

文章编号: 1000-7032(2024)04-0651-11

# TADF 敏化荧光策略构建高效、窄光谱发光电化学池器件

陈荔丝<sup>1</sup>, 蓝燕婷<sup>1</sup>, 赵小龙<sup>2\*</sup>, 秦冬冬<sup>1</sup>, 张玉微<sup>1,3</sup>,  
陶春兰<sup>1\*</sup>, 张保华<sup>1\*</sup>, 牛利<sup>1</sup>

- (1. 广州大学化学化工学院 分析科学技术研究中心, 广州市传感材料与器件重点实验室,  
广东省光电传感材料与器件工程技术研究中心, 广东 广州 510006;  
2. 西北师范大学 化学化工学院, 生态功能高分子材料教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730070;  
3. 华南师范大学 化学学院, 手性药物制药过程控制与质量评价广东省药监局重点实验室,  
广州市生物医药分析化学重点实验室, 广东 广州 510006)

**摘要:** 基于新一代热活化延迟荧光 (Thermally activated delayed fluorescence, TADF) 发光材料的发光电化学池 (Light-emitting electrochemical cells, LECs) 成为新兴的研究方向而受到关注。由于 TADF 发光材料电荷分离态的激子属性, 该类 LECs 器件发光光谱半峰宽往往达到 100 nm 以上, 难以满足 LEC 高色纯度的需求。鉴于此, 本文尝试将 TADF 敏化荧光 (TADF-sensitized fluorescence, TSF) 的激子管控策略应用到 LECs 领域当中。通过筛选合适的传输主体、TADF 敏化剂、高吸光系数荧光染料和离子液体固态电解质为 LEC 的发光层, 我们成功构建了高效 TSF 型的 LECs 器件。最终获得的 TSF-LECs 器件峰值外量子效率 (The highest external quantum efficiency, EQE<sub>max</sub>) 达到 3.7%, 峰值亮度 (The peak luminance, L<sub>max</sub>) 达到 2 285 cd·m<sup>-2</sup>。与 TADF-LECs 的参比器件相比, TSF-LECs 器件的光谱半峰宽 (Full width at half maximum, FWHM) 从 106 nm 降低至 38 nm。本文还详细讨论了所制备 TSF-LECs 器件中的能量转移和激子损失途径。该工作为进一步优化设计 TSF-LECs 材料和器件奠定了基础。

**关键词:** 发光电化学池; TADF 敏化荧光; BODIPYs; 热活化延迟荧光

中图分类号: TM911 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20240012

## Achieving High-efficiency, High-color-purity Light-emitting Electrochemical Cells through TADF-sensitized Fluorescence Strategy

CHEN Lisi<sup>1</sup>, LAN Yanting<sup>1</sup>, ZHAO Xiaolong<sup>2\*</sup>, QIN Dongdong<sup>1</sup>,  
ZHANG Yuwei<sup>1,3</sup>, TAO Chunlan<sup>1\*</sup>, ZHANG Baohua<sup>1\*</sup>, NIU Li<sup>1</sup>

- (1. Center for Advanced Analytical Science, Guangzhou Key Laboratory of Sensing Materials and Devices, Guangdong Engineering Technology Research Center for Photoelectric Sensing Materials and Devices, School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;  
2. Key Laboratory of Eco-Functional Polymer Materials, Ministry of Education, College of Chemistry and Chemical Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;  
3. GDMPA Key Laboratory for Process Control and Quality Evaluation of Chiral Pharmaceuticals, Guangzhou Key Laboratory of Analytical Chemistry for Biomedicine, School of Chemistry, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)  
\* Corresponding Authors, E-mail: zhaolx82@nwnu.edu.cn; taohl@gzhu.edu.cn; ccbzhang@gzhu.edu.cn

**Abstract:** Thermally activated delayed fluorescence (TADF)-type light-emitting electrochemical cells (TADF-

收稿日期: 2024-01-14; 修订日期: 2024-01-31

基金项目: 国家自然科学基金(22122402, 22227804); 广东省自然科学基金(2023A1515010623, 2021B1515020048, 2023A1515010053, 2021A1515010510); 广州市市校企联合资助项目(202201020154); 甘肃省高等学校产业支撑计划(2021CYZC-17) Supported by National Natural Science Foundation of China(22122402, 22227804); The Natural Science Foundation of Guangdong Province(2023A1515010623, 2021B1515020048, 2023A1515010053, 2021A1515010510); Guangzhou Municipal School-enterprise Co-financing Project(202201020154); Industrial Support Program for Colleges and Universities in Gansu Province (2021CYZC-17)

LECs) have attracted much attention owing to their peculiar all-exciton-harvesting merits from purely organic materials. However, restricted by the property of charge-transfer excited state, almost all TADF-LECs displayed very broad electroluminescent spectra, *e. g.* a full width at half maximum (FWHM) as wide as 100 nm or more, which are difficult to meet the demands of high color purity. In view of this, this work attempts for the first time to construct LECs *via* TADF-sensitized fluorescence (TSF) strategy, *i. e.* TSF-LECs. The efficient TSF-LECs were successfully fabricated by selecting a suitable p-/n-doped host matrix, a nonionic TADF sensitizer, a fluorescent dye with high absorption coefficient and an ionic liquid solid-state electrolyte as the emissive layer of TSF-LEC. The energy transfer and exciton loss pathways in those TSF-LECs devices were further discussed in details. The as-fabricated TSF-LECs achieved high overall performance, that is reaching a peak external quantum efficiency ( $\text{EQE}_{\text{max}}$ ) of 3.7% and a bright peak luminance ( $L_{\text{max}}$ ) of  $2\,285\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ . Importantly, compared with the TADF-LEC reference device, the FWHM of TSF-LEC is reduced from 106 nm to 38 nm. This work will pave the road for further designing and constructing TSF-LECs both from material and device points of view.

**Key words:** light-emitting electrochemical cells; TADF-sensitized fluorescence; BODIPY; thermally activated delayed fluorescence

## 1 引 言

固态发光显示技术伴随着高清显示、光电传感、健康医疗等市场需求的快速增长而备受关注。其中,随着蒸镀 OLED 材料和器件的显著进步,有机电致发光二极管(Organic light-emitting diodes, OLEDs)技术已实现商业应用<sup>[1-3]</sup>。与此相比,发光电化学池(Light-emitting electrochemical cells, LECs)<sup>[4-6]</sup>由于制备工艺和器件结构大大简化,将在廉价柔性、可拉伸光电传感、人机交互和可穿戴织物显示器件等领域具有重要的市场应用潜力。与 OLED 的复杂结构相比<sup>[7]</sup>,LEC 器件的发光层由于包含离子导体,因此采用单发光层结构就能在电场驱动下原位形成 p-i-n 异质结,从而实现高效、平衡的载流子注入、传输和激子复合<sup>[8]</sup>。典型的 LEC 仅需要采用最简化的阳极/电化学掺杂发光层(Electrochemical doping light-emitting layer, e-EML)/阴极<sup>[9-11]</sup>器件结构,就能实现高亮度、高效率的电致发光。此外,LECs 的界面电化学原位掺杂特性,使得器件采用惰性电极材料银、铝等为阴极也能实现有效的电子注入。因此,柔性大面积的 LEC 器件可以在空气中连续湿法加工而得以实现<sup>[12-13]</sup>。因此,伴随着 LEC 器件性能的进一步提升,其市场应用前景非常广阔。

发光体系的选择是 LEC 发展的核心问题之一,且长期受到关注。采用发光金属配合物的 LECs 经过多年发展,其综合效率已比较理想。然而,该类材料包含贵金属,一方面依赖稀缺资源,一方面材料成本 and 环境污染成本较高,并非是理

