



发光学报

CHINESE JOURNAL OF LUMINESCENCE



中文核心期刊

主管：中国科学院

主办：中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

中国物理学会发光分会

主编：申德振

D- π -A- π -D型小分子红光材料的制备及其性能

贾钧森, 王飞, 赵波, 杨晶晶, 余春燕, 孙静, 王华, 许并社

引用本文:

贾钧森, 王飞, 赵波, 等. D- π -A- π -D型小分子红光材料的制备及其性能[J]. 发光学报, 2020, 41(1): 9-15.

JIA Jun-sen, WANG Fei, ZHAO Bo, et al. Design, Synthesis and Properties of D- π -A- π -D Type Organic Red Light Luminogens[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(1): 9-15.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/fgxb20204101.0009>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高激子利用率的蓝光荧光材料及其激发态性质

Photophysical and Excited State Properties of Blue Fluorescent Material with High Exciton Utilizing Efficiency

发光学报. 2018, 39(12): 1659-1668 <https://doi.org/10.3788/fgxb20183912.1659>

基于扭曲A- π -D- π -A构型的蓝色荧光材料的 π -共轭桥与光物理特性间的关系

Relationship Between π -conjugated Bridge and Photophysical Properties of Blue Light-emitting Fluorescent Materials with Twisting A- π -D- π -A Configuration

发光学报. 2019, 40(11): 1334-1347 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194011.1334>

吩噻嗪功能化的螺-9,9'-氧杂蒽衍生的设计、合成及其光电性质与分子结构间的相互关系研究

Design and Synthesis of Phenothiazine Function-alized Spiro [fluorene-9,9' -xanthene] for Understanding Structure-property Relationships in Photoelectrical Properties

发光学报. 2019, 40(1): 45-51 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194001.0045>

双氰基荧光染料的合成、光学性质及其生物成像

Synthesis, Optical Properties and Biological Imaging of A New Two-photon Fluorescence Dye with Dicyano-group

发光学报. 2017, 38(12): 1575-1581 <https://doi.org/10.3788/fgxb20173812.1575>

ZnNb_{2-x}Ta_xO₆(x=0~2.0)材料电子结构与光学性质的第一性原理计算

First Principle Calculation of Electronic Structure and Optical Properties of ZnNb_{2-x}Ta_xO₆ (x=0-2.0)

发光学报. 2020, 41(1): 38-47 <https://doi.org/10.3788/fgxb20204101.0038>

文章编号: 1000-7032(2020)01-0009-07

D- π -A- π -D 型小分子红光材料的制备及其性能

贾钧森^{1,2}, 王 飞³, 赵 波¹, 杨晶晶¹, 余春燕², 孙 静^{1*}, 王 华¹, 许并社¹

(1. 太原理工大学 新材料界面科学与工程教育部重点实验室, 山西 太原 030024;

2. 太原理工大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024;

3. 南京邮电大学 有机电子与信息显示国家重点实验室培育基地信息材料与纳米技术研究院, 江苏 南京 210023)

摘要: 开发新型有机红光材料对于制备高性能红光有机电致发光器件具有重要的研究意义。本文采用 SUZUKI 偶联反应, 以茚酮为受体(A)、3,4,5-三甲氧基苯为给体(D)合成了新型 D- π -A- π -D 结构的有机红光材料(3MeFO)。通过¹H NMR 谱、¹³C NMR 谱和 X 单晶衍射确认了分子结构, 该化合物展示了较强的电荷转移作用和良好的共轭结构, 其晶体的发射峰达到 620 nm。从单晶结构中看出甲氧基的引入有利于在分子间形成大量的氢键, 有效地增强了分子间的相互作用。同时, 该材料表现出良好的热稳定性和电化学性能, 使得其在 OLED 中展示了良好的电致发光性能。

关 键 词: 有机红光材料; D- π -A- π -D 结构; 分子聚集态; OLED

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3788/fjxb20204101.0009

Design, Synthesis and Properties of D- π -A- π -D Type Organic Red Light Luminogens

JIA Jun-sen^{1,2}, WANG Fei³, ZHAO Bo¹, YANG Jing-jing¹, YU Chun-yan²,
SUN Jing^{1*}, WANG Hua¹, XU Bing-she¹

(1. Key Laboratory of Interface Science and Engineering in Advanced Materials, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

3. Key Laboratory for Organic Electronics and Information Displays & Institute of Advanced Materials(IAM), Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing 210023, China)

