2023年2月

文章编号:1000-7032(2023)02-0219-08

级联敏化三元旋涂型磷光器件电致发光性能

高羽晗¹,谢国华^{1,2,3*}

(1. 武汉大学化学与分子科学学院,湖北武汉 430072; 2. 武汉光电国家研究中心,湖北武汉 430074;
3. 汕头大学化学系和广东省有序结构材料的制备与应用重点实验室,广东汕头 515063)

摘要:金属配合物磷光分子在高浓度下易产生发光猝灭,通常采用主客体两元掺杂结构来提高电致发光效率。热激活延迟荧光(TADF)材料通过三线态激子的反向系间窜越理论上可达到100%的内量子效率。为探究不同主体材料在三元敏化磷光体系中的作用,本文基于TADF聚合物作为敏化剂、黄橙光磷光配合物作为发光材料,分别研究了以传统荧光材料和蓝色TADF主体构建的三元敏化的旋涂型有机电致发光器件性能。研究表明,在客体浓度分别为1%、5%、50%时,基于TADF主体的器件电致发光性能均优于相同浓度下以传统荧光主体构建的器件性能。其中当磷光配合物PO-01-TB掺杂浓度为1%时,以天蓝光TADF材料为主体制备的器件最大外量子效率为12.2%,相较于以传统荧光为主体的器件外量子效率(10.7%)提高了14%。这源于本身具有双极传输特性的TADF主体通过反向系间窜越通道增强了对敏化剂和客体的级联能量传递作用,减少了三线态激子的浓度猝灭和湮灭过程,提高了大电流注入下的激子利用率。

关 键 词:有机电致发光器件;三元敏化;热激活延迟荧光;磷光;能量传递 中图分类号:TN383 **文献标识码:** A **DOI**: 10. 37188/CJL. 20220323

Electroluminescent Performances of Solution-processed Phosphorescent Organic Light-emitting Diodes Based on Cascade Energy Transfer of Ternary Blends

GAO Yuhan¹, XIE Guohua^{1,2,3*}

 College of Chemistry and Molecular Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
 Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430074, China;
 Department of Chemistry and Key Laboratory for Preparation and Application of Ordered Structural Materials of Guangdong Province, Shantou University, Shantou 515063, China)

* Corresponding Author, E-mail: guohua. xie@whu. edu. cn

Abstract: Phosphorescent metal complexes tend to be quenched at high concentration. The host-guest strategy is usually employed to improve the electroluminescent efficiency. Due to the reverse intersystem crossing, thermally activated delayed fluorescence (TADF) materials could potentially achieve 100% internal quantum efficiency. To explore the influence of the host on the electroluminescence of the solution-processed organic light-emitting devices, the ternary-blend emitting layers were constructed with a TADF polymer as the sensitizer and a phosphorescent emitter which were hosted by a conventional fluorescent material and a TADF material, respectively. For the phosphorescent emitter with the concentration of 1%, 5% and 50%, the external quantum efficiencies of the devices based on the sky-blue TADF host were respectively higher than those of the devices based on the conventional fluorescent material host. With 1% phosphorescent emitter PO-01-TB doped in the ternary-blend emitting layer, the peak external quantum

收稿日期: 2022-09-05;修订日期: 2022-09-29

基金项目:国家自然科学基金(51873159,62175189);武汉光电国家研究中心开放基金(No.2019WNLOKF015);广东省有序结构材 料的制备与应用重点实验室开放课题(No.KLPAOSM202003)

Supported by National Natural Science Foundation of China (51873159,62175189); Open Project Program of Wuhan National Laboratory for Optoelectronics (No.2019WNLOKF015); Open Fund of Key Laboratory for Preparation and Application of Ordered Structural Materials of Guangdong Province, Shantou University (No. KLPAOSM202003)

efficiency of the solution-processed device hosted by the TADF material DMAC-DPS was up to 12.2%, which was 14% higher than that of the device with the fluorescent host (10.7%). This is attributed to efficient cascade energy transfer in the presence of the TADF host with the bipolar property and reverse intersystem crossing, which alleviates the triplet annihilation and quenching effects under high driving current.