想的 LEC 发展路线。近期,基于全有机的 TADF 构筑 LEC 开始受到同行们的关注。与磷光体系相比,TADF 体系基于环境热能的吸收,使得不辐射发光的三线态激子( $T_1$ )被自旋翻转成单线态激子( $S_1$ ),进而伴随延迟荧光的发生而实现  $T_1$  激子的辐射利用。为此,TADF-LEC 的理论电致发光内量子效率也能实现 100%。具体实施而言,TADF-LEC 需要通过对 e-EML 材料和组成进行优化,同时实现电化学掺杂载流子的平衡注入、传输和激子辐射复合利用。近期,Edman 课题组等<sup>[14]</sup>通过体相型激基复合物(Exciplex)主体 PVK:OXD-7 物理掺杂离子液体电解质构成 e-EML 的分散介质,通过分别掺杂红光、绿光和蓝光的 TADF 染料分子,基于主客体间的能量转移和染料电荷捕获的双重机制,实现了高亮度、高效率的 RGB 三基色 TADF 电化学发光。何磊等<sup>[15]</sup>开发了高 TADF 光致发光效率的离子型 TADF 化合物,采用最简化的单组分 e-EML 的 TADF-LEC 器件结构,实现了 4.0 V 驱动电压下  $572\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  的高亮度和 6.8% 的高外量子效率(External quantum efficiency, EQE)指标。近期,我们课题组在 Edman 工作的基础上<sup>[16]</sup>,基于非聚集诱导猝灭(Aggregation caused quenching, ACQ)型的 TADF 发光分子,构建了主客体充分能量转移/TADF 染料分子自身传输复合的双通道新结构,所制备的 TADF-LEC 最大 EQE 达到 7.6%,亮度达到  $3\,696\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 。尽管取得了以上进展,当前的 TADF-LEC 器件的电致发光光谱质量并不理想。由于典型的 TADF 发光分子的激子属性为电荷转移(Charge transfer, CT)态

特征,上述这些 TADF-LECs 均表现为极其宽的发射光谱<sup>[17-19]</sup>。半峰宽 FWHM 往往超过 100 nm 以上,无法满足 LEC 器件高清显示的性能需求。

近期,Zysman-Colman 和 Edman 课题组合作,首次将多重共振 TADF (Multi-resonance TADF, MR-TADF) 应用到 LECs 中<sup>[20-22]</sup>,实现了 FWHM 仅为 31 nm 的窄光谱蓝色电致发光。该 LEC 器件的  $E_{QE,max}$  为 3.8%,  $L_{max}$  为  $500 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 。因此,采用 MR-TADF 构筑高色纯度的 LEC 被证实是一种有效的实施方案<sup>[23-25]</sup>。然而,正如基于 MR-TADF 构筑 OLED 器件一样,该体系的发展需要 TADF 的发光分子兼顾高量子效率、窄谱带多重共振特征的同时,将其他不利因素如分子聚集猝灭效应等充分抑制。这对于发展高色纯度的高效 LEC 全光谱显示来说,无疑将变得十分困难。与 MR-TADF 相比,传统荧光掺杂剂不仅具有色纯度高的特征,而且容易合成、颜色易调变。近期,为了解决传统荧光机制无法利用  $T_1$  激子的问题,段炼<sup>[26]</sup>和安达千波矢<sup>[27]</sup>两个课题组提出了 TSF 的新机制。在该机理框架中,TADF 分子作为主体,将成为激子的形成区域。随后,TADF 分子基于其有效的反向系间窜越 (Reverse intersystem crossing, RISC) 过程,能将全部激子转换成  $S_1$  态。基于 TADF 分子和荧光染料之间的有效 Förster 共振能量转移机制 (Förster resonance energy transfer, FRET),所有的  $S_1$  态激子最终通过荧光染料分子的单线态辐射发光过程,实现全部激子的辐射利用。该 TSF 机制综合了 TADF 分子全激子利用的优势和传统荧光染料高色纯度、高效率发光的优势,是新一代的 TADF-OLED 器件技术。然而,TSF 机制还未在 LEC 领域得到成功验证。对于 LEC 来说,需要在高极性电解质存在的 e-EML 当中,筛选适合的主体、TADF 敏化剂、荧光染料和电解质以实现有效的 TSF 敏化光物理过程。与此同时,TSF 型的 LEC 在实际器件驱动条件下的激子损失情形如何,也有待详细探究。

在本工作中,我们设计制备了首例基于 TSF 机制的 LEC 器件。e-EML 中的离子传输型 TADF 敏化介质由我们前期报道的相容性良好的共混聚合物主体聚乙烯咔唑 (PVK)、1,3-双[5-(4-叔丁基苯基)-2-[1,3,4]恶二唑基]苯 (OXD-7)、低 ACQ 倾向的 3,6-双(叔丁基)-1,8-双(4-(双(4-(叔丁基)苯基)氨基)苯基)-9-(4-(4,6-二苯基-1,3,5-三嗪-2-

基)苯基)咪唑 TADF 发光分子 (BPAPTC)<sup>[28]</sup>和离子液体电解质四氟硼酸四己铵 (THABF<sub>4</sub>)按照最佳共混比例来构成<sup>[16]</sup>。对于理想的 TSF-LEC 来说,需要 TADF 敏化剂和荧光染料之间发生有效的 FRET,而且二者之间三线态激子的 DET (Dexter energy transfer) 过程、荧光染料电荷陷阱捕获发光过程均要充分被抑制。因此,TSF-LEC 器件中荧光染料掺杂浓度需要控制在很低的浓度范围内。鉴于此,我们选择了高摩尔消光系数的 BODIPY 类染料分子为荧光染料<sup>[29-31]</sup>。该染料荧光量子效率高、色纯度高,且吸收光谱与 BPAPTC 的发光光谱重叠程度高。通过光物理分析和器件分析,我们证实了该 e-EML 能够实现有效的 TSF 敏化机制。此外,通过对比器件的研究,我们进一步反证了 TSF 机制对于获得高效率荧光 LEC 的重要性。最终制备的 TSF-LEC 表现为高亮度、高色纯度的纯绿光发射。器件的最大亮度为  $2\ 285.3 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ,半峰宽 FWHM 仅为 38 nm,器件的  $E_{QE,max}$  达到 3.7%。

## 2 实验

### 2.1 材料

本实验所采用的 PVK 和 THABF<sub>4</sub> 从 Sigma-Aldrich 公司购入。OXD-7 由中国台湾激光科技公司采购。TADF 敏化剂 BPAPTC 由中国科学院长春应用化学研究所程延祥课题组提供<sup>[28]</sup>。BODIPY 的衍生物 Ar-BOD 参考文献[32]的合成方法予以合成。

### 2.2 光物理表征

溶液或薄膜样品的紫外-可见吸收光谱通过安捷伦 Cary60 测试得到。瞬态和稳态荧光光谱由爱丁堡荧光光谱仪 FLS1000 测试获得。其中,稳态氙灯光源 Xe<sub>2</sub> 用于稳态荧光测试,皮秒脉冲 LED 光源 EPLED-365 用于瞬态荧光测试。为了避免氧气对三线态激子的猝灭影响,所有薄膜态的瞬态测试均在真空环境中进行。