* Corresponding Author, E-mail: sunjing@tyut.edu.cn

Abstract: To develop a novel red light luminescent material was important to prepare the high-efficiency organic light emitting devices. In this paper, a new kind of D- π -A- π -D red light luminogen utilizing fluorenone as acceptor and 3,4,5-trimethoxybenzene as donor was designed and synthesized, named 3MeFO. Its structure was confirmed by the ¹H NMR spectra, ¹³C NMR spectra and X-ray single crystal diffraction. The compound had strong charge transfer and π -conjugated structure that contributed to the red shift and the PL peak of crystal was located at 620 nm. From the single crystal analysis, the introduction of methoxy groups had increased the intermolecular interaction owing to the formation of the hydrogen bond. Meanwhile, the compound exhibited excellent thermal stability properties, electrochemical performance that were benefit to prepare the OLED with the considerable electroluminescent properties.

收稿日期: 2019-08-06; 修订日期: 2019-09-10

基金项目: 山西省高等学校科技创新项目; 国家自然科学基金(61904120); 山西省自然科学基金(201901D211090, 201801D221124, 201801D121101)资助项目

Supported by Science and Technology Innovation Project of Colleges and Universities in Shanxi Province; National Natural Science Foundation of China(61904120); Shanxi Natural Science Foundation Project(201901D211090, 201801D221124, 201801D121101)

Key words: organic red light luminogens; D- π -A- π -D; molecular aggregation; OLED

1 引 言

有机电致发光器件(Organic light emitting device, OLED)由于其价格低廉、轻薄美观、柔性、宽视角等特点吸引了广大科研工作者的关注,因此对于在 OLED 中能够实现高效发光的有机发光层材料的研究屡见报道^[1-2],但是开发新型高效有机电致发光材料,尤其是高性能红光有机电致发光材料却是一个巨大的挑战^[3-4]。红光有机发光材料是三基色的重要组成部分,在白光 OLED 和全彩显示中具有不可替代的作用,然而红光有机电致发光材料的发光颜色和发光效率等性能还有待进一步提高^[5-7]。研究发现,红光材料的带隙较窄,激子容易发生非辐射跃迁,导致制备红光材料的难度较大^[8]。目前,红光材料一方面可以利用大的 π -共轭结构来实现发光峰的红移,但是该方法在分子聚集状态下容易形成较强的 π - π 堆积引起激子的浓度猝灭,降低材料的发光效率^[9]。另一方面也可以通过提高发光材料的分子偶极矩来促进材料的发光峰红移,研究发现利用给体(D)和受体(A)间的推拉电子作用可以有效提高分子的偶极矩,获得较大的斯托克斯位移,不仅可以得到红光发射,而且也避免了材料的自吸收现象,获得较高的发光效率^[10]。近年来,通过合理的给受体结构的设计获得了一批性能优良的红光有机电致发光材料,例如采用 D-A、D- π -A、A- π -D- π -A 等结构,可以有效调节给受体间的推拉电子作用,进而调控分子的轨道能级,使其获得较小分子能隙实现红光发射。同时,该类分子在激发状态下电荷产生分离,给受体间的电荷转移作用也增强,从而提高了分子的偶极矩。因此,

该方法被广泛地应用于高性能红光以及近红外材料的设计与合成^[11-13]。

本文选用具有吸电子能力的茚酮和给电子能力的 3,4,5-三甲氧基苯构建了结构为 D- π -A- π -D 型的红光材料 3MeFO。该分子中选用的茚酮和苯环为共轭结构,分子一方面可以通过电荷转移态增大斯托克斯位移,另一方面分子本身的共轭也会促使发光峰红移^[14-15]。基于此,本文对分子结构与材料性能的关系进行了分析,该材料展示了良好的发光性能,单晶结构说明分子在聚集态结构中存在大量的分子间的氢键相互作用。同时该化合物展示了良好的热稳定性和电化学性能,可以用于制备红光 OLED。