Key words: organic light-emitting diode; ternary blend; thermally activated delayed fluorescence; phosphorescence; energy transfer

1引言

众所周知,在电场激励下有机发光材料通常 会产生25%的单线态激子和75%的三线态激 子^[1]。然而,在传统荧光材料中,三线态激子能量 通常以非辐射形式耗散掉,以常规有机电致发光 器件(OLED)20%的光输出耦合效率来看,传统荧 光器件理论上最高的外量子效率仅为5%^[2]。

热激活延迟荧光(TADF)现象早在1961年被 Parker和Hatchard在红光染料中发现^[3]。2011年, 日本九州大学 Adachi教授课题组报道了可以实 现高效电致发光的TADF材料,采用其作为发光 材料制备的器件外量子效率可达5.3%,高于传统 荧光器件的理论最大值,为后续高性能TADF材 料和器件的发展奠定了实验基础^[4]。

三线态激子转换为单线态主要有两种可能的 途径:一种是通过三线态-三线态激子湮灭(TTA) 的上转换,另一种是通过反向系间窜越(RISC)实 现 TADF 过程^[5-6]。在磷光器件中,TTA 现象通常 会造成非辐射能量损失;而在纯荧光器件中由 TTA产生额外的单线态激子可以提高荧光器件的 电致发光效率,但这类器件外量子效率的极限值 一般仅为12.5%。对于 TADF 材料,较小的单-三 线态能级差可使三线态激子全部以反向系间窜越 形成单线态,从而达到 100% 的激子利用率,器件 外量子效率可突破 20%^[7-8]。

TADF 材料不仅可作为发光分子,还常作为 主体或敏化剂形成高效的能量传递体系^[9-13]。在 抑制客体发光材料浓度猝灭现象的同时,TADF 材料通过能量转移将激子传递给发光客体,增强 器件电致发光性能^[14-15]。清华大学段炼教授课题 组分别设计了TADF 敏化荧光^[16]和敏化磷光^[17]的 策略,可以在低掺杂浓度下同时实现高效率、低效 率滚降和长寿命,另外敏化荧光的器件还可以进 一步提高色纯度^[16]。

磷光材料因为具有自旋轨道耦合效应理论上

也可以实现100%的激子利用率,由于光子是通 过辐射复合形式从三线态回到基态所产生的,因 此高亮度或大电流下产生的高浓度三线态激子易 发生 TTA 和激子-极化湮灭(TPA)等现象[18-19],导 致器件设计时一般需要采用主客体掺杂的方式来 减小磷光分子浓度[17.20]。为了改善溶液加工型器 件的电致发光性能,本文分析了传统荧光主体1, 3-二咔唑-9-基苯(mCP)和 TADF 主体 10.10'-(二 苯砜)双(9,9-二甲基-9,10-二氢吖啶)(DMAC-DPS)对三元敏化磷光发光层构筑的器件电致发 光性能的影响。本研究分别以1%、5%、50%掺杂 的磷光材料乙酰丙酮酸二(4-(4-叔丁基-苯基)-噻 吩[3.2-C]吡啶-C2.N)合铱(Ⅲ)(PO-01-TB)作为发光 分子,结合旋涂法制备三元共混发光层,并对比两 种不同主体的器件在电致发光下的性能差异。为 了改善发光性能,上述三元共混发光层还采用 TADF聚合物 PABPC2.5 作为敏化剂;同时其优良 的成膜特性还克服了小分子材料难以在 Perfluorinated ionomer(PFI)修饰的导电聚合物聚乙撑二 氧噻吩-聚苯乙烯磺酸盐(PEDOT: PSS)疏水薄膜 表面无法均匀成膜的问题[21-22],构建具有"瀑布式" 的级联能量传递发光层。实验结果表明,在相同 磷光掺杂剂浓度下,TADF为主体的器件外量子 效率均高于传统荧光三线态主体mCP对应的器 件结果。另外,本身具有双极传输性能的TADF 材料 DMAC-DPS 作为主体还有利于降低器件的 驱动电压,改善载流子注入平衡。