### 2.3 器件制备

将 ITO 玻璃衬底 (ITO 层厚度为 110 nm,面电阻为  $15 \Omega\cdot\text{sq}^{-1}$ ) 清洗干净,并在鼓风烘箱中  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  干燥 1 h,冷却后进行 20 min 的紫外臭氧处理。随后,采用 4 000 r/min 的旋涂转速,在 ITO 衬底上涂敷商用聚(3,4-乙烯二氧噻吩):聚(苯乙烯磺酸盐) (PEDOT:PSS, A14083) 水分散液,然后在  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  的真空干燥箱中干燥 30 min 以便去除水分。接下来

将样品转移到充满氮气气氛的手套箱中,将事先按指定质量比例混合好的总浓度为  $20 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$  的氯苯溶液旋涂涂覆在 ITO/PEDOT:PSS 层上(旋涂参数:  $1000 \text{ r/min}$ ,  $60 \text{ s}$ )。随后,样品在手套箱中  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  热退火  $30 \text{ min}$ , 以便烘干发光层薄膜。最后,将样品转移至真空镀膜机内部(EVOVAC, 加拿大 AE 公司),在腔体气压低于  $5 \times 10^{-4} \text{ Pa}$  的真空条件下,均匀沉积厚度为  $100 \text{ nm}$  的 Al 至发光层上。

## 2.4 性能测试

采用商用电流-电压-亮度测试系统 FS-2000TR (苏州富士达, Fstar) 进行 LEC 器件的测试,其中电流电压源表为 Keithley 2400 (用于读取电压、电流),分光辐射度计为 CS2000A (用于获取亮度、EL 光谱)。测试过程中 LEC 没有进行封装处理。计算器件外量子效率时,假设所制备的 LEC 器件均为标准的朗伯余弦发射体。

## 3 结果与讨论

TSF-LEC 的成功构筑需要 e-EML 中 TADF 敏化剂和荧光染料之间实现有效的 FRET 能量转移。为了判断 BPAPTC 与荧光掺杂剂 Ar-BOD 之间是否能够实现有效的能量转移,我们首先对 e-EML 中 PVK:OXD-7 共主体、TADF 分子 BPAPTC

和绿色荧光分子 Ar-BOD 进行了必要的基础光物理测试(图 1(a)、(b)分别对应它们的紫外-可见吸收光谱、荧光光谱和分子结构式)。如图 1(a)所示, BPAPTC 的 CT 态吸收带与 PVK:OXD-7 (6:4,  $w/w$ ) 的 PL 光谱重叠良好,表明 PVK:OXD-7 向 BPAPTC 的能量转移十分有效。此外, Ar-BOD 的摩尔消光系数很高,达到  $9.2 \times 10^4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。而且如图 1(a)粉红色区域所显示, BPAPTC 的 PL 光谱与荧光染料 Ar-BOD 的吸收光谱的重叠区域十分显著。因此,从 FRET 的机理上讲<sup>[26]</sup>, BPAPTC 和 Ar-BOD 之间将有望实现十分高效的 FRET 过程。由于 BPAPTC 在 e-EML 中的掺杂浓度达到 18%, 因此 PVK:OXD-7 (6:4,  $w/w$ )  $\rightarrow$  BPAPTC  $\rightarrow$  Ar-BOD 的级联式 FRET 能量转移和 BPAPTC  $\rightarrow$  Ar-BOD 直接 FRET 能量转移均有可能发生,并具有重要作用。此外,从图 1(a)中的 PL 光谱可以看到,相比于 BPAPTC 的 PL 光谱(发射峰位在  $530 \text{ nm}$ , FWHM 为  $98 \text{ nm}$ ), 同样是绿光发射的 Ar-BOD, 其荧光发射峰位置相似, 处于  $523 \text{ nm}$ , 但是其 FWHM 显著降低至  $23 \text{ nm}$ , 展现出超高色纯度的纯绿光发射。因此,如能成功构建基于 Ar-BOD 的 TSF-LEC, 则器件不仅发光效率高, 而且 EL 光谱色纯度也将变得十分理想。

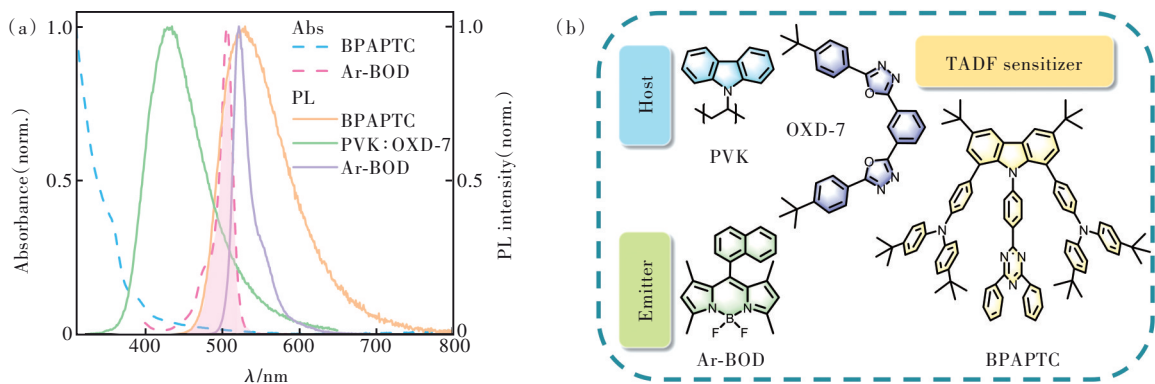


图 1 (a)主体(PVK:OXD-7)、TADF 敏化剂(BPAPTC)和掺杂剂(Ar-BOD)的归一化吸收光谱和 PL 光谱;(b)主体、敏化剂和掺杂剂的化学结构式

Fig.1 (a)Normalized absorption spectra and PL spectra of the host(PVK:OXD-7), TADF sensitizer(BPAPTC) and dopant(Ar-BOD). (b)The corresponding chemical structures of these materials

图 2(a)显示了所构筑的基于 PVK:OXD-7、BPAPTC、THABF<sub>4</sub> 和 Ar-BOD 为 e-EML 发光活性层组分的 LEC 器件能级位置图。相关材料的最高占据分子轨道(The highest occupied molecular orbitals, HOMO)和最低未占据分子轨道(The lowest unoccupied molecular orbitals, LUMO)的能级位置均采用常规的循环伏安测试结果计算获得。可

以看出, Ar-BOD 染料的 LUMO 能级位置位于  $-3.4 \text{ eV}$ , 显著低于 BPAPTC 的  $-3.1 \text{ eV}$ 。为此,在实际器件工作状态下, Ar-BOD 的电子陷阱作用将有可能发生。要设计制备高效率的 TSF-LEC, Ar-BOD 的掺杂浓度需要尽可能降低, 以克服 Ar-BOD 直接电荷捕获发光造成三线态激子的损失。e-EML 的整体结构由 PVK:OXD-7(( $78-x$ )%, 6:4,  $w/w$ ):

BPAPTC(18%):THABF<sub>4</sub>(4%):Ar-BOD( $x\%$ ,  $x = 0, 0.05, 0.1, 0.2$ )所组成。其中,THABF<sub>4</sub>作为电解质掺杂剂是一种有效的固态离子液体材料,用于实现PVK:OXD-7匹配性的电化学掺杂效果<sup>[14]</sup>。对于PVK:OXD-7(78%, 6:4,  $w/w$ ):BPAPTC(18%):THABF<sub>4</sub>(4%)掺杂e-EML的主体结构来说,我们的前期工作对该结构的优势进行了充分诠释<sup>[16]</sup>。它主要包括:(1)PVK:OXD-7共主体、BAPTC和THABF<sub>4</sub>之间的物理相容性良好,能够形成均匀分散的e-EML多组分掺杂e-EML薄膜;(2)以THABF<sub>4</sub>为电解质,PVK:OXD-7为双组分共混体相exciplex主体,电驱动条件下e-EML具有平衡的p/n-电化学掺杂能力,能够保证LEC在工作中空穴和电子的高效注入和平衡传输<sup>[14]</sup>;(3)BPAPTC具有极低的ACQ倾向,因此BPAPTC可以在高掺杂浓度下实现更为充分的PVK:OXD-7(6:4,  $w/w$ ) $\rightarrow$ BAPTC能量转移;(4)e-EML中由于BPAPTC掺杂浓度高,空穴和电子还可以直接在BPAPTC上注入和跳跃传输,这将进一步增加载流子在e-EML中的激子复合效率。该工作中,我们仅仅在

