



游劲松, 四川大学化学学院教授, 国家杰出青年科学基金获得者, 国家级重要人才计划入选者。长期致力于有机光电材料的合成化学基础研究, 发展基于碳氢键高效、高选择性转化构筑 π 共轭结构的新方法与新策略, 为有机光电材料的开发提供了变革性设计策略与合成路线, 在构建非传统结构的新型 OLED 材料方面取得重要研究成果。迄今发表论文 300 余篇, 获授权国际国内专利 30 余项, 牵头组建了四川大学-华为化学材料联合实验室, 并担任联合实验室主任。获四川省自然科学奖一等奖及教育部自然科学奖一等奖等奖项。



宾正杨, 四川大学化学学院教授、博士生导师。长期致力于 OLED 新材料与器件研究, 提出基于分子芳香性调控光谱肩峰的“芳香性定域效应”; 围绕窄光谱发光核心目标, 基于拓扑结构调控策略构建纯碳氢多环芳烃类窄光谱新体系, 同时提出“氮氮共振”窄光谱分子设计新思路, 实现了材料结构的原创性突破与器件性能的关键提升。近五年以通信作者身份发表学术论文 30 余篇, 代表性成果发表于 Nat Sci Rev、J Am Chem Soc (6 篇)、Angew Chem Int Ed (17 篇) 等国际权威学术期刊。

有机发光二极管发光材料研究进展

理松涛, 宾正杨, 游劲松

(四川大学化学学院, 成都 610064)

摘要: 有机发光二极管 (Organic Light-Emitting Diodes, OLEDs) 作为主流的显示技术之一, 发光材料的持续创新是其产业化及商业化迭代的核心推动力。传统荧光材料、磷光材料、热活化延迟荧光材料的相继发展以及敏化荧光策略的提出, 不断突破激子利用率与器件效率的理论极限。近年来, 面对超高清显示技术的需求, 窄光谱材料成为了拓宽显示色域的关键。其中, 多重共振型材料因其窄光谱发射特性和优异器件效率成为最具潜力的材料体系。此外, 传统荧光材料因其优异的器件稳定性和敏化策略的发展, 是另一种有前景的窄光谱材料体系。本文以 OLEDs 发光材料的发展历程为脉络, 对三代发光材料和敏化策略的发光原理, 基本特点和代表性分子进行了系统化的总结和介绍。继而聚焦窄光谱材料这一前沿方向, 详细阐述多重共振效应和芳香性定域效应导向的窄光谱材料体系的设计原理, 进一步总结分析现有的 BT. 2020 窄光谱材料。最后, 对发光材料的未来发展方向进行了前瞻性展望。

关键词: 有机发光二极管; 发光材料; 窄光谱材料; BT. 2020

中图分类号: O649.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.260208

Recent advances in emitters for organic light-emitting diodes

LI Songtao, BIN Zhengyang, YOU Jingsong

(College of Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: Organic light-emitting diodes (OLEDs) have emerged as a pivotal technology for modern display

收稿日期: 2026-06-26 修回日期: 2026-08-03 接受日期: 2026-08-18

基金项目: 国家自然科学基金委青年科学基金项目(B类)(22522507); 国家自然科学基金委面上项目(22471183)

作者简介: 理松涛(1999—), 男, 博士研究生, 研究方向为窄光谱荧光材料的开发. E-mail: 15224970514@163.com

通信作者: 宾正杨. E-mail: binzhengyang@scu.edu.cn; 游劲松. E-mail: jsyou@scu.edu.cn

applications, and their commercialization and industrial upgrading are heavily reliant on the continuous innovation of high-performance emitters. The evolution of OLED emitters spanning from traditional fluorescence and phosphorescence to thermally activated delayed fluorescence and the recently developed sensitized fluorescence strategy, has broken the conventional theoretical bottlenecks of exciton utilization efficiency and comprehensively promoted the optoelectronic performance of OLED devices. Driven by the booming demand for ultra-high-definition displays, narrowband materials with wide color gamut have become a research hotspot. Among them, multiple-resonance systems have attracted extensive attention by virtue of their inherent narrow emission bandwidth and superior electroluminescence properties. Furthermore, traditional fluorescent materials have become another promising narrow-spectrum material system owing to their outstanding device stability and advances in sensitized fluorescence strategy. In this review, we take the developmental trajectory of OLED emitters as the central thread, systematically summarizing the luminescence mechanisms, fundamental characteristics, and representative molecules of traditional fluorescence, phosphorescence and thermally activated delayed fluorescence, along with the sensitized fluorescence strategy. Subsequently, we focus on the frontier of narrowband emitters, providing a detailed exposition of the design principles for narrowband material systems governed by the multiple-resonance effect and aromaticity localization effects, and systematically review current BT. 2020-compliant emitters. Finally, we conclude with a forward-looking perspective on the future evolution of OLED emitters.

Keywords: organic light-emitting diodes; emitters; narrowband materials; BT. 2020 standard

自 1987 年邓青云与 Van Slyke 首次研制出有机发光二极管 (Organic Light-Emitting Diodes, OLEDs) 以来, OLEDs 为显示领域带来了革命性突破,吸引了全球科研界的广泛关注,并成为最具竞争力的显示技术^[1]。与液晶显示器相比, OLEDs 显示器具备画质更清晰、对比度更高、响应速度更快、可视角度更宽、功耗更低、器件更轻薄,以及可柔性弯曲等诸多优势。目前, OLEDs 器件通常采用多层有机半导体薄膜堆叠结构,自下向上分别是阴极、电子传输层、空穴阻挡层、发光层、电子阻挡层、空穴传输层和阳极。在外加电场驱动下,空穴和电子分别从阳极和阴极流向空穴传输层和电子传输层,并在发光层复合成激子,通过辐射跃迁进行发光(图 1a)^[2-4]。其中,发光层是 OLEDs 器件的核心部分,一般由主体材料和发光材料组成,主体材料负责能量传递和分散发光材料,发光材料作为掺杂剂利用激子发光。因此,发光材料的性质对器件的光色、效率、工作寿命等性能起着决定性作用^[5]。