2 实 验

2.1 合成方法

在氮气氛围下,取 2,7-二溴茚酮(507 mg, 1.5 mmol)和 3,4,5-三甲氧基苯硼酸(636 mg, 3 mmol)加入到装有 25 mL 甲苯的两口烧瓶中,室温下搅拌 15 min。继续加入催化剂四(三苯基膦)钯(104 mg, 0.09 mmol)和 K_2CO_3 水溶液(1.38 g, 5 mL),缓慢升温至 90 $^{\circ}C$,并通过点板监控反应。停止反应后,将反应液进行水洗、萃取、干燥以及柱层析,最终得到橙红色固体粉末。产率为 62%。熔点:183 $^{\circ}C$ 。 1H NMR (600 MHz, $CDCl_3$): δ (10^{-6}) = 7.89 (s, 2H), 7.71 (dd, J_1 = 7.8 Hz, J_2 = 1.8 Hz, 2H), 7.60 (d, J = 7.2 Hz, 2H), 6.82 (s, 4H), 3.96 (s, 12H), 3.91 (s, 6H)。 ^{13}C NMR (600 MHz, $CDCl_3$): δ (10^{-6}) = 196.6, 156.6, 145.9, 145.2, 141.4, 138.5, 138.1, 136.1, 125.9, 123.6, 107.3, 63.8, 59.3。

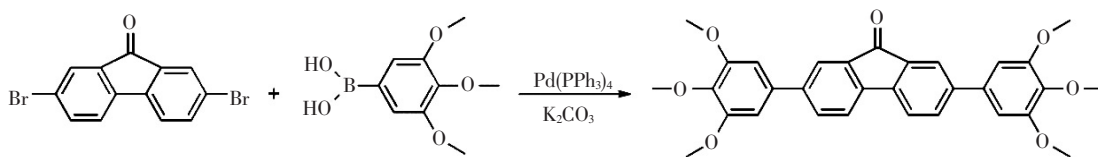


图 1 化合物 3MeFO 的合成路线

Fig. 1 Synthesis route of compound 3MeFO

2.2 测试方法

核磁共振氢谱(1H NMR spectra)和碳谱(^{13}C NMR spectra)采用 Bruker 公司型号为 DR $\times$ 600

型的核磁共振谱仪测试。紫外吸收光谱采用 Hitachi 公司型号为 U-3900 的紫外分光光度计测量。荧光光谱采用 Horiba 公司型号为 Fluoromax-4

荧光光谱仪获得。荧光寿命采用 Edinburgh 公司型号为 FLS980 的瞬态光谱仪测得。单晶数据测试采用 Bruker 公司型号为 Smart Apex-CCD 的单晶衍射仪。热失重测试(TGA)利用 Netzsch 公司型号为 TG 209 的热重/差热联用仪。差示扫描量热法(DSC)使用 Netzsch 公司(德国)型号为 DSC 204 差示扫描量热仪。电化学采用型号 CHI 660E 的电化学分析仪测量。

3 结果与讨论

3.1 模拟计算

根据 TD-DFT 理论,利用 B3LYP/6-311G* 方法对 3MeFO 进行了模拟计算,其分子结构和前线分子轨道分布如图 2 所示。从图中可以看出,该分子中的给体和受体不是共平面结构,而是存在一定的扭转角度。其 HOMO 能级主要分布于茚酮和 3,4,5-三甲氧基苯的苯环上,在甲氧基上只有少量分布;而其 LUMO 能级主要分布于茚酮上。HOMO