该e-EML的基础上额外添加了极低含量的Ar-BOD(0.05%~0.2%)。因此,我们推测对应e-EML的多组分物理相容性、载流子注入和传输、激子复合等关键过程,均未发生大的改变。而且对于高浓度掺杂BPAPTC的e-EML来说,载流子可在e-EML中窄带隙的BPAPTC直接传输和复合,这对于降低Ar-BOD的电荷陷阱作用来说是十分有利的,这些发光层的组成和结构特点为构筑有效的TSF-LEC奠定了基础。

图2(b)显示了掺杂不同浓度Ar-BOD的e-EML薄膜光物理行为。当Ar-BOD的掺杂浓度为0.05%时,e-EML薄膜的PL光谱已经由Ar-BOD的特征窄光谱发射占主导。随着掺杂浓度的增加,e-EML薄膜的PL光谱进一步窄化,直至与Ar-BOD本征PL光谱完全吻合。这表明e-EML在0.05%的极低掺杂浓度时,在含有高极性THABF<sub>4</sub>电解质的e-EML发光层中,BPAPTC向Ar-BOD的能量转移过程尽管很有效,但仍残留了少量来自BPAPTC的荧光发射贡献。当进一步增加Ar-BOD的掺杂浓度至0.2%时,e-EML展现出Ar-

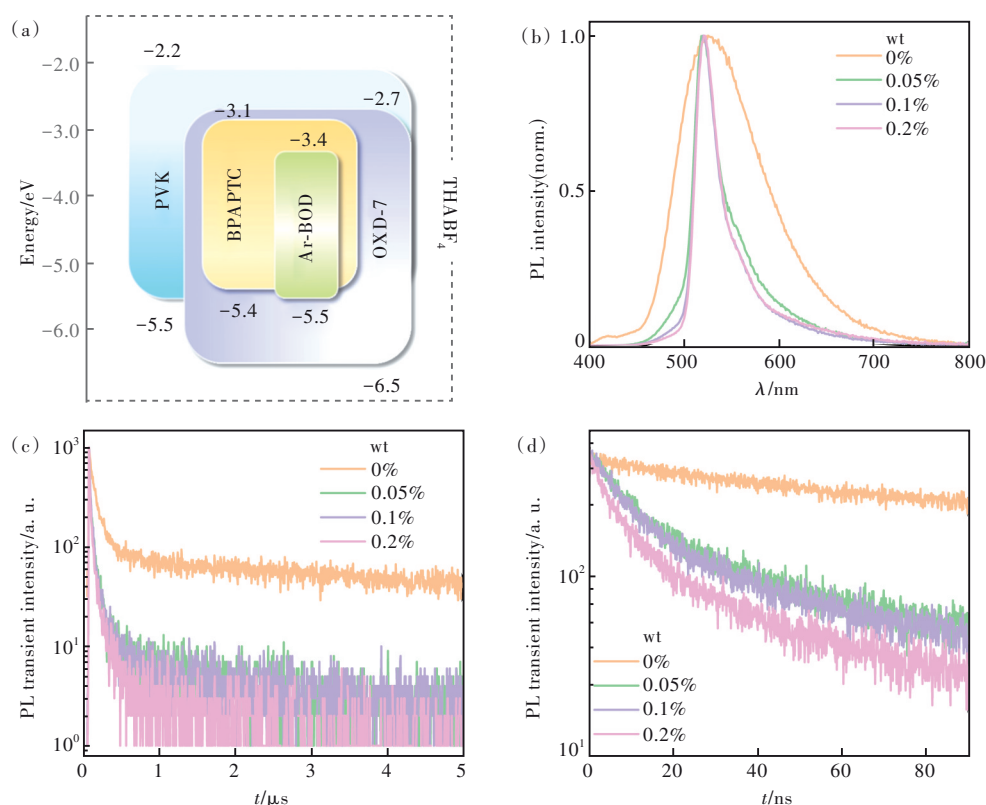


图2 (a)TSF-LECs中e-EML的能级图;(b)~(d)e-EML的PL稳态光谱、长时间和短时间尺度区间的PL瞬态光谱(其中e-EML结构:PVK:OXD-7((78-x)% ,6:4,  $w/w$ ):BPAPTC(18%):THABF<sub>4</sub>(4%):Ar-BOD( $x\%$ ,  $x = 0, 0.05, 0.1, 0.2$ ))

Fig.2 (a) The Schematic HOMO/LUMO energy level diagrams of e-EML of TSF-LECs. (b)~(d) Steady-state PL spectra and transient PL decay curves of different e-EML samples, *i.e.*, PVK:OXD-7((78-x)% ,6:4,  $w/w$ ):BPAPTC(18%):THABF<sub>4</sub>(4%):Ar-BOD( $x\%$ ,  $x = 0, 0.05, 0.1, 0.2$ )

BOD的本征荧光发射。这表明,在该掺杂浓度下,BPAPTC向Ar-BOD的能量转移得以完全实现。我们测试了不同掺杂浓度e-EML薄膜的荧光量子效率(Photoluminescence quantum yields, PLQYs)。当Ar-BOD掺杂浓度分别对应0.0%~0.2%时,e-EML薄膜的PLQY分别为77.7%、62.3%、54.8%、44.4%。这可能是由于平面型分子Ar-BOD具有强ACQ倾向的原因,伴随Ar-BOD掺杂浓度的提高,e-EML薄膜的PLQYs逐渐下降。由于PVK:OXD-7共混主体和BPAPTC的质量浓度均较高,我们推测e-EML发光薄膜中实际的能量传递过程包含两种主要途径:PVK:OXD-7→BPAPTC→Ar-BOD和BPAPTC→Ar-BOD。以上两种途径均以BPAPTC作为TADF敏化剂桥梁来实现e-EML层中单线态和三线态激子的收集和能量转移发光,二者共同构成了Ar-BOD的TSF发光机制。由于对应的薄膜样品中荧光染料Ar-BOD的掺杂浓度极低,我们推测BPAPTC和Ar-BOD之间的距离仅能使得长程FRET过程得以有效发生,而短程的DET过程则不容易发生。如图2(c)所示,掺杂0.05%~0.2%Ar-BOD的e-EML发光薄膜的瞬态荧光曲线展现出典型的瞬时荧光+延迟荧光的双组分特征。这与Ar-BOD荧光染料本征的纳秒级荧光衰减曲线以及不含有BPAPTC敏化剂的掺杂e-EML纳秒级荧光衰减曲线相比,均有根本的不同。由于图2(b)中呈现的掺杂0.05%~0.2%Ar-BOD的e-EML的PL光谱基本与Ar-BOD本征PL光谱保持一致,我们认为图2(c)中掺杂0.05%~0.2%Ar-BOD的e-EML瞬态PL衰减曲线为Ar-BOD的激子衰减行为,其中的延迟PL特征源于BPAPTC中 $T_1$ 向 $S_1$ 的慢速RISC过程。该延迟PL光谱特征表明该e-EML掺杂体系确实能够实现三线态激子的利用。与不掺杂Ar-BOD的参比样品相比,掺杂0.05%~0.2%Ar-BOD的e-EML的延迟部分显著降低。这是由于BPAPTC向Ar-BOD发生快速的FRET,BPAPTC中 $T_1$ 向 $S_1$ 的RISC转换效率被掺杂Ar-BOD加快所致。Ar-BOD的引入为BPAPTC提供了一条快速消耗 $S_1$ 的新通道,这使得BPAPTC的系间窜越(Intersystem crossing, ISC)效率 $\Phi_{ISC}$ 降低,激子在ISC和RISC之间的循环周期减少<sup>[26-27]</sup>。图2(d)给出了掺杂不同浓度Ar-BOD的e-EML薄膜的瞬时PL衰减部分。掺