1 OLEDs 发光材料发展历程

区别于光致发光只产生单线态激子,根据量子统计规律,电致发光会产生 25% 的单线态激子和 75% 的三线态激子。由于三线态自旋禁阻,传统有机化合物只能利用 25% 的单线态激子辐射发

光,而 75% 的三线态激子无法辐射发光,只能通过非辐射途径耗散掉,这会严重影响器件的发光效率^[6]。因此,提高发光材料的激子利用率是提高器件发光效率的最直接和有效的方案。围绕此方案,一代又一代的发光材料被科研工作者们开发出来(图 1g)。目前,根据发光机理的不同, OLEDs 发光材料主要分为三代(图 1b~d)。

第一代发光材料是传统有机小分子荧光材料,如 9,10-二苯基蒽 Pan^[7]。这类材料发展成熟、结构多样、可修饰性强、成本低廉,且通常具有高的荧光量子产率和辐射跃迁速率。同时,由于其稳定的共价键,基于该类材料的器件通常具有优异的使用寿命。目前,传统荧光染料依然是商用 OLEDs 屏幕蓝光发光材料的首选。然而,该类材料只能利用 25% 的单线态激子,器件上最大内量子效率只有 25%,考虑光耦合取出效率,器件的最大外量子效率(Maximum External Quantum Efficiency, EQE_{max})只有 5% 左右。

为了进一步利用剩余的 75% 的三线态激子,研究者们将目光转向了具有三线态激子利用能力的金属配合物,并发展出了第二代 OLEDs 发光材料——磷光材料,即铂、铱等重金属配合物。1998 年, Baldo 等报道了八乙基卟啉配位的红光铂配合物 PtOEP,并在 OLEDs 器件上实现了 4% 的最大外量子效率^[8]。1999 年, Baldo 等再次报道了一种

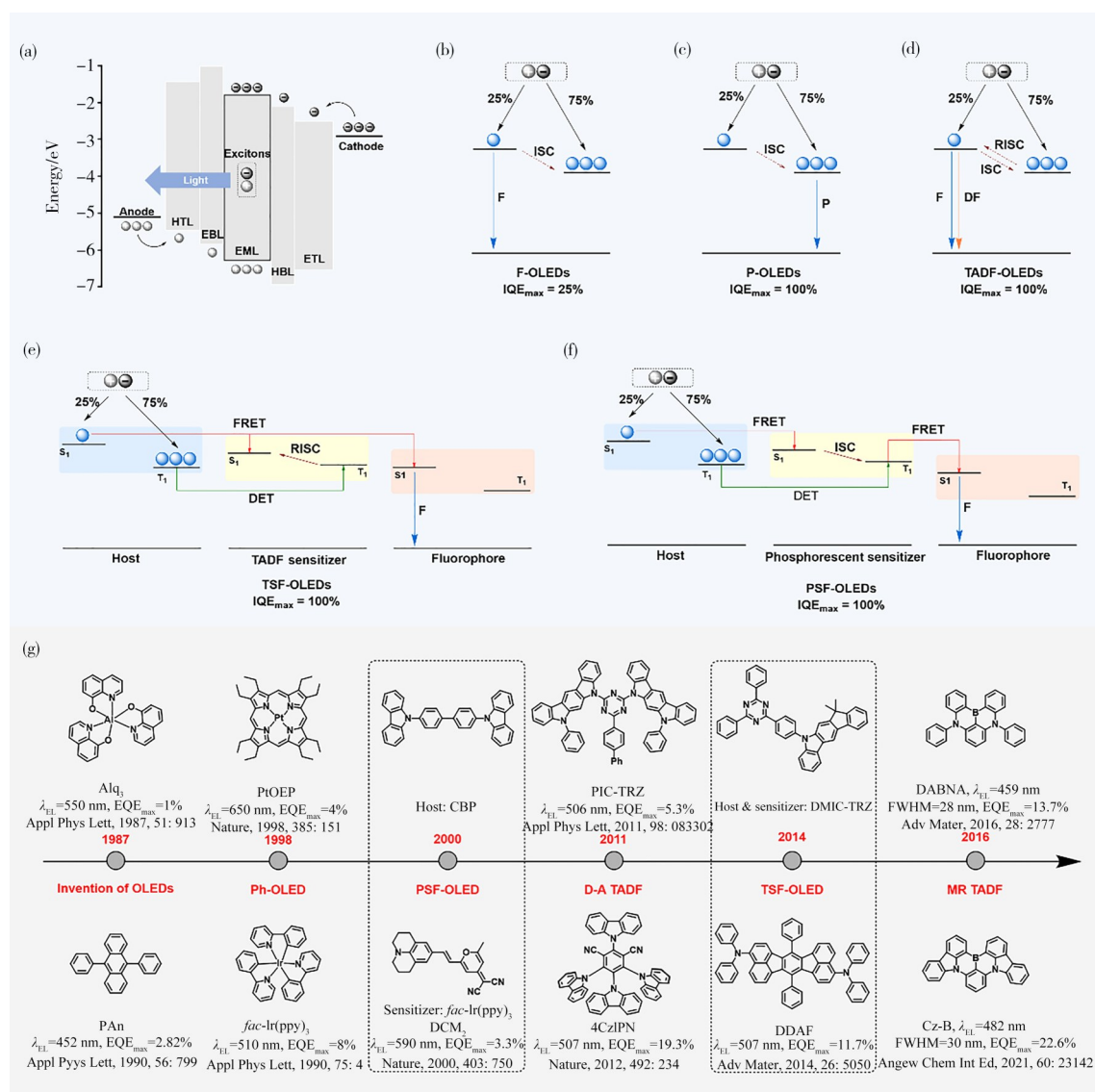


图1 OLEDs发光材料发光机制和发展历程

Fig. 1 The mechanism and development of OLED emitters

绿光铱配合物 fac-Ir(ppy)_3 在OLEDs器件上表现出8%的高效率,开启了磷光材料的研究热潮^[9]。目前,磷光材料在蓝绿红色域的器件效率均能达到30%以上,且绿光和红光磷光材料在商用OLEDs中保持着核心竞争力。从发光机制来看,磷光材料中重金属的重原子效应可增大分子自旋-轨道耦合,以减弱三线态禁阻,从而加快系间窜越过程和三线态激子辐射跃迁过程。在器件上,磷光材料可通过系间窜越过程收集三线态激子,并通过三线态激子辐射发光,在理论上能实现100%的激子利用率。然而,磷光材料仍存在着不少缺陷。磷光材料的三线态寿命通常较长,为微秒级,在器件高亮度下激子会严重积累而加剧三线态-三线态湮灭和三线态-极化子湮灭等激子淬灭过程的