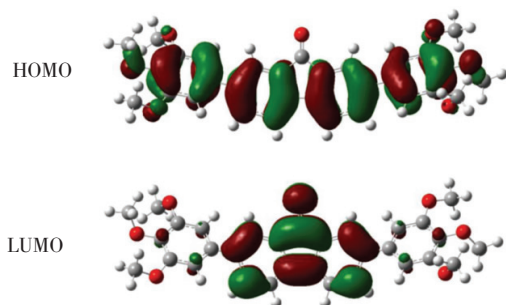


图 2 化合物 3MeFO 的 HOMO 和 LUMO 能级分布图

Fig. 2 HOMO and LUMO spatial distributions of compound 3MeFO

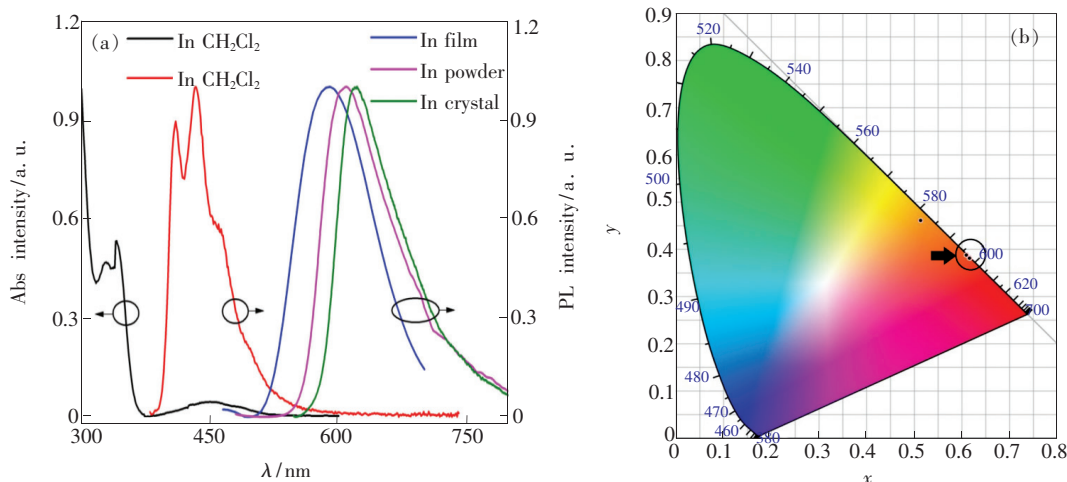


图 3 (a)化合物 3MeFO 在不同状态下的 UV-Vis 吸收谱和 PL 谱;(b)薄膜、粉末和晶体的色坐标图。

Fig. 3 (a)UV-Vis absorption spectrum and PL spectra of 3MeFO in different states. (b)CIE coordinates of compound 3MeFO in the film, powder and crystal.

和 LUMO 能级在茚酮的苯环上有重叠,导致 3MeFO 可以同时存在局域态和电荷转移态的发射。

3.2 发光性能

为了研究化合物的发光性能,我们测试了 3MeFO 在二氯甲烷中的 UV-Vis 吸收光谱和 PL 光谱,溶液浓度为 10^{-5} mol/L(图 3(a)),具体数据见表 1。从吸收光谱中可以看出,位于 329,341 nm 的吸收带归属于 3MeFO 本身的 $n-\pi^*$ 跃迁,而位于 450 nm 的吸收带则属于由给体(3,4,5-三甲氧基苯)到受体(茚酮)的电荷转移 $\pi-\pi^*$ 跃迁^[16]。其在二氯甲烷中的 PL 光谱中,位于 410, 433,459 nm 的发射峰为 3MeFO 的局域态发光,不存在电荷转移态的发光峰,这主要是由于材料在溶液中受溶剂极性作用,影响了电荷转移的过程^[17]。同时我们研究了 3MeFO 在薄膜、粉末和晶体状态下的 PL 光谱,其发射峰分别位于 588, 609,620 nm,为电荷转移态的发光,这是由于在固体状态下,分子的紧密堆积增强了分子内和分子间的相互作用,从而使得电荷转移作用增强。薄膜、粉末和晶体三种不同状态的 PL 发射峰依次红移,这主要是由于这三种状态中分子堆积紧密程度不同,其分子内和分子间的相互作用逐渐增强而引起发射峰的红移。在薄膜、粉末和晶体中的色坐标如图 3(b)所示,分别为(0.514,0.462)、(0.616,0.382)和(0.610,0.388),从中可以看出粉末和晶体接近于纯红光发射。从粉末和晶体的瞬态 PL 光谱(图 4)可以看出,两条衰减曲线均为单指数拟合曲线,寿命分别为 4.42 ns 和 4.45 ns。

表 1 化合物 3MeFO 的性能数据
Tab. 1 Properties of compound 3MeFO

$\lambda_{\text{abs}}/\text{nm}$	$\lambda_{\text{PL}}/\text{nm}$				$T_{\text{d}}/^\circ\text{C}$	$T_{\text{g}}/^\circ\text{C}$	HOMO/ eV	LUMO/ eV	E_{g}/eV
	Solution	Film	Powder	Crystal					
329/341/450	410/433/459	588	609	620	354	77	− 5.67	− 3.29	2.38