杂0%Ar-BOD的e-EML的瞬时寿命为88.47 ns,完全来自于BPAPTC的瞬时荧光。掺杂0.05%~0.2%Ar-BOD的e-EML的瞬时寿命分别为36.34,35.13,31.26 ns。相比于Ar-BOD的本征荧光寿命(6.1 ns),这些掺杂Ar-BOD的e-EML瞬时荧光寿命均明显延长,呈现出BPAPTC瞬时荧光对Ar-BOD瞬时发光的影响。因此,该e-EML中BPAPTC向Ar-BOD的敏化发光得到证实:一方面,Ar-BOD的激子衰减曲线中体现出延迟荧光的特征,这归功于BPAPTC中 $T_1$ 激子上转换为 $S_1$ ,进而发生FRET过程;另一方面,Ar-BOD的激子衰减中的瞬时荧光激子寿命较其本征值也有显著的增加,它们更加接近BPAPTC的瞬时荧光寿命。这表明Ar-BOD的瞬时荧光部分也主要来自于BPAPTC中的单线态激子。根据不同e-EML的瞬态光谱和PLQY,我们计算出BPAPTC和Ar-BOD之间的FRET速率(表S1)。随着掺杂浓度的增加,FRET速率( $k_{FRET}$ )也随之增大,FRET转移效率逐渐提高,BPAPTC的发光逐渐被猝灭,e-EML的PL光谱逐渐向Ar-BOD本征光谱逼近。稳态、瞬态PL光谱分析以及计算结果显示,Ar-BOD在0.05%~0.2%的极低掺杂浓度范围内,包含固态电解质THAPF<sub>4</sub>的e-EML可以实现TSF的敏化荧光特征,这为构建高性能TSF-LEC奠定了光物理基础。

我们通过测试结构为ITO/PEDOT:PSS(ca. 50 nm)/PVK:OXD-7((78-x)%, 6:4, w/w):BPAPTC(18%):THABF<sub>4</sub>(4%):Ar-BOD(x, x = 0, 0.05, 0.1, 0.2)(ca. 100 nm)/Al(100 nm)的器件来评估掺杂Ar-BOD之后TSF-LECs的器件性能,其结果如表1所示。4个不同掺杂浓度的LECs如图S1所示,在恒定电流密度(100 A·m<sup>-2</sup>)的驱动下,伴随工作时间的延长,在开始的1~3 min内,器件亮度开始迅速上升,电压迅速下降,这是LECs的典型工作特性<sup>[14-16]</sup>。当施加电压时,在离子导体THABF<sub>4</sub>的存在下,e-EML中自由移动的阴离子和阳离子将向电极两侧迁移,从而在e-EML两侧电极界面处形成利于载流子注入的电化学掺杂界面层。伴随电化学掺杂过程逐渐完善,器件驱动电压逐渐降低,空穴/电子传输的平衡性也逐渐得到改善。当达到峰值亮度之后,亮度出现不同程度的降低,这主要是由于激子-激子湮灭或者载流子-激子湮灭等激子退化因素所致<sup>[33]</sup>。

表1 TSF-LECs的器件性能汇总

Tab. 1 EL performance characteristics of TSF-LECs

Doping concentration/%	$L_{\max}/(\text{cd}\cdot\text{m}^{-2})$	$\text{EQE}_{\max}/\%$	$\text{CE}_{\max}/(\text{cd}\cdot\text{A}^{-1})$	EL/nm	FWHM/nm	$\text{CIE}(x, y)$
0.0	2 484.2	6.1	19.3	533	106	(0.353 3, 0.556 7)
0.05	2 285.3	3.7	12.8	520	38	(0.305 9, 0.618 9)
0.1	2 125.8	2.7	9.4	520	34	(0.299 0, 0.627 7)
0.2	1 670.1	1.6	5.6	520	31	(0.288 4, 0.647 4)

在掺杂浓度 0.05% 时, 器件实现了  $2\,285.3\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  的最大发光亮度,  $\text{EQE}_{\max}$  为 3.7%。相比于不掺杂 Ar-BOD 的参比器件, 器件的 FWHM 从 106 nm 降低至 38 nm, 器件的色纯度得到显著提高。当前 TSF-LEC 器件的 EQE 指标虽仍未达到最优 TADF-LEC 的效率水平, 但是获得了窄光谱发光的优异特性, 而且其综合指标接近甚至超过了当前基于 MR-TADF 的窄光谱 LEC 器件 (表 S2)。因此, 基于 TSF 机制构筑高效率、高亮度和高色纯度的 LEC 具有发展潜力。从图 3 的亮度和效率关系图可见, 随着掺杂浓度的增大, LECs 的亮度和效率都在持续下降。我们推测亮度和效率下降的原因可能主要有以下两点: 首先, 从

图 3(a) 中我们看到, 随着 Ar-BOD 掺杂浓度的增加,  $J$ - $V$  曲线显示电流密度逐渐降低, 这表明 Ar-BOD 在 TSF-LEC 器件中存在电荷陷阱效应; 并且伴随 Ar-BOD 掺杂浓度从 0% 到 0.2% 范围的增加, 其电荷陷阱作用逐渐增加, 与之对应的 Ar-BOD 电荷捕获发光机制造成的三线态激子非辐射损失也逐渐增加。与此同时, 掺杂浓度的增加也有可能使得 Ar-BOD 与 BPAPTC 分子间的距离降低到 DET 发生的距离, 这也将造成三线态激子损失, 进而降低器件效率。其次, 考虑到 0.2% 的掺杂浓度仍处于很低的浓度水平, 我们认为 DET 的激子损失途径应该不是主要因素, 而 Ar-BOD 的电子陷阱作用所导致的电荷捕获发光机制应