发生,导致效率滚降明显。其次,铂、铱等贵金属的使用导致成本昂贵,且存在重金属污染的风险。更重要的是,对于金属配合物而言,配位键和金属共价键的键能较低,在高能的蓝光区材料易发生分子降解,这也使得蓝光的磷光OLEDs器件寿命短,至今依然难以满足商用需求^[10-11]。

因此,科研工作者再次将目光转移到纯有机小分子荧光染料上,希望找到能实现高激子利用率的材料体系。1961年,Parker和Hatchard等在伊红染料中发现了微弱的长寿命荧光,首次报道了热活化延迟荧光(Thermally Activated Delayed Fluorescence, TADF)现象^[12]。TADF分子通常具有极小的单线态-三线态能隙(ΔE_{ST}),在热激活下,三线态激子通过反系间窜越过程转移到单线态,

并辐射跃迁发出长寿命的延迟荧光。这为高激子利用率的有机荧光染料的设计提供了基本思路。2011年,通过量子力学分析,Adachi等发现分子的最高占据轨道(Highest Occupied Molecular Orbital, HOMO)和最低空轨道(Lowest Unoccupied Molecular Orbital, LUMO)重叠的减少,可以实现较小的 ΔE_{ST} 。通过这一理论,他们提出了一种TADF分子的设计策略,即构建具有空间扭曲构型的供体-受体(D-A)分子,实现前线轨道在分子上的高度分离。同时,他们以吡啶并[2,3-*a*]咔唑为供体,三嗪为受体,设计出首例D-A型TADF材料PIC-TRZ,具有极小的 ΔE_{ST} (0.11 eV),并在器件上实现了5.3%的最大外量子效率^[13]。2012年,Adachi等报道了D-A型TADF分子1,2,3,5-四(咔唑-9-基)-4,6-二氰基苯(4CzIPN),并在OLEDs器件上取得了19.3%的创纪录的效率,远远超过荧光材料的效率上限^[14]。此后,TADF材料作为第三代OLEDs发光材料发展迅速,成为了该领域科研工作者的研究重心。目前,TADF材料的OLEDs器件性能已经媲美磷光材料甚至超越磷光材料,成为最具前景的发光材料体系。但是,由于较长的延迟荧光寿命,TADF材料在器件上的效率滚降表现差强人意。同时,根据费米黄金法则,TADF材料的电荷转移特征使其难以同时具备高的辐射跃迁速率和反系间窜越速率,这也为材料设计带来了挑战^[15]。

基于传统荧光材料的固有优势和对有机化合物发光机制的深入研究,在发展磷光材料和TADF材料的同时,科研工作者也在不断探索突破传统荧光材料效率瓶颈的方法。2000年,Forrest等首次报道了磷光敏化荧光(Phosphor-sensitized Fluorescence, PSF)策略^[16]。作者通过在发光层中加入磷光材料 $fac\text{-Ir}(\text{ppy})_3$ 作为敏化剂,实现了荧光OLEDs器件效率的大幅提升。电致发光过程中,PSF策略的发光原理为:磷光材料首先接受主体传递来的单线态和三线态激子,随后通过快速的系间窜越过程将单线态激子转变为三线态激子,并通过Förster能量转移过程将三线态激子转移至荧光材料的单线态,最终由荧光材料辐射发光(图1f)。2014年,段炼团队和Adachi团队几乎同时报道了TADF敏化荧光(TADF-sensitized Fluorescence, TSF)策略^[17-18]。两个团队均通过该策略突破了荧光材料的器件效率上限,实现了10%以上的最大外量子效率。TSF策略的发光过

程为:首先,单线态和三线态激子在TADF主体或敏化剂上复合,随后,三线态激子通过快速的反系间窜越过程上转换至单线态,再通过Förster能量转移过程传递至荧光材料的单线态,最终由荧光材料辐射发光(图1e)。在敏化策略中,敏化剂负责收集激子并进行能量转移,荧光材料负责发光。这种功能拆分突破了传统荧光材料的效率瓶颈,在理论上实现了100%的激子利用率,使传统荧光材料焕发新的生机。同时,利用荧光材料高辐射跃迁速率的特点,也缓解了磷光材料和TADF材料因激子寿命长所引发的效率滚降等问题,一定程度上克服了TADF材料中辐射跃迁与上转换过程之间的固有矛盾,并提升了器件稳定性,为高性能OLEDs器件的开发提供了新途径^[19]。2022年,段炼团队在敏化策略基础上进一步提出了磷光辅助TADF敏化荧光策略(Phosphor-assisted TADF-sensitized Fluorescence, *p*TSF)^[20]。该策略以TADF材料作为发光层的主体,磷光材料作为敏化剂,荧光材料作为发光材料,实现了多通道激子利用过程,进一步提升荧光材料的器件性能。目前,该团队与维信诺联合研发的*p*TSF-OLEDs屏幕已实现初步的量产商用。

2 窄光谱材料研究进展

随着全球市场对超高清显示(Ultra-High Definition, UHD)需求的持续提升,除了效率,色纯度已成为衡量OLEDs器件性能的又一关键指标(图2a)。为推进超高清显示技术的标准化与产业化进程,国际电信联盟于2012年正式发布了新一代超高清显示标准——BT. 2020,在色彩表现方面设定了迄今最为严格的技术标杆^[21]。从CIE 1931色域图来看,相较于早期的BT. 709标准,BT. 2020标准所覆盖的色域范围扩大了约2倍,占整个可见色彩空间的75.8%,旨在实现更宽的色域和更高的色彩精度,全面提升视觉体验。对于蓝光材料,BT. 2020标准(0.131, 0.046)为467 nm单色光的色坐标,光谱的展宽需要发射波长蓝移,这会进一步增加激子的能量,使得器件设备的表现下降;对于绿光材料,(0.170, 0.797)为532 nm单色光的色坐标,光谱的展宽会使CIE_y值严重下降而偏离纯绿发光;对于红光材料,(0.708, 0.292)是630 nm单色光的色坐标,光谱的展宽需要发射波长红移,这会使得材料的能隙进一步降低,非辐射跃迁加剧,影响器件的性能。因此,为