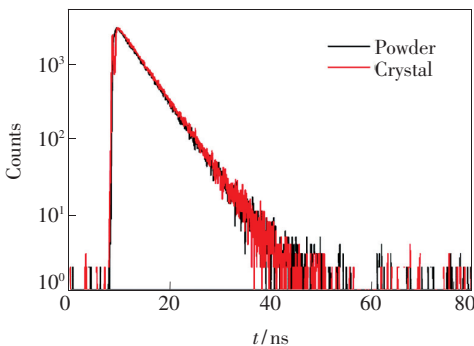


图 4 化合物 3MeFO 的瞬态 PL 光谱
Fig. 4 Transient PL delay spectra of compound 3MeFO

3.3 晶体结构

在四氢呋喃和正己烷(体积比 = 1:1)的溶液中生长出红色片状晶体。通过 X-ray 单晶衍射数据看出,该材料属于单斜晶体 $P21/c$ 空间群,具体晶体数据如表 2 所示。从化合物晶体的堆积结构(图 5)中可以看出,该化合物中引入的多个甲基基团,其中的氧原子与甲基可以形成一定的扭

转,进而有利于氧原子与氢原子的相互作用形成 C—H $\cdots$ O 氢键。图 5(a) 中的 C—O $\cdots$ H—C 氢键距离分别为 0.271 4,0.261 5,0.248 8,0.268 2,0.269 0,0.270 3,0.268 5,0.254 5,0.257 6 nm,图 5(b) 中的 C—O $\cdots$ H—C 氢键距离分别为 0.248 8,0.261 5,0.282 8,0.262 8,0.269 0,0.270 3,0.258 3,0.271 4,0.278 3,0.274 8,0.257 6,0.254 5,0.287 3 nm。而茆酮上的羰基氧也可以与相邻分子中甲基基上的 H 形成氢键,C=O $\cdots$ H—C 氢键的距离分别为 0.246 8 nm 和 0.248 2 nm(图 5(a))、0.268 5 nm 和 0.259 2 nm(图 5(b))。该材料具有两种不同的分子堆积结构,其中一个茆酮分子与两苯环具有较大的二面角(39.91 $^\circ$ 和 42.11 $^\circ$),另一个茆酮分子与两个苯环间具有较小的二面角(6.49 $^\circ$ 和 26.11 $^\circ$),两种茆酮交替排布(图 5(c))。具有较小二面角的化合物形成很好的共轭结构,同时分子间的氢键极大地增强了分子间的相互作用,使得材料的发射峰红移^[18]。

表 2 化合物 3MeFO 晶体结构数据
Tab. 2 Single crystal data of compound 3MeFO

Empirical formula	Formula weight	T/K	Crystal system	Space group	a/nm
$\text{C}_{31}\text{H}_{28}\text{O}_7$	512.53	293(2)	monoclinic	$P21/c$	2.320 15(4)
b/nm	c/nm	$\alpha/(^\circ)$	$\beta/(^\circ)$	$\gamma/(^\circ)$	Volume/ nm^3
1.383 72(3)	1.636 54(4)	90	96.328(2)	90	5.221 99(19)
Z	$\rho_{\text{calc}}/\text{cm}^3$	μ/mm^{-1}	$F(000)$	Crystal size/mm	Radiation/nm
8	1.304	0.756	2 160	0.22 $\times$ 0.18 $\times$ 0.14	Cu $\text{K}\alpha$ ($\lambda = 1.541 84$)
2θ range for data collection/ $(^\circ)$	Index ranges	Reflections collected	Independent reflections	Data/restraints/parameters	Goodness-of-fit on F^2
7.45 – 139.594	$-28 \leq h \leq 20$, $-14 \leq k \leq 16$, $-19 \leq l \leq 19$	22 577	9 568 [$R_{\text{int}} = 0.029 0$, $R_{\text{sigma}} = 0.036 5$]	9 568/0/697	1.024
Final R indexes($I > 2\sigma(I)$)		Final R indexes(all data)		Largest diff. peak/hole $/(e \cdot \text{nm}^{-3})$	
$R_1 = 0.047 2$, $wR_2 = 0.123 6$		$R_1 = 0.062 8$, $wR_2 = 0.139 4$		0.002 2/ − 0.000 20	