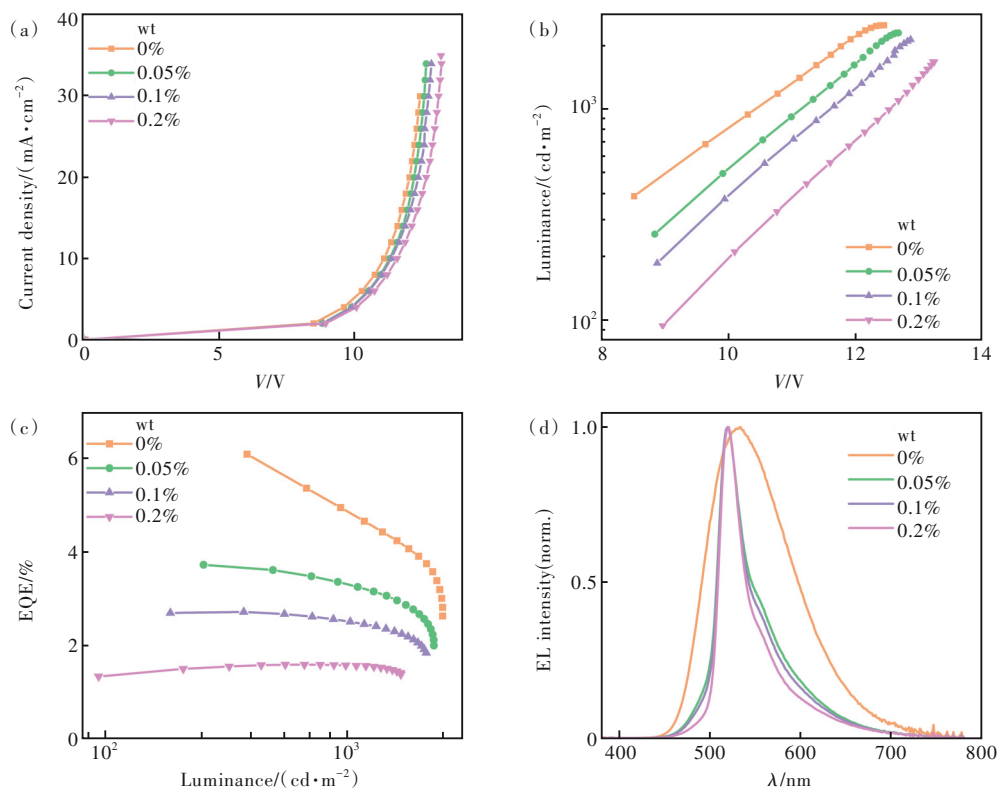


图3 TSF-LECs的电流密度-电压( $J$ - $V$ )曲线(a)、亮度-电压( $L$ - $V$ )曲线(b)、外量子效率-亮度(EQE- $L$ )曲线(c)和电致发光(EL)光谱(d)

Fig.3 The current density-voltage ( $J$ - $V$ ) curves (a), luminance-voltage ( $L$ - $V$ ) curves (b), EQE-luminance (EQE- $L$ ) curves (c) and electroluminescence (EL) spectra (d) of TSF-LECs with different doping content of Ar-BOD

该是效率随掺杂浓度增加而急剧降低的主要原因。对于 EL 光谱来说, 0.05% 和 0.1% 的掺杂浓度下, 器件仍有残余的 BPAPTC 发射。当掺杂浓度达到 0.2% 时, BPAPTC 敏化剂发光完全消失, 显示出 Ar-BOD 的本征窄发射光谱特征。这是因为伴随掺杂浓度的增加, BPAPTC 向 Ar-BOD 的 FRET 能量转移过程更为充分。图 2 对应的 PL 光谱分析部分已经对该问题予以了充分阐述。对于掺杂浓度为 0.05% 的最高效 TSF-LEC 器件来说, 其 EQE 性能低于掺杂浓度为 0% 的参比器件, 这一方面归咎于 Ar-BOD 的电荷陷阱作用造成的三线态激子损失, 另一方面也可能是由于在该掺杂浓度下 BPAPTC 向 Ar-BOD 的 FRET 能量转移不充分所致。此外, 掺杂 Ar-BOD 之后 e-EML 薄膜的 PLQY 被一定程度地降低, 也是器件 EQE 下降的原因之一。然而, 我们也看到, 相比于基于 TADF 分子发光的 TADF-LEC 器件, 基于荧光分子发光的 TSF-LEC 器件的效率滚降速度明显降低。这很可能归功于 TSF 机制, 它大大降低了 e-EML 层中的三线态激子浓度堆积作用。

我们认为该工作之所以能实现高亮度、高效率和窄光谱的 TSF-LECs, 关键要素至少包括: (1) 利用 TSF 机制使荧光染料能够有效利用三线态激子而辐射发光; (2) 使用了具有平衡空穴/电子传输能力的电化学掺杂 PVK:OXD-7 双主体材料。为了验证第一条猜测, 我们制备了不含 BPAPTC 敏化剂的 LECs。从图 S2 和 S3 可知, 在不引入 TADF 敏化剂的条件下, 当掺杂浓度较低在 0.05%~0.2% 时, 无论是 EL 还是 PL 光谱都体现出明显的主体发射。将掺杂浓度升高至 5% 时, 主体和 Ar-BOD 之间实现了充分的能量转移, 主体发射完全消失, Ar-BOD 的 PL 光谱发生了明显的红移和宽化, 这是 Ar-BOD 染料浓度聚集猝灭效应所致。对比 EL 和 PL 光谱(图 S3), 我们可以看到, EL 光谱中的主体发射较之 PL 光谱中弱, 这是因为在器件工作中 Ar-BOD 存在强的电荷陷阱发光作用。从表 S3 可知, 没有采用敏化机制的 LECs 效率要差很多, EQE 最高仅有 0.49%, 最大亮度仅为  $400 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  左右。由此可见敏化策略对改善荧光型 LEC 器件性能的重要性。

从图 S4 中可知, 当 e-EML 不含有 PVK:OXD-7 共混主体时, 仅用 BPAPTC 电化学掺杂 THABF<sub>4</sub> 作为活性层的主体框架时, 器件的发光效率也非

常低。这是因为 BPAPTC 的电化学氧化和电化学还原能力不匹配<sup>[16]</sup>。实际器件驱动下, e-EML 中载流子注入和传输不平衡, 因此激子产生及复合效率低。尽管如此, 值得关注的是, 掺杂 Ar-BOD 之后的 TSF-LEC 的器件性能较之未掺杂的参比器件有显著的提升。如表 S4 所示, 器件 EQE<sub>max</sub> 从 0.06% 提升到 0.25%, 器件最大亮度从  $274 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  提升至  $1186 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 。可见, TSF-LEC 利用三线态激子快速复合发光的特性, 对于提升 TADF-LEC 的发光效率和器件亮度均是十分有效的。综合两组对照器件结果, 该工作构筑的高性能 TSF-LEC 实际上离不开 TADF 敏化剂和 p-/n-掺杂 PVK:OXD-7 共混主体两者间的任意一项。

我们从电荷传输、激子复合和能量传递这三个方面对当前 TSF-LECs 的工作机理进行了以下归纳(图 4)。根据前面工作机制的讨论, 我们猜测载流子将通过三条路径注入、传输形成激子, 最终辐射发光: (1) 空穴和电子会通过 PVK:OXD-7 共混主体材料传输形成激子, 再通过主体 PVK:OXD-7→敏化剂 BPAPTC→荧光掺杂剂 Ar-BOD 之间的逐级能量转移, 最终实现 Ar-BOD 发射; (2) 另一部分载流子会通过 BPAPTC 直接注入传输形成激子, 再通过 BPAPTC→荧光掺杂剂 Ar-BOD 的 FRET 过程, 实现 Ar-BOD 发射; (3) 一部分注入的载流子(主要是电子)会直接被 Ar-BOD 捕获, 进而在库伦力作用下诱发形成电荷捕获型激子, 并直接辐射发光。该工作基于高摩尔消光系数的 BODIPY 型荧光染料为掺杂剂, 在极低的掺杂浓度下, 尽管能量转移过程 I 和 II 很充分, 但是过程 III 的存在使得 TSF-LEC 的器件效率仍旧未能达到最理想的情况。对于蒸镀的 TSF-OLED 来说<sup>[26-27]</sup>, 学者们可以通过发光层内部组分调控和发光层两侧 HOMO/LUMO 能级位置的自由设计, 来尽可能地抑制或者消除发光层中染料的电荷陷阱作用, 从而实现高掺杂浓度和高 EQE 指标。然而, 这些方法对于单 e-EML 结构的 LEC 来说无法实现。正如图 3(a)、图 S2(a) 和图 S4(a) 所示, Ar-BOD 的电荷陷阱作用在各种主体结构下, 即使掺杂浓度低至 0.05%~0.1%, 仍旧显著存在。为了进一步提升 TSF-LEC 器件性能, 我们需要对 TSF-LECs 的结构和组分构成进行进一步设计, 来更好地抑制或消除这种电荷捕获现象。从理论上讲, 荧光染料电荷捕获的抑制和消除可通过降低荧