实现 OLEDs 的高色纯度发光,需要尽可能地窄化电致发光光谱,即窄化发射半峰宽(Full-Width at Half-Maximum, FWHM)。目前,商用屏幕窄化光谱的方案主要是依靠彩色滤光片和顶发射器件的微腔效应,但难以避免器件效率的损耗,也会增加器件制造的成本。相对而言,开发具有本征窄光

谱特性的发光材料是更为理想的一种扩宽显示色域的方案。同时,窄光谱材料也能减少短波高能发光组分,降低激子热失活带来的材料劣化,提升器件寿命。因此,开发具有窄光谱和高效率的发光材料体系,是推动 OLEDs 实现超高清显示的核心研发思路^[22-23]。

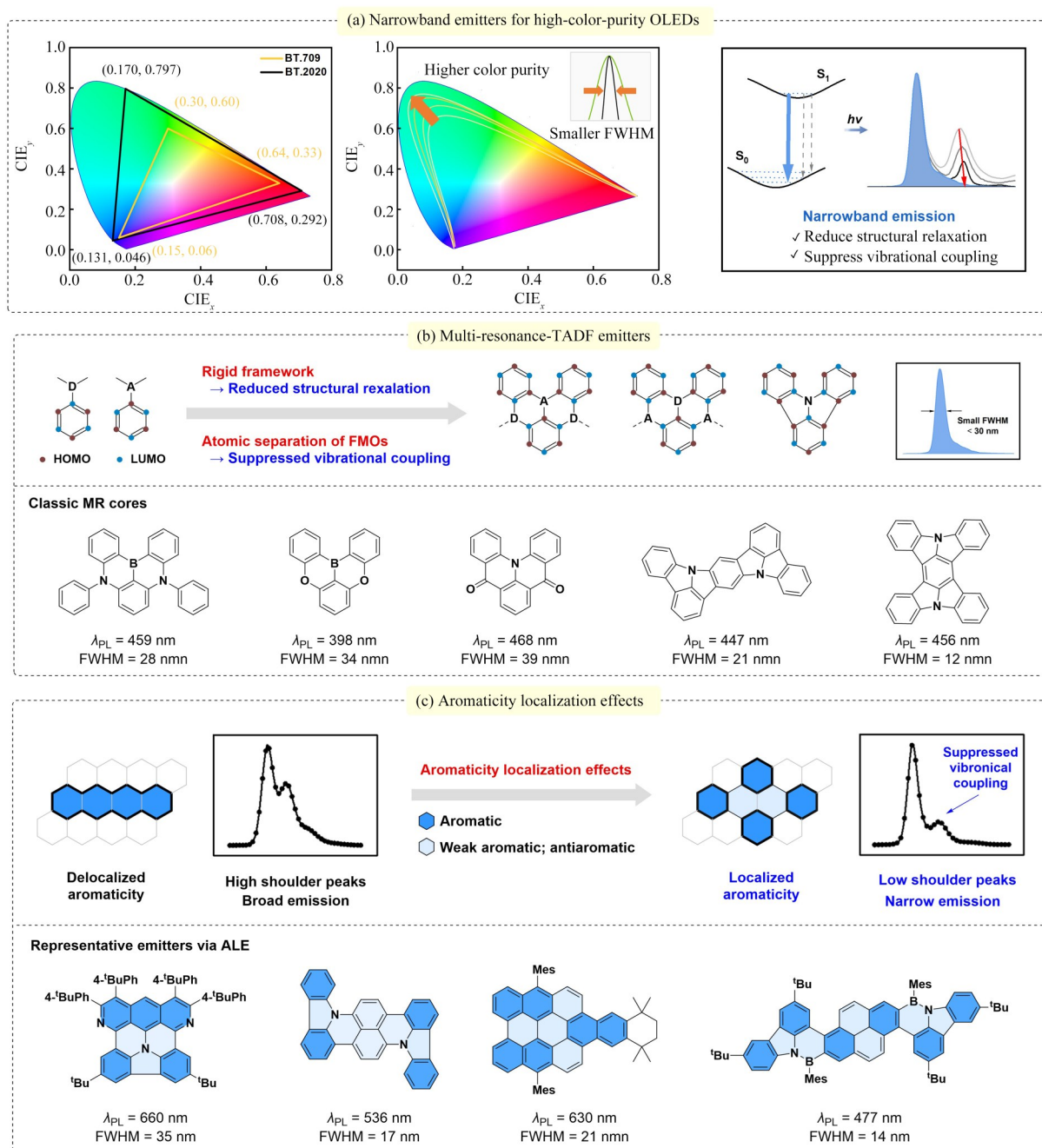


图 2 窄光谱材料及分子设计策略

Fig. 2 Design of narrowband emitters

从分子设计角度分析,增大分子骨架的刚性,减小激发态和基态之间的结构弛豫,可有效窄化发射光谱的全峰宽;定域电子和轨道分布,抑制激

发态和基态之间的高频振动耦合,可有效降低发射光谱的振动肩峰,实现较窄的发射半峰宽。目前,报道的窄光谱材料体系主要是多重共振

(Multi-Resonance, MR) 型 TADF 分子。MR-TADF 分子的基本结构如图 2b 所示,电性相反的原子在六元环中对位排列,由于两者表现出相反的电子和共振效应,分子的 HOMO 轨道定域在受体原子相邻碳上,LUMO 轨道定域在供体原子上相邻碳上,在无需引入供体和受体基团的情况下实现了前线轨道的分离。其中,刚性的分子骨架可有效减小结构弛豫,而前线轨道在原子上的定域和分离可充分抑制高频振动耦合。因此,该类分子在兼具 TADF 性质的同时,具有极窄的单峰发射^[24]。2016 年,Hatakeyama 等首次提出多重共振效应,报道了一类 1,4-硼氮嵌入的新型 TADF 分子 DABNA。基于 DABNA 的 OLEDs 器件实现了 13.7% 的最大外量子效率,器件上 FWHM 仅为 28 nm^[25]。此后十余年,硼氮类 MR 材料的研发成为了 OLEDs 发光材料最具吸引力的研究方向,在 OLEDs 器件上均取得了瞩目的成就,兼具高效率和高色纯度。同时,除了硼/氮类分子,硼/氧^[26]、氮/碳基^[27]、吡啶[3,2,1-*jk*]咔唑^[28]等多重共振型分子也被相继报道,均表现出窄光谱、高荧光量子产率和优异的器件性能^[29]。

