402704.
- [2] 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: 280-285.
- [3] 黄宏, 张友明, 谢国华, 等. 基于四取代咪唑衍生物的双极主体材料及溶液加工绿色磷光 OLED [J]. *发光学报*, 2025, 46(11): 1971-1979.
HUANG H, ZHANG Y, HUA T, *et al.* Novel bipolar hosts for solution-processable green phosphorescent OLEDs based on tetrasubstituted carbazole derivatives [J]. *Chinese J. Lumin.*, 2025, 46(11): 1971-1979. (in Chinese)
- [4] 马志华, 马荣荣, 邵世洋, 等. 基树枝状热活化延迟荧光材料研究进展 [J]. *发光学报*, 2021, 42(7): 904-916.
MA Z H, MA R R, SHAO S Y, *et al.* Recent advances on thermally activated delayed fluorescence dendrimers [J]. *Chinese J. Lumin.*, 2021, 42(7): 904-916. (in Chinese)
- [5] WANG H, LIN S, CHEN J X, *et al.* Stepwise planarizing geometries of D - A type red thermally activated delayed fluorescence molecules in condensed states toward high-efficiency red/NIR OLEDs [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(23): 2420489.
- [6] ZHANG H Y, ZHANG M, ZHUO H, *et al.* Unraveling non-radiative decay channels of exciplexes to construct efficient red emitters for organic light-emitting diodes [J]. *Chem. Sci.*, 2024, 15(36): 14651-14659.
- [7] HUA T, CAO X, MIAO *et al.* Deep-blue organic light-emitting diodes for ultrahigh-definition displays [J]. *Nat. Photonics*, 2024, 17: 280-285.
- [8] WANG Y, YANG W, ZHANG H, *et al.* Pyrazine-fused polycyclic aromatic hydrocarbons towards efficient multiple-resonance narrowband deep-blue emission [J]. *Sci. China Chem.*, 2025, 68: 1018-1025.
- [9] HUANG Z Y, XIE H H, MIAO J S, *et al.* Charge transfer excited state promoted multiple resonance delayed fluores-

- cence emitter for high-performance narrowband electroluminescence [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2023, 145(23): 12550-12560.
- [10] QU Y P, XU Y C, HUANG T T, *et al.* Extending frontier molecular orbitals delocalization via donor fusion: construct long-wavelength twisted multiple resonance emitters with efficient narrowband emission [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2025, 64(25): e202506201.
- [11] AN R Z, ZHAO F M, SHANG, C J, *et al.* Excited-state and steric hindrances engineering enable fast spin-flip narrow-band thermally activated delayed fluorescence emitters with enhanced quenching resistance [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2025, 64(11): e202420489.
- [12] ZHANG K Y, WANG X D, WANG M Y, *et al.* Solution-processed blue narrowband OLED devices with external quantum efficiency beyond 35 % through horizontal dipole orientation induced by electrostatic interaction [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2025, 64(13): e202423812.
- [13] HU J J, LIANG X, YAN Z P, *et al.* An efficient ultra-narrowband yellow emitter based on a double-boron-embedded tetraazacyclopentadiene [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2025, 64(10): e202421102.
- [14] SHI Y L, YANG W, ZHANG H, *et al.* Near-infrared multiple-resonance polycyclic aromatic hydrocarbon as type I photosensitizer toward high-performance synergistic phototherapy [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(30): 2423408.
- [15] YANG W, LI N Q, MIAO J S, *et al.* Simple double hetero[5]helicenes realize highly efficient and narrowband circularly polarized organic light-emitting diodes [J]. *CCS Chem.*, 2022, 4(11): 3463-3471.
- [16] WANG Q Y, YUAN L, QU C, *et al.* Constructing highly efficient circularly polarized multiple-resonance thermally activated delayed fluorescence materials with intrinsically helical chirality [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(42): 2305125.
- [17] LEI B, HUANG Z M, LI S T, *et al.* Medium-ring strategy enables multiple resonance emitters with twisted geometry and fast spin-flip to suppress efficiency roll-off [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2023, 62(12): e202218405.
- [18] SURESH S M, ZHANG L, HALL D, *et al.* A deep-blue-emitting heteroatom-doped MR-TADF nonacene for high-performance organic light-emitting diodes [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2023, 62(8): e202215522.
- [19] LIAO X J, XING S, HU J J, *et al.* Phosphorus central chiral multiresonance thermally activated delayed fluorescence emitter towards narrowband and efficient circularly polarized electroluminescence [J]. *CCS Chem.*, 2025, 7(8): 2419-2431.
- [20] ZHENG Q, QU Y K, ZUO P, *et al.* Enhancing multi-resonance thermally activated delayed fluorescence emission via through-space heavy-atom effect [J]. *Chem.*, 2025, 11(4): 102353.
- [21] ZOU Y, YU M X, XU Y L, *et al.* Acceleration of reverse intersystem crossing in multi-resonance TADF emitter [J]. *Chem.*, 2024, 10(5): 1485-1501.
- [22] LI D L, LIU D H, LI M K, *et al.* Peripherally fused spiro structures enable the development of narrowband TADF emitters for highly efficient blue OLEDs [J]. *Chem. Sci.*, 2025, 16(39): 18332-18340.
- [23] WU S, CHEN D Y, SEINFELD M, *et al.* A three boron doped B/O/N multi-resonant TADF emitter for improved reverse intersystem crossing rate and efficient pure blue organic light-emitting diodes [J]. *Chem. Sci.*, 2025, 16(33): 15256-15264.
- [24] TAN K K, LI M, CHEN C F. Triptycene-fused multi-resonance TADF material endows high-efficiency electroluminescence and low efficiency roll-off [J]. *Chem. Commun.*, 2025, 61(60): 11191-11194.
- [25] SONG X J, LI X N, YE X Y, *et al.* Alleviated efficiency roll-off in organic light-emitting diode through optimizing peripheral substituents in multiple-resonance thermally activated delayed fluorescence material [J]. *Adv. Optical Mater.*, 2025, 13(19): 2500515.
- [26] CHENG Y C, TANG X, WALIA R T, *et al.* High-efficiency and high color purity solution-processable deep-blue OLEDs enabled by linearly fully fused acceptor-donor-acceptor molecular design [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37(32): 2500010.
- [27] YANG W, MIAO J S, HU F P, *et al.* An effective approach toward yellow-to-orange multi-resonance TADF emitters by integrating strong electron donor into B/N-based polycyclic architecture: high performance OLEDs with nearly 40% EQE [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 33(23): 2213056.
- [28] YANG M L, PARK I S, YASUDA T. Full-color, narrowband, and high-efficiency electroluminescence from boron and carbazole embedded polycyclic heteroaromatics [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2020, 142(46): 19468-19472.
- [29] MAMADA M, HAYAKAWA M, OCHI J, *et al.* Organoboron-based multiple-resonance emitters: synthesis, structure -