光染料掺杂浓度和降低荧光染料电荷陷阱深度来予以实现。因此,一方面可以尝试筛选FRET能量转移效率更好的TADF敏化剂/荧光染料组合,以确保在采用更低的荧光染料掺杂浓度下也能实现有效的FRET;另一方面,筛选或设计合成HOMO/LUMO前线轨道能级位置完美匹配的主

体、TADF敏化剂和荧光掺杂剂组合,使荧光染料在e-EML中的电荷陷阱强度被大大降低,这也将有可能进一步抑制或消除荧光染料的电荷陷阱作用。这一设计思路在我们制备的低压驱动、高效、颜色稳定的白光OLED研究中被证实是十分有效的<sup>[34-35]</sup>。

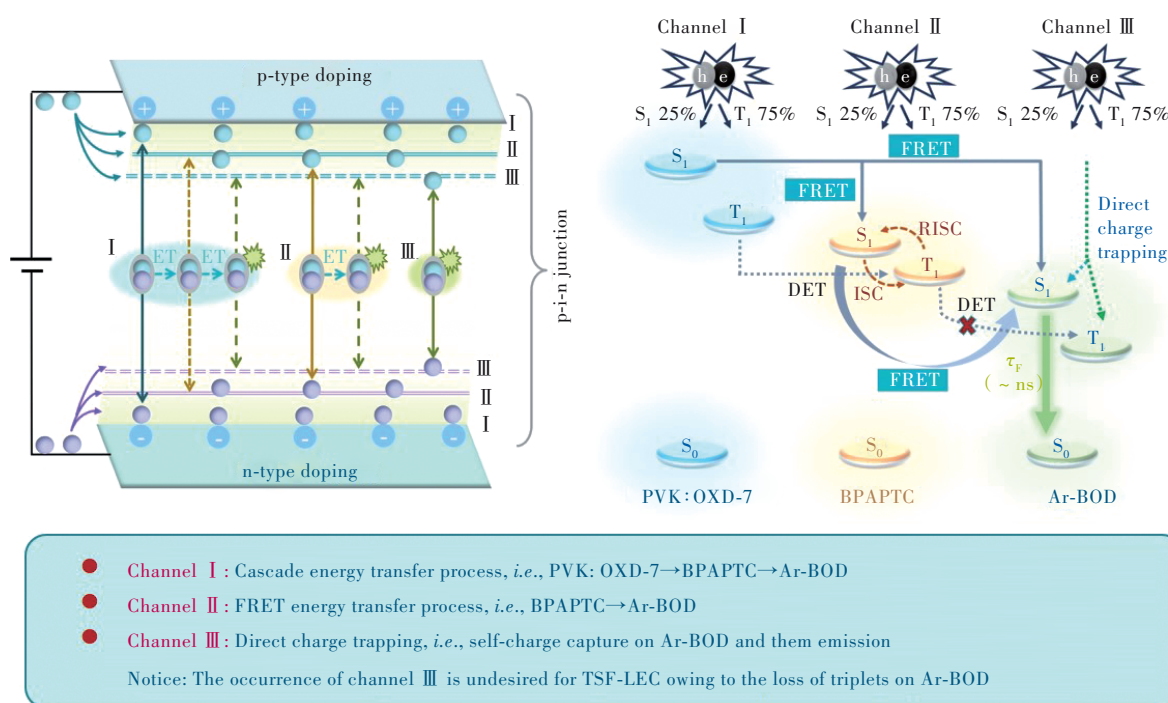


图4 TSF-LEC中的激子复合以及材料间能量转移示意图

Fig.4 Exciton recombination and energy transfer process in TSF-LEC

## 4 结 论

我们通过TADF敏化荧光机制(TSF)成功报道了首例高效、高亮度、窄FWHM光谱特征的高色纯度的TSF-LECs。该器件中,我们采用传统高摩尔消光系数荧光染料BODIPY为掺杂剂,通过选择具有平衡电化学掺杂能力的PVK:OXD-7共混主体和具有低ACQ性质、高掺杂浓度的TADF敏化剂为LEC活性层的基本构筑单元,成功实现了荧光染料低掺杂浓度下的TSF效果。所制得的TSF-LEC最大亮度为 $2285.3 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ,最高EQE为3.7%,FWHM为38 nm。

这与近期学术界报道的基于MR-TADF实施路线构筑窄谱带、高色纯度LEC的综合器件效果相当。进一步分析显示,限制当前TSF-LEC效率进一步提升的主要因素在于窄能隙荧光染料的电荷陷阱作用。综上所述,该工作证实了TSF-LEC构筑高效、高亮度、窄FWHM特征LEC的可行性和发展潜力,并为该领域进一步的研究提供了有益的参考和思路。

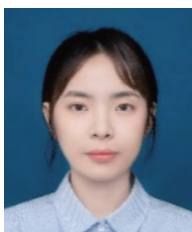
本文补充文件和专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20240012>。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 高羽晗, 谢国华. 级联敏化三元旋涂型磷光器件电致发光性能 [J]. 发光学报, 2023, 44(2): 219-226.  
GAO Y H, XIE G H. Electroluminescent performances of solution-processed phosphorescent organic light-emitting diodes based on cascade energy transfer of ternary blends [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(2): 219-226. (in Chinese)
- [ 2 ] ZHOU L, NI F, LI N, *et al.* Tetracoordinate boron-based multifunctional chiral thermally activated delayed fluorescence