除了多重共振材料,随着敏化策略的不断发展,传统荧光材料已能在器件上实现 20% 以上的外量子效率,重新回到了 OLEDs 发光材料的主流行列^[30-31]。传统荧光材料结构多样,具备商业验证的器件稳定性,且通常具有刚性的分子骨架和局域发光特性,有助于限制激发态的结构弛豫,具备窄光谱发光的潜力。然而,传统荧光体系的光谱窄化工程面临一个共性的科学难题。这些稠环骨架的前线轨道分布在整個共轭骨架的 π 键上,激发态往往伴随着较强的高频振动耦合,导致光谱中出现明显的肩峰,影响发光色纯度。近年来,仅有少数材料能实现窄光谱发光,且缺乏共性的设计策略指导多环芳烃分子的光谱窄化。2025 年,游劲松团队通过系统的理论计算和实验验证,提出了“芳香性定域效应(Aromaticity Localization Effects, ALE)”,揭示了多环芳烃发光光谱的肩峰强度和芳香性离域程度的正相关性,为理解分子的荧光光谱特性提供了新的理论视角(图 2c)^[32]。研究表明,具有窄光谱发射特性的材料,其芳香性往往呈现高度局域化的分布模式。其内在机制在于:局域化的芳香性分布能限制 π 电子的流动,从而抑制激发态下的高频振动耦合,降低光谱的振

动肩峰强度,实现窄光谱发射。近两年,游劲松等研究团队通过 ALE 发展了多种窄光谱材料,验证了该策略的科学性和可行性^[32-37]。未来,发展更多共性的窄光谱材料设计策略,是扩展窄光谱传统荧光材料体系的关键。

表 1 和图 3 分别是目前报道的符合 BT. 2020 色域的发光材料的性能参数和结构汇总。其中,蓝光材料器件 $CIE_y \leq 0.05$,绿光材料器件 $CIE_y \geq 0.75$,红光材料器件 $CIE_y \leq 0.30$ 。

经过多年的发展,MR-TADF 材料在 BT. 2020 色域方面已取得了较大的突破,报道的 BT. 2020 蓝绿光的材料均为 MR-TADF 分子。从表中数据可知,大多数蓝光和绿光 MR-TADF 材料的半峰宽均较窄(10~30 nm),最窄为 12 nm,蓝光发射波长集中在 440 nm 左右,绿光集中在 520 nm。大多数材料的光致发光量子产率(Photo-luminescence Quantum Yield, PLQY)高于 90%,器件效率较高,甚至能达到 40%,但滚降明显,少数绿光材料 1000 cd/m² 亮度下效率滚降表现优异,仅下降 10% 左右。蓝光材料最佳器件寿命,100 cd/m² 亮度下,亮度衰减至初始亮度 50% 所需要的时间 LT_{50} 为 418 h,这与商用要求($LT_{50} > 10\,000\text{ h}@1000\text{ cd/m}^2$)有着巨大的差距。绿光材料虽然表现更好,亮度衰减至初始亮度 80% 所需要的时间 $LT_{80} = 1187\text{ h}@1000\text{ cd/m}^2$,但与商业级 10 万小时以上的 LT_{50} 依然存在差距。红光材料方面,由于 MR 骨架在蓝光区,电荷转移特性弱,扩展到红光区难度较大,且会伴随着 TADF 性质的丢失和光谱的展宽,进一步扩展到 BT. 2020 所要求的大于 630 nm 发射波长的深红光区难度更大。目前,仅有一类骨架能实现 BT. 2020 发光,即对位硼 π 硼/氮 π 氮骨架(图 3 中红色标注的部分)。该类骨架的材料半峰宽为 30 nm 以上,在器件上会进一步展宽至 40 nm 以上。

相比于 MR-TADF 材料,目前,具有窄光谱特性的传统荧光材料较少,在蓝绿光区未有 BT. 2020 标准的窄光谱材料的报道,但在红光区初步展现出了其优势和结构多样性。近两年,BT. 2020 窄光谱传统红光材料相继报道,包括全碳氢多环芳烃(ALE 策略),氮杂多环芳烃(ALE 策略),BODIPY 骨架。这些材料展现出 20% 以上的器件效率,较 MR 材料更窄的光谱和更低的效率滚降。