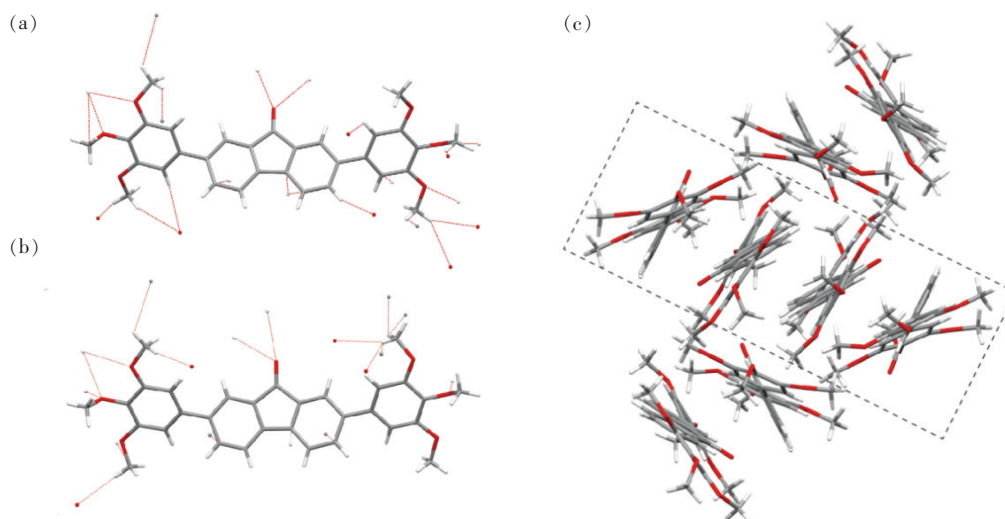


图5 (a,b)晶体结构中具有不同扭曲程度的两种分子结构;(c)化合物 3MeFO 的晶体结构堆积图。

Fig. 5 (a,b)Molecular structure with different degrees of distortion in the crystal. (c)Molecular stacking.

3.4 热稳定性性能

图6为化合物 3MeFO 的热失重(TGA)曲线和差示扫描量热法(DSC)曲线。从图中可以看出材料在损失 5% 的质量时的热分解温度为 354 $^{\circ}\text{C}$, 较高的热分解温度保证了材料在真空蒸镀过程中的稳定性。插图中材料的 DSC 曲线显示在 77 $^{\circ}\text{C}$ 有一个明显拐点, 为该化合物的玻璃化转变温度, 说明在该温度下材料发生了相转变。

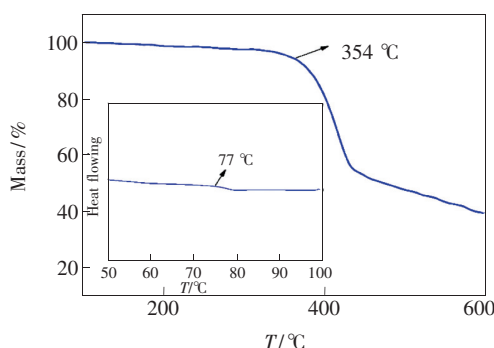


图6 化合物 3MeFO 的 TGA 曲线(插图为 DSC 曲线)

Fig. 6 TGA curve and DSC curve(inset) of compound 3MeFO

3.5 电化学性能

图7为化合物的循环伏安曲线。从图中可以看出位于 0.350 V 处有一个可逆氧化峰, 为二茂铁的氧化还原峰; 位于 1.224 V 处的氧化峰为化合物的氧化峰, 由于给体基团容易失去电子, 因此在该氧化峰位下给体 3,4,5-三甲氧基苯首先发生氧化。通过公式 $E_{\text{HOMO}} = -4.8 - (E_{\text{c}}^{\text{ox}} - E_{\text{f}}^{\text{ox}})$ eV (其中, 起始氧化峰表示为 E_{c}^{ox} , 二茂铁的

氧化峰位表示为 E_{f}^{ox}) 计算得到化合物的 HOMO 能级, 化合物的 HOMO 能级为 -5.67 eV^[19]。利用紫外-可见吸收光谱的吸收带边 ($\lambda_{\text{edge}} = 521$ nm) 计算得到该化合物的光学带隙 $E_{\text{g}} = 1.240/\lambda_{\text{edge}} = 2.38$ eV^[17], 进而得到化合物的 LUMO 能级为 -3.29 eV。