2 实 验

2.1 材料

实验中以二[2-((氧代)二苯基膦基)苯基]醚 (DPEPO)为空穴阻挡层,3,3'-[5'-[3-(3-吡啶基) 苯基][1,1':3',1"-三联苯]-3,3"-二基]二吡啶 (TmPyPB)为电子传输层。为了提高注入层的功 函数,降低注入势垒,空穴注入层采用掺杂 20% Perfluorinated ionomer(PFI)的 PEDOT: PSS(Heraeus Clevios P VP AI 4083)。所设计的发光层以磷光材 料 PO-01-TB 为发光客体、TADF 聚合物(4-(2-(9-(heptadecan-9-yl)-6-phenyl-9H-carbazol-3-yl)-9,9dihexyl-7-phenylacridin-10(9H)-yl)phenyl)(phenyl) methanone(PABPC2.5)为敏化剂,分别采用常规主 体 mCP 和 TADF 材料 10,10'-(4,4'-sulfonylbis-(4,1phenylene))bis(9,9-dimethyl-9,10-dihydroacridine) (DMAC-DPS)为主体,上述发光层溶液的浓度为 10 mg/mL,溶剂为氯苯,通过旋涂方式成膜。所制 备的器件以铝为阴极,氧化铟锡(ITO)为阳极。

2.2 器件制备

首先用丙酮和乙醇分别超声清洗氧化铟锡 (ITO)衬底10 min。用氮气干燥后,进行紫外-臭氧 处理 20 min,使衬底形成亲水表面;接着以4 000 r/min的转速将 PFI 掺杂的 PEDOT:PSS 溶液在 ITO 衬底上旋转涂覆 30 s,得到了空穴注入层,约 60 nm;然后将衬底转移到手套箱中,在120 ℃下进行 10 min的退火处理。在这些步骤之后,将配制好 的混合发光层溶液以1 000 r/min 的转速在 PEDOT:PSS 层上旋转涂覆 30 s形成均匀发光层 薄膜(55 nm),接着以 50 ℃退火 10 min;最后在真 空 腔中依次热蒸发 DPEPO(10 nm)、TmPyPB(50 nm)、Liq(1 nm)和 Al(100 nm)。器件结构示意图、能 级图以及有机分子结构式如图1所示。器件经过 紫外胶固化封装后,均放置在正常实验室氛围中 进行测试。



图1 本研究中涉及的器件结构(a)、能级图(b)以及用到的有机材料的分子结构式(c)。

Fig.1 Device structure(a), schematic diagram of energy level alignment(b), chemical structures of the molecules(c) used in this investigation.

3 结果与讨论

3.1 基于传统主体 mCP的器件性能

传统荧光主体材料 mCP 具有较高的三线态 能量(2.90 eV)和较深的最高分子占据轨道(HO- MO)能级,常被用作高效的蓝色磷光发光二极管的主体材料。图2给出了以mCP为主体、聚合物 PABPC2.5为敏化剂、不同浓度磷光材料PO-01-TB为客体所制备的三个器件的电致发光性能。 所设计的器件结构为ITO/PEDOT: PSS-PFI(20%)/



mCP: PABPC2. 5(30%): PO-01-TB/DPEPO/TmPyPB/

- 图 2 以mCP为主体的器件电致发光性能。(a)电流密度-电压特性;(b)亮度-电压曲线;(c)归一化电致发光光谱;(d)外量子效率曲线。
- Fig.2 Electroluminescent performances of the devices with mCP as the host in the EML. (a) Current density-voltage characteristics. (b) Luminance-voltage curves. (c) Normalized electroluminescent spectra. (d) EQE of the devices with mCP as the host and different concentration of PO-01-TB in the emitting layer.

图 2(a)为电流密度-电压曲线,以三个不同客 体浓度制备的器件均具有相似的载流子传输性 能,在不同工作电压下的电流密度相当,表明该磷 光材料在该发光层结构中不起明显的陷阱作用。 从图 2(b)可见三个器件的发光亮度有一定的浓 度依赖特性,主要是与磷光材料的浓度猝灭效应 有关。在电致光谱中,1% PO-01-TB 掺杂浓度的 器件具有较宽的电致发光光谱(图 2(c)),这与不 完全能量传递时敏化剂的残余发光有很大关系。 虽然 PABPC2.5 的发射光谱与磷光材料的吸收峰 有较好的重叠,但是低浓度磷光材料掺杂的发光 层中,PABPC2.5向磷光客体能量转移仍不完全, 有一部分残余发光,导致其光谱展宽;随着掺杂浓 度的增加,能量传递增强,光谱几乎全部来自于磷 光染料。图2(b)为发光亮度-电压曲线,1% PO-01-TB浓度掺杂的器件具有最低的开启电压,随 着掺杂浓度增加驱动电压逐渐增大;同时外量子 效率(EQE)最高可达10.7%,这是三个客体浓度所 制备器件的最高值。随着磷光客体掺杂浓度的增 加,由于三线态激子寿命比较长,加剧了PO-01-TB的浓度猝灭效应,大电流注入下器件的三线 态-三线态激子湮灭、三线态-极化子猝灭等非辐 射跃迁显著增强,使得器件外量子效率随客体浓 度增加而大幅下降。例如,5% PO-01-TB 掺杂的 器件外量子效率下降为8.4%, 而 50% PO-01-TB 掺杂的器件外量子效率仅为4.7%。