- emitters [J]. *Angew. Chem.*, 2022, 134(28): e202203844.
- [ 3 ] 马东阁. OLEDs中的激子及其高效利用 [J]. *发光学报*, 2023, 44(1): 174-185.  
MA D G. Excitons and their efficient utilization in OLEDs [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(1): 174-185. (in Chinese)
- [ 4 ] WANG S M, ZHANG H Y, ZHANG B H, *et al.* Towards high-power-efficiency solution-processed OLEDs: material and device perspectives [J]. *Mater. Sci. Eng. R: Rep.*, 2020, 140: 100547.
- [ 5 ] WOO J Y, PARK M H, JEONG S H, *et al.* Advances in solution-processed OLEDs and their prospects for use in displays [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(43): 2207454.
- [ 6 ] LI B W, DING Z M, WU Z M, *et al.* Thermally activated delayed fluorescence emitters with bulky four-coordinate boron acceptors for high-performance solution-processed OLEDs [J]. *Chem. Eng. J.*, 2023, 476: 146484.
- [ 7 ] 娄敬丽, 黎刚刚, 王志明, 等. 紫外/深蓝 OLED 发光材料研究进展 [J]. *发光学报*, 2023, 44(1): 37-60.  
LOU J L, LI G G, WANG Z M, *et al.* Progress of ultraviolet/deep-blue OLED luminescent materials [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(1): 37-60. (in Chinese)
- [ 8 ] GETS D, ALAHBAKHSI M, MISHRA A, *et al.* Reconfigurable perovskite LEC: effects of ionic additives and dual function devices [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2021, 9(3): 2001715.
- [ 9 ] BAI R B, MENG X W, WANG X X, *et al.* Color-stable, efficient, and bright blue light-emitting electrochemical cell using ionic exciplex host [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2021, 31(3): 2007167.
- [ 10 ] PANG X C, ZHANG K, SONG Y J, *et al.* Intrinsically-ionic donor-acceptor molecules featuring thermally-activated delayed fluorescence for high-performance host-guest blue light-emitting electrochemical cells [J]. *Chem. Eng. J.*, 2022, 450: 137987.
- [ 11 ] LIU Y F, TANG S, WU X Y, *et al.* Carbon nanodots: a metal-free, easy-to-synthesize, and benign emitter for light-emitting electrochemical cells [J]. *Nano Res.*, 2022, 15(6): 5610-5618.
- [ 12 ] SU H C. Optical techniques for light-emitting electrochemical cells [J]. *ChemPlusChem*, 2018, 83(4): 197-210.
- [ 13 ] MAHORO G U, FERNANDEZ-CESTAU J, RENAUD J L, *et al.* Recent advances in solid-state lighting devices using transition metal complexes exhibiting thermally activated delayed fluorescent emission mechanism [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2020, 8(16): 2000260.
- [ 14 ] LUNDBERG P, TSUCHIYA Y, LINDH E M, *et al.* Thermally activated delayed fluorescence with 7% external quantum efficiency from a light-emitting electrochemical cell [J]. *Nat. Commun.*, 2019, 10(1): 5307.
- [ 15 ] YU R Y, SONG Y J, ZHANG K, *et al.* Intrinsically ionic, thermally activated delayed fluorescent materials for efficient, bright, and stable light-emitting electrochemical cells [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2022, 32(13): 2110623.
- [ 16 ] YE J C, HE Y, LI K F, *et al.* Achieving record efficiency and luminance for TADF light-emitting electrochemical cells by dopant engineering [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2022, 14(15): 17698-17708.
- [ 17 ] WONG M Y, HEDLEY G J, XIE G H, *et al.* Light-emitting electrochemical cells and solution-processed organic light-emitting diodes using small molecule organic thermally activated delayed fluorescence emitters [J]. *Chem. Mater.*, 2015, 27(19): 6535-6542.
- [ 18 ] WONG M Y, ZYSMAN-COLMAN E. Purely organic thermally activated delayed fluorescence materials for organic light-emitting diodes [J]. *Adv. Mater.*, 2017, 29(22): 1605444.
- [ 19 ] LI X N, FU S Y, XIE Y J, *et al.* Thermally activated delayed fluorescence materials for organic light-emitting diodes [J]. *Rep. Prog. Phys.*, 2023, 86(9): 096501.
- [ 20 ] TANG S, DOS SANTOS J M, RÀFOLS-RIBÉ J, *et al.* Introducing MR-TADF emitters into light-emitting electrochemical cells for narrowband and efficient emission [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 33(42): 2306170.
- [ 21 ] DOS SANTOS J M, CHAN C Y, TANG S, *et al.* Color tuning of multi-resonant thermally activated delayed fluorescence emitters based on fully fused polycyclic amine/carbonyl frameworks [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2023, 11(24): 8263-8273.
- [ 22 ] KARAMAN M, GUPTA A K, SURESH S M, *et al.* Ionic multiresonant thermally activated delayed fluorescence emitters for light emitting electrochemical cells [J]. *Beilstein J. Org. Chem.*, 2022, 18: 1311-1321.
- [ 23 ] HATAKEYAMA T, SHIREN K, NAKAJIMA K, *et al.* Ultrapure blue thermally activated delayed fluorescence molecules: efficient HOMO-LUMO separation by the multiple resonance effect [J]. *Adv. Mater.*, 2016, 28(14): 2777-2781.
- [ 24 ] LIANG X, YAN Z P, HAN H B, *et al.* Peripheral amplification of multi-resonance induced thermally activated delayed

- fluorescence for highly efficient OLEDs [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2018, 57(35): 11316-11320.
- [25] KONDO Y, YOSHIURA K, KITERA S, *et al.* Narrowband deep-blue organic light-emitting diode featuring an organoboron-based emitter [J]. *Nat. Photonics*, 2019, 13(10): 678-682.
- [26] ZHANG D D, DUAN L, LI C, *et al.* High-efficiency fluorescent organic light-emitting devices using sensitizing hosts with a small singlet-triplet exchange energy [J]. *Adv. Mater.*, 2014, 26(29): 5050-5055.
- [27] NAKANOTANI H, HIGUCHI T, FURUKAWA T, *et al.* High-efficiency organic light-emitting diodes with fluorescent emitters [J]. *Nat. Commun.*, 2014, 5: 4016.
- [28] LI K F, ZHU Y H, YAO B, *et al.* Rotation-restricted thermally activated delayed fluorescence compounds for efficient solution-processed OLEDs with EQEs of up to 24.3% and small roll-off [J]. *Chem. Commun.*, 2020, 56(44): 5957-5960.
- [29] VERBELEN B, LEEN V, WANG L N, *et al.* Direct palladium-catalysed C-H arylation of BODIPY dyes at the 3- and 5-positions [J]. *Chem. Commun.*, 2012, 48(73): 9129-9131.
- [30] GÓMEZ-DURÁN C F, GARCÍA-MORENO I, COSTELA A, *et al.* 8-PropargylaminoBODIPY: unprecedented blue-emitting pyromethene dye. Synthesis, photophysics and laser properties [J]. *Chem. Commun.*, 2010, 46(28): 5103-5105.
- [31] SQUEO B M, PASINI M. BODIPY platform: a tunable tool for green to NIR OLEDs [J]. *Supramol. Chem.*, 2020, 32(1): 56-70.
- [32] MERKUSHEV D A, USOLTSEV S D, MARFIN Y S, *et al.* BODIPY associates in organic matrices: spectral properties, photostability and evaluation as OLED emitters [J]. *Mater. Chem. Phys.*, 2017, 187: 104-111.
- [33] SCHLINGMAN K, CHEN Y T, CARMICHAEL R S, *et al.* 25 years of light-emitting electrochemical cells: a flexible and stretchable perspective [J]. *Adv. Mater.*, 2021, 33(21): 2006863.
- [34] WANG S M, ZHAO L, ZHANG B H, *et al.* High-energy-level blue phosphor for solution-processed white organic light-emitting diodes with efficiency comparable to fluorescent tubes [J]. *iScience*, 2018, 6: 128-137.
- [35] WANG S M, ZHANG B H, WANG X D, *et al.* Ultrahigh color-stable, solution-processed, white OLEDs using a dendritic binary host and long-wavelength dopants with different charge trapping depths [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2015, 3(10): 1349-1354.



陈荔丝(1999-),女,广东韶关人,硕士研究生,2021年于广东石油化工学院获得学士学位,主要从事热活化延迟荧光材料敏化传统荧光染料的电致发光器件的研究。

E-mail: lisi\_cc@163.com



陶春兰(1980-),女,甘肃武威人,博士,副教授,硕士生导师,2009年于兰州大学获得博士学位,主要从事有机发光器件与能源转换器件的研究。

E-mail: taochl@gzhu.edu.cn



赵小龙(1982-),男,甘肃庆阳人,博士,副教授,硕士生导师,2012年于兰州大学获得博士学位,主要从事有机全合成、功能有机分子的合成研究。

E-mail: zhaoxl82@nwnu.edu.cn



张保华(1982-),男,湖北宜昌人,博士,教授,硕士生导师,2010年于中国科学院长春应用化学研究所获得博士学位,主要从事有机/钙钛矿发光材料和器件的相关研究。

E-mail: ccbhzhzhang@gzhu.edu.cn