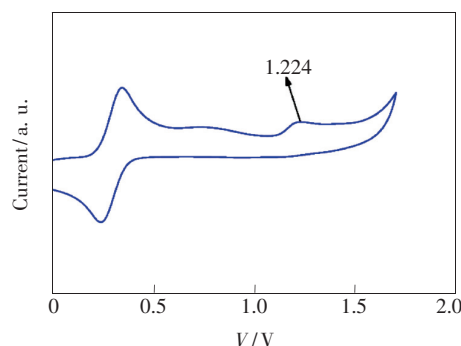


图7 化合物 3MeFO 的循环伏安曲线图

Fig. 7 Cyclic voltammetry diagram of compound 3MeFO

3.6 电致发光性能

为了验证该材料的电致发光性能, 制备了结构为 ITO/MoO₃ (3 nm)/NPB (30 nm)/TcTa (10 nm)/3MeFO (20 nm)/TPBi (40 nm)/LiF (1 nm)/Al (100 nm) 的非掺杂型电致发光器件。图8(a)为该器件的电流密度(J)-电压(V)-亮度(L)曲线。其启亮电压为 3.6 V, 当电流密度达到 1571 mA/m² 时最大亮度可达 1208 cd/m²。图8(b)为器件的电流效率(CE)-亮度(L)曲线, 插图则为器件的电致发光光谱。当亮度为 699 cd/m² 时, 最大电流效率可以达到 0.1 cd/A。该非掺杂器件

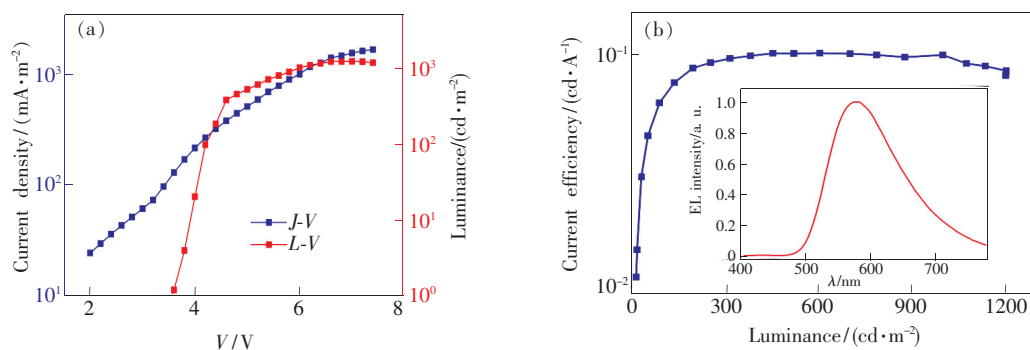


图 8 化合物 3MeFO 的电致发光性能。(a) 电流密度-电压-亮度曲线;(b) 电流效率-亮度曲线(插图电致发光光谱)。
Fig. 8 Electroluminescent properties of compound 3MeFO. (a) Curves of current density-voltage-luminance. (b) Curve of current efficiency-luminance, the inset is electroluminescent spectra.

的电致发光峰为 578 nm, 为橙红光, 这主要是因为发光层薄膜制备的过程中致密性不如晶体, 因此发光峰蓝移。

4 结 论

本文设计合成了一种具有 D- π -A- π -D 结构的有机红光化合物 3MeFO, 其中选用茈酮为受体, 3,4,5-三甲氧基苯为给体, 给受体间通过化学键结合后具有较强的电荷转移特性。该化合

物在固体和晶体状态下均具有良好的红光发射性能, 其晶体的发射峰达到 620 nm, 荧光寿命为 4.45 ns; 通过晶体结构分析发现, 该化合物晶体结构中存在大量的分子间氢键 (C—H $\cdots$ O—C 和 C—H $\cdots$ O=C), 极大地增强了分子间的相互作用, 同时该分子较好的共轭结构均有利于发射峰的红移。研究发现, 该化合物具有良好的热稳定性和电化学性能, 并在 OLED 中展示了良好的应用前景。

参 考 文 献:

- [1] LI C L, DUAN R H, LIANG B Y, *et al.*. Deep-red to near-infrared thermally activated delayed fluorescence in organic solid films and electroluminescent devices [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2017, 56(38):11525-11529.
- [2] MIAO Y Q, WANG K X, GAO L, *et al.*. Non-phosphor-doped fluorescent/phosphorescent hybrid white organic light-emitting diodes with a sandwiched blue emitting layer for simultaneously achieving superior device efficiency and color quality [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2018, 6(36):9811-9820.
- [3] SHI H F, ZOU L, HUANG K W, *et al.*. A highly efficient red metal-free organic phosphor for time-resolved luminescence imaging and photodynamic therapy [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(20):18103-18110.
- [4] WANG C J, QIAN Y. A TICT-active orthogonal D-A type probe phenothiazine-BODIPY for ratiometric response of hypochlorite and its application in living cells [J]. *J. Lumin.*, 2019, 210:261-268.
- [5] SUN Y H, YANG X L, FENG Z, *et al.*. Highly efficient deep-red organic light-emitting devices based on asymmetric iridium(III) complexes with the thianthrene 5,5',10,10'-tetraoxide moiety [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(29):26152-26164.
- [6] WU Y N, CHEN X J, MU Y X, *et al.*. Two thermally stable and AIE active 1,8-naphthalimide derivatives with red efficient thermally activated delayed fluorescence [J]. *Dyes Pigm.*, 2019, 169:81-88.
- [7] WANG Y F, LU H Y, CHEN C, *et al.*. 1,8-Naphthalimide-based circularly polarized TADF enantiomers as the emitters for efficient orange-red OLEDs [J]. *Org. Electron.*, 2019, 70:71-77.
- [8] 代好. 苯并噻二唑类橙红光材料的合成及性能研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2014.
DAI H. *Synthesis and Properties of Novel Orange-red Emissive Materials Based on Benzothiadiazole* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [9] 文平. 咔唑类 A- π -D- π -A 型红光及近红外荧光染料的光学性质调控 [D]. 太原:太原理工大学, 2017.
WEN P. *Tuning Emission Behavior of A- π -D- π -A Type of Red/Near-infrared Fluorescent Dyes Based on Carbazole* [D].

- Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [10] ZHANG Q S, KUWABARA H, POTSCAVAGE JR W J, *et al.*. Anthraquinone-based intramolecular charge-transfer compounds: computational molecular design, thermally activated delayed fluorescence, and highly efficient red electroluminescence [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2014, 136(52): 18070-18081.
- [11] WEN P, GAO Z X, ZHANG R, *et al.*. A- π -D- π -A carbazole derivatives with remarkable solvatochromism and mechanoreponsive luminescence turn-on [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2017, 5(25): 6136-6143.
- [12] LIU Y, TAO X T, WANG F Z, *et al.*. Aggregation-induced emissions of fluorenonearylamine derivatives: a new kind of materials for nondoped red organic light-emitting diodes [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2008, 112(10): 3975-3981.
- [13] ZHANG Z, GAO Y, LIU H, *et al.*. Dual fluorescence polymorphs: wide-range emission from blue to red regulated by TICT and their dynamic electron state behavior under external pressure [J]. *Dyes Pigm.*, 2017, 145: 294-300.
- [14] 宋春丽, 徐阳, 周禾丰, 等. 一种新型红光有机电致发光材料的合成与性能 [J]. *发光学报*, 2011, 32(3): 285-289.
- SONG C L, XU Y, ZHOU H F, *et al.*. Synthesis and properties of a novel type of red-light organic electroluminescence material [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2011, 32(3): 285-289. (in Chinese)
- [15] YUAN M S, WANG D E, XUE P C, *et al.*. Fluorenone organic crystals: two-color luminescence switching and reversible phase transformations between π - π stacking-directed packing and hydrogen bond-directed packing [J]. *Chem. Mater.*, 2014, 26(7): 2467-2477.
- [16] XU F, WANG H, DU X C, *et al.*. Structure, property and mechanism study of fluorenone-based AIE dyes [J]. *Dyes Pigm.*, 2016, 129: 121-128.
- [17] 候敏娜, 吴董宇, 卢国婧, 等. 高激子利用率的蓝光荧光材料及其激发态性质 [J]. *发光学报*, 2018, 39(12): 1659-1668.
- HOU M N, WU D Y, LU G J, *et al.*. Photophysical and excited state properties of blue fluorescent material with high excitation utilizing efficiency [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2018, 39(12): 1659-1668. (in Chinese)
- [18] BIAN L F, SHI H F, WANG X, *et al.*. Simultaneously enhancing efficiency and lifetime of ultralong organic phosphorescence materials by molecular self-assembly [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2018, 140(34): 10734-10739.
- [19] SUN J, ZHANG T M, LIAO X Q, *et al.*. A novel luminophor and host polymer from fluorene-carbazole derivatives for preparing solution-processed non-doped blue and closed-white light devices [J]. *Tetrahedron*, 2018, 74(10): 1053-1058.



贾钧森(1994-),男,陕西韩城人,硕士研究生,2017年于西安石油大学获得学士学位,主要从事有机光电功能材料的研究。

E-mail: 1197646208@qq.com



孙静(1987-),女,山东潍坊人,博士,讲师,2016年于太原理工大学获得博士学位,主要从事有机光电功能材料的研究。

E-mail: sunjing@tyut.edu.cn