表 1 BT. 2020 发光材料性能汇总

Tab. 1 Performance summary of BT. 2020-compliant emitters

Emitter	$\lambda_{\text{PL}}^{[\text{a}]}$ / nm	FWHM ^[a] / nm	PLQY ^[a] / %	EQE _{max/1000} /%	CIE _x , CIE _y	Device Lifetime	Reference
Blue emitters							
mDBIC	431	33	66.7	13.5/–	0.160, 0.050		Angew Chem Int Ed, 2022, 61: e202206916
CzBO	445	26	98	13.4/3.5	0.150, 0.050	LT ₅₀ =0.16 h @ 100 cd/m ²	Angew Chem Int Ed, 2022, 61: e202205684
MesB-DIDOBNA-N	399	23	33	16.2/–	0.170, 0.049		Adv Mater, 2023, 35: 2300997
Py-BN	440	14	93	15.8/3.9	0.153, 0.045		Angew Chem Int Ed, 2024, 63: e202408522
DPA-B4	458	14	99	39.2/28.7	0.141, 0.050	LT ₅₀ =418.0 h @ 100 cd/m ²	Nat Photon, 2024, 18: 1161
(M)-DB-S	444	23	95	29.3/12.2	0.148, 0.047	LT ₅₀ =16.1 h @ 100 cd/m ²	Adv Mater, 2024, 36: 2308314
[B-N]N2	438	16	93	20.3/–	0.152, 0.046	LT ₅₀ ≈16.0 h @ 500 cd/m ²	Adv Mater, 2024, 36: 2409706
5Cz-BO	410	29	82	22.8/–	0.162, 0.046	LT ₅₀ =3.6 h @ 100 cd/m ²	Adv Mater, 2024, 36: 2313602
3B-DPA	437	13	98	18.7/–	0.154, 0.031	LT ₅₀ =5.6 h @ 100 cd/m ²	Angew Chem Int Ed, 2025, 64: e202503320
tBO-4B	449	13	99	39.6/31.5	0.147, 0.043	LT ₅₀ =38.3 h @ 500 cd/m ²	Adv Mater, 2025, 37: 2500010
3BON	440	18	84	23.8/13.7	0.158, 0.040		Angew Chem Int Ed, 2025, 64: e202518651
BO-BTC	423	41	92	24.7/–	0.156, 0.038	LT ₅₀ =1.5 h @ 100 cd/m ²	Angew Chem Int Ed, 2025, 64: e202511921
BOCz-PO	447	18	95	19.6/–	0.152, 0.048	LT ₅₀ =0.9 h @ 100 cd/m ²	Angew Chem Int Ed, 2026, 65: e8746575
EnBOBO	445	19	91	33.0/–	0.146, 0.046		J Am Chem Soc, 2026, 148: 8163
TBNO-2	447	15	98	40.4/21.1	0.145, 0.044		Adv Mater, 2026, 38: e17512
BN-M3	451	22	100	34.8/14.5	0.148, 0.045	LT ₅₀ =40.7 h @ 100 cd/m ²	Adv Mater, 2026, 38: e14617
Green emitters							
tCzphB-Ph	524	21	98	29.3/–	0.21, 0.75		Nat Commun, 2022, 13: 4876
ω'-DABNA-D	513	19	99	34.6/30.7	0.16, 0.75	LT ₈₀ =321 h @ 1000 cd/m ²	Angew Chem Int Ed, 2025, 64: e202512162
DBNDS-DFPh	518	16.6	97.7	34.5/–	0.17, 0.76	LT ₅₀ <1 h @ 5000 cd/m ²	Adv Mater, 2025, 37: 2416224
DBNDO-3	518	16.2	95	32.0/12.8	0.18, 0.75	LT ₅₀ =0.53 h @ 1000 cd/m ²	Angew Chem Int Ed, 2025, 64: e202515889
DBF-v-DABNA	517	16	97	25.8/16.8	0.18, 0.75	LT ₅₀ =15 h @ 5000 cd/m ²	Adv Mater, 2026, 38: e18330
m-DBFSi-d	515	14	99	41.9/26.3	0.14, 0.76	LT ₅₀ =450 h @ 1000 cd/m ²	Adv Mater, 2026, 38: e72684
ω-DABNA-4TBP	519	23	94	34.7/32.6	0.20, 0.75	LT ₉₅ =28 h @ 1000 cd/m ²	Adv Sci, 2026, 13: e22814
DBFCN	519	12	97	38.5/21.2	0.18, 0.75	LT ₈₀ =1187 h @ 1000 cd/m ²	Adv Mater, 2026, DOI: 10.1002/adma.74082
Red emitters							
BNNO	637	32	95	34.4/31.4	0.708, 0.292	LT ₉₅ =605 h @ 5000 cd/m ²	Adv Mater, 2023, 35: 2301018
RBNO2	645	39	98	26.6/16.1	0.708, 0.292	LT ₉₅ =124 h @ 1000 cd/m ²	Mater Horiz, 2023, 10: 3712

(续表 1)

Emitter	$\lambda_{\text{PL}}^{[\text{a}]}$ / nm	FWHM ^[a] / nm	PLQY ^[a] / %	EQE _{max/1000} /%	CIE _x , CIE _y	Device Lifetime	Reference
IDIBNO	663	39	89	27. 2/21. 1	0. 702, 0. 297		Sci Adv, 2023, 9: eadh8296
II-b	660	35	66	22. 6/21. 5	0. 710, 0. 290	$L_{T_{85}}=124. 3 \text{ h}@$ 1000 cd/m ²	J Am Chem Soc, 2025, 147: 19305
7	630	21	76	24. 2/20. 0	0. 704, 0. 294		Natl Sci Rev, 2026, 13: nwag219
BDP1P	644	23	84	15. 6/15. 5	0. 708, 0. 292		Adv Funct Mater, 2026, 36: e29876

注：白底表格为MR-TADF 材料,灰底表格为传统荧光材料；[a]代表甲苯溶液中测试。
Note: MR-TADF emitters and traditional fluorescent emitters were shown in white and gray background, respectively; [a] In toluene solution.

总的来说,MR-TADF 材料是蓝绿光窄光谱体系的主力。MR-TADF 材料通常具有高的 PLQY 和优异的器件效率表现,少数材料具有较小的效率滚降,但器件稳定性较差。目前,科研工作者采用分子氘代,敏化器件和叠层器件等多种策略,不断地改善 MR-TADF 材料的器件寿命。相较于 MR-TADF 材料,传统荧光材料在器件上具备更优的效率滚降和工作稳定性,仍是商用 OLEDs 蓝光材料的最佳选择。但是,窄光谱的传统荧光材料的例子较少,亟需快速发展更多的窄光谱传统荧光分子,以筛选出兼具高效率、高色纯度和高器件稳定性的材料。