- property correlations, and prospects [J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2024, 53(3):1624-1692.
- [30] WU X G, NI S Q, WANG C H, *et al.* Comprehensive review on the structural diversity and versatility of multi-resonance fluorescence emitters: advance, challenges, and prospects toward OLEDs [J]. *Chem. Rev.*, 2025, 125(14):6685-6752.
- [31] HUANG T T, YUAN L, LU X Y, *et al.* Efficient circularly polarized multiple resonance thermally activated delayed fluorescence from B,N-embedded hetero[8]helicene enantiomers [J]. *Chem. Sci.*, 2024, 15(37):15170-15177.
- [32] CAI X L, XU Y C, PAN Y, *et al.* Solution-processable pure-red multiple resonance-induced thermally activated delayed fluorescence emitter for organic light-emitting diode with external quantum efficiency over 20 % [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2023, 62(7):e202216473.
- [33] CHEN H W, FAN T J, ZHAO G M, *et al.* A simple molecular design strategy for pure-red multiple resonance emitters [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2023, 62(20):e202300934.
- [34] YANG W, WU L Y, QIN Y, *et al.* Deep-red multiple-resonance B,N-heteroarenes as type I photosensitizers for fluorescence imaging-guided photodynamic therapy [J]. *Anal. Chem.*, 2026, 98(5):4349-4361.
- [35] ZHANG D D, ZHAO C G, ZHANG Y G, *et al.* Highly efficient full-color thermally activated delayed fluorescent organic light-emitting diodes: extremely low efficiency roll-off utilizing a host with small singlet - triplet splitting [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2017, 9(5):4769-4777.
- [36] HU Y X, MIAO J S, HUA T, *et al.* Efficient selenium-integrated TADF OLEDs with reduced roll-off [J]. *Nat. Photonics*, 2022, 16:803-810.



曹亚男(2000-),女,甘肃武威人,硕士研究生,就读于三峡大学,致力于硼氮多重共振材料的合成。

E-mail: 2680695815@qq.com



杨威(1993-),男,湖北孝感人,博士研究生,校聘副教授,2022年于武汉大学获得博士学位,主要从事多重共振材料的设计合成及在OLED器件和生物医学应用研究。

E-mail: weiyang@ctgu.edu.cn