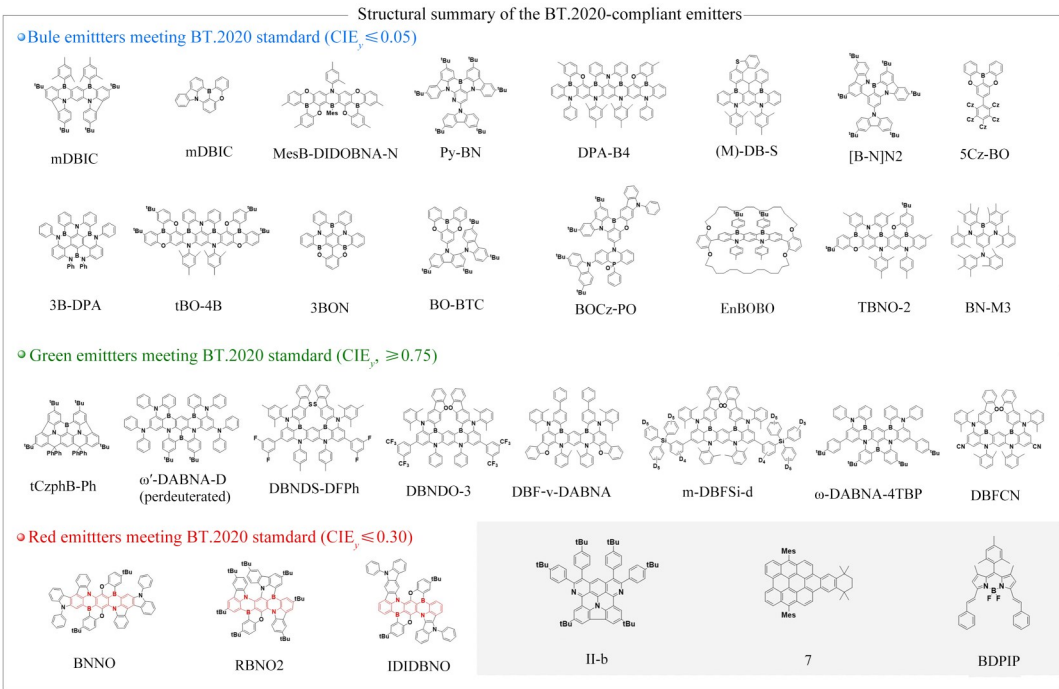


图 3 BT. 2020 发光材料结构汇总
Fig. 3 Structural summary of BT. 2020-compliant emitters

表 2 MR-TADF 材料和传统荧光材料的特点总结

Tab. 2 Summary of the characteristics of MR-TADF and traditional fluorescent materials

Category	MR-TADF	Traditional fluorescent materials
FWHM	Narrow	Narrow for minority
Color purity	Better for blue and green;lack of red	Better for red;lack of blue and green
Device efficiency	Over 30% for majority	Over 20% for majority
Efficiency roll-off	Small for minority	Small for majority
Device stability	Limited, commercially challenging	Excellent, commercially viable
Future prospects	To improve the device stability	To narrow spectral width

3 总结与展望

近40年来,发光材料的研发一直是推动OLEDs显示技术发展和商用的核心驱动力。一方面,为实现高激子利用率和器件效率,磷光材料、TADF材料以及敏化荧光策略相继被开发,不断突破器件效率极限;另一方面,为满足UHD-OLEDs的需求,窄光谱材料的研发成为提升显示色域的突破口,备受行业的关注。多重共振型材料作为当前主流窄光谱体系,在效率、色纯度等关键性能指标上展现出独特优势,已取得重要研究突破。然而受限于长波光色扩展、器件稳定性等问题,该类材料仍处于实验室研究走向商用化应用的过渡期。而经商用验证的传统荧光材料,亟需发展窄光谱分子体系。其中,“芳香性定域效应”为传统荧光材料的光谱窄化提供了科学性的设计理念,并取得了初步的研究突破。进一步地,对现有BT. 2020发光材料汇总分析,材料的器件效率表现优异,但器件稳定性欠佳。

目前,OLEDs显示产业的竞争核心已从面板制造延伸至材料研发。未来,发光材料的研发将锚定在以下几个维度:1)兼具高效率 and 低滚降。相比于实验室条件所测得的最大器件效率,更具实用性的是几百到上千尼特亮度范围的器件表现。2)色纯度是关键性能指标。进一步发展新的窄光谱材料和材料体系,提升器件覆盖色域,达到甚至超越BT. 2020标准,是未来显示画质升级迭代的主攻方向。3)长器件使用寿命是商业化应用的根本保障。当前,绝大多数已报道的窄光谱材料在器件稳定性方面仍显不足,制约了实验室研究到产业化应用的进程。在发光材料体系中,多重共振材料依然是研发“主阵地”,提升器件稳定性是重中之重。传统荧光材料具有低滚降和高稳定性等优势,同样具有发展前景,扩展其材料体系是关键。总的来说,开发兼具高效率、低滚降、高色纯度与长寿命的发光材料体系,是推动OLEDs显示技术迈向超高清商用化及下一代显示应用的关键所在。

参考文献:

- [1] Tang C W, VanSlyke S A. Organic electroluminescent diodes [J]. Appl Phys Lett, 1987, 51(12): 913-915.
- [2] Chen H W, Lee J H, Lin B Y, *et al.* Liquid crystal display and organic light-emitting diode display: present status and future perspectives [J]. Light Sci Appl, 2018, 7: 17168.
- [3] Huang Y, 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: 105.
- [4] Zhang D D, Huang T Y, Duan L. Emerging self-emissive technologies for flexible displays [J]. Adv Mater, 2020, 32(15): 1902391.
- [5] Hong G, Gan X M, Leonhardt C, *et al.* A brief history of OLEDs—emitter development and industry milestones [J]. Adv Mater, 2021, 33: 2005630.
- [6] Köhler A, Bässler H. Triplet states in organic semiconductors [J]. Mater Sci Eng R, 2009, 66(4/5/6): 71-109.
- [7] Adachi C, Tsutsui T, Saito S. Blue light-emitting organic electroluminescent devices [J]. Appl Phys Lett, 1990, 56(9): 799-801.
- [8] Baldo M A, O'Brien D F, You Y, *et al.* Highly efficient phosphorescent emission from organic electroluminescent devices [J]. Nature, 1998, 395: 151-154.
- [9] Baldo M A, Lamansky S, Burrows P E, *et al.* Very high-efficiency green organic light-emitting devices based on electrophosphorescence [J]. Appl Phys Lett, 1999, 75: 4-6.
- [10] Scholz S, Kondakov D, Lüssem B, *et al.* Degradation mechanisms and reactions in organic light-emitting devices [J]. Chem Rev, 2015, 115(16): 8449-8503.
- [11] Jacquemin D, Escudero D. The short device lifetimes of blue PhOLEDs: Insights into the photostability of blue Ir(III) complexes [J]. Chem Sci, 2017, 8(11): 7844-7850.
- [12] Parker C A, Hatchard C G. Triplet-singlet emission in fluid solutions. Phosphorescence of eosin [J]. Trans Faraday Soc, 1961, 57: 1894-1904.
- [13] Endo A, Sato K, Yoshimura K, *et al.* Efficient up-conversion of triplet excitons into a singlet state and its application for organic light emitting diodes [J]. Appl Phys Lett, 2011, 98(8): 083302.
- [14] Uoyama H, Goushi K, Shizu K, *et al.* Highly efficient organic light-emitting diodes from delayed fluorescence [J]. Nature, 2012, 492: 234-238.
- [15] Yersin H. Highly efficient OLEDs: Materials based on thermally activated delayed fluorescence [M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.

- KGaA, 2019.
- [16] Baldo M A, Thompson M E, Forrest S R. High-efficiency fluorescent organic light-emitting devices using a phosphorescent sensitizer [J]. *Nature*, 2000, 403(6771): 750-753.
- [17] 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.
- [18] Nakanotani H, Higuchi T, Furukawa T, *et al.* High-efficiency organic light-emitting diodes with fluorescent emitters [J]. *Nat Commun*, 2014, 5: 4016.
- [19] Byeon S Y, Lee D R, Yook K S, *et al.* Recent progress of singlet-exciton-harvesting fluorescent organic light-emitting diodes by energy transfer processes [J]. *Adv Mater*, 2019, 31(34): 1803714.
- [20] Yin C, Zhang Y, Huang T, *et al.* Highly efficient and nearly roll-off-free electrofluorescent devices via multiple sensitizations [J]. *Sci Adv*, 2022, 8(30): eabp9203.
- [21] Soneira R M. Display color gamuts: NTSC to Rec. 2020 [J]. *Inf Disp*, 2016, 32(4): 26-31.
- [22] Fan X C, Hao X Y, Huang F, *et al.* RGB thermally activated delayed fluorescence emitters for organic light-emitting diodes toward realizing the BT. 2020 standard [J]. *Adv Sci*, 2023, 10(28): 2303504.
- [23] Kang J, Shin D J, Lee J Y. Recent advances in narrow emission bandwidth materials for application in organic light-emitting diodes [J]. *Adv Opt Mater*, 2025, 13(8): 2402653.
- [24] Raju T D, Tirupati M, Kim N, *et al.* Next-generation blue OLED emitters: efficiency, color purity, and the road to BT. 2020 [J]. *Mater Horiz*, 2026, 13(10): 4839-4862.
- [25] Hatakeyama T, Shiren K, Nakajima K, *et al.* Ultra-pure blue thermally activated delayed fluorescence molecules: Efficient HOMO-LUMO separation by the multiple resonance effect [J]. *Adv Mater*, 2016, 28(14): 2777-2781.
- [26] Hirai H, Nakajima K, Nakatsuka S, *et al.* One-step borylation of 1,3-diaryloxybenzenes towards efficient materials for organic light-emitting diodes [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2015, 54(46): 13581-13585.
- [27] Yuan Y, Tang X, Du X Y, *et al.* The design of fused amine/carbonyl system for efficient thermally activated delayed fluorescence: Novel multiple resonance core and electron acceptor [J]. *Adv Opt Mater*, 2019, 7(7): 1801536.
- [28] Patil V V, Hong W P, Lee J Y. Indolocarbazole derivatives for highly efficient organic light-emitting diodes [J]. *Adv Energy Mater*, 2025, 15(2): 2400258.
- [29] 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.
- [30] Wu Y M, Liu X Y, Liu J J, *et al.* Nitrogen effects endowed by doping electron-withdrawing nitrogen atoms into polycyclic aromatic hydrocarbon fluorescence emitters [J]. *J Am Chem Soc*, 2024, 146(23): 15977-15985.
- [31] Yang G, Liu J J, Yang Y D, *et al.* Unveiling the centrosymmetric effect in the design of narrowband fluorescent emitters: from single to double difluoroboron cores [J]. *J Am Chem Soc*, 2025, 147(1): 1251-1261.
- [32] Wu Y M, Liu J J, Yang G, *et al.* Aromaticity localization effects in polycyclic aromatic hydrocarbons for discovering narrowband fluorescence materials [J]. *J Am Chem Soc*, 2025, 147(22): 19305-19314.
- [33] Wu Y M, Zhai S Q, Deng Y Y, *et al.* Engineering localized aromaticity in amine-embedded polycyclic aromatic hydrocarbons for narrowband fluorescence emitter [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2025, 64(46): e202518763.
- [34] Li J, Li P X, Wang Y, *et al.* π -Electron reorganization in polycyclic aromatic hydrocarbons toward BT. 2020-compliant narrowband red emitters [J]. *Natl Sci Rev*, 2026, 13(10): nwag219.
- [35] Liu X Y, Deng Y Y, Wang X L, *et al.* Wide-range color-tunable narrowband fluorescence emitters based on 1,2-BN-embedded polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2026, 65(21): e2671652.
- [36] Liu M Y, Li C L, Zhou J P, *et al.* Harnessing antiaromatic perturbation in multiple-resonance TADF emitter for simultaneous bathochromic shift and spectral narrowing [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2026, 65(23): e3901040.
- [37] Gan X Q, Zhu S B, Qi Y D, *et al.* Aromaticity-localized square tetraboron-extended multiple-resonance emitters with B-N covalent bonds for highly efficient narrowband electroluminescence [J]. *Adv Mater*, 2026, 38(46): e73979.

(责任编辑: 于白茹)