3.2 基于 TADF 主体 DMAC-DPS 的器件性能

相比传统有机荧光材料,TADF材料具有更高的三线态激子利用率,不仅可以作为主体也可以充当敏化剂,也是双极传输材料。蓝光TADF材料 DMAC-DPS 非掺杂条件下就具有较高的荧光量子产率,同时其具有良好的双极电荷传输能力,以及较高的三线态能级,适合作为红、绿光材料的主体。为比较TADF主体与传统主体在三元掺杂(主体:TADF敏化剂:磷光客体)系统中的性能,我们以如下结构ITO/PEDOT:PSS-PFI(20%)/DMAC-DPS:PABPC2.5(30%):PO-01-TB/DPEPO/TmPyPB/Liq/Al制备了三个对比器件,其中PO-01-TB的掺杂浓度分别为1%、5%、50%,相应器件的电致发光性能如图3所示。

从图 3(a)可见,1% PO-01-TB 掺杂的器件具 有最好的载流子传输性能,在低电压下漏电流较 小。图 3(b)为器件的亮度-电压曲线,与mCP为 主体的器件结果类似。当驱动电压低于 14 V时, 磷光掺杂浓度为 1% 的器件在相同驱动电压下具 有最高的亮度;当电压大于 14 V时,器件亮度趋 于饱和,高掺杂浓度的器件亮度稍微高出低掺杂 器件的结果。当主体为 DMAC-DPS 时,器件亮度趋 无像 款度下的电致发光光谱相较于相同客体 浓度下、以mCP为主体的器件光谱有所收窄(见 图 3(c)),即 PABPC2.5 的发光有所减弱,表明 TADF 主体和 TADF 敏化剂到客体的能量转移更 加快速而有效。图 3(d)所示的三个器件的外量



图 3 以DMAC-DPS为主体的器件电致发光性能。(a)电 流密度-电压特性;(b)亮度-电压曲线;(c)归一化电 致发光光谱;(d)外量子效率曲线。

Fig.3 Electroluminescent performances of the devices with DMAC-DPS as the host in the EML. (a) Current density-voltage characteristics. (b)Luminance-voltage curves. (c) Normalized electroluminescent spectra. (d) EQE curves.

子效率随着磷光客体掺杂浓度的增加而逐渐降低,1%、5%、50%浓度掺杂器件的最大外量子效

率分别为12.2%、9.7%、4.8%,这些结果再次证 实了磷光材料 PO-01-TB 具有较为明显的浓度猝 灭效应。

3.3 不同主体的器件发光机制对比

两种不同主体与不同浓度客体制备的器件性 能对比关系如表1所示。随着 PO-01-TB 浓度的 提高,两种主体制备的器件都表现出明显的效率 下降,这与磷光客体材料的浓度猝灭效应有明显 关联。同时从归一化电致发光光谱可以看到,低 浓度磷光掺杂(1%)的器件均有敏化剂 PABPC2.5 的残余发光,导致其光谱半峰宽较大(见表1)。 然而,不管是在低浓度1%还是高浓度50%掺杂 的情况下,以DMAC-DPS为主体的器件外量子效 率均高于以mCP为主体的器件结果。其中在1% PO-01-TB浓度掺杂时,DMAC-DPS为主体的器件 最大外量子效率提高了14%。随着磷光客体浓度 的增加,电致发光光谱峰值波长逐渐红移,由于 TADF聚合物 PABPC2.5 具有较高的 PLQY 和辐 射复合速率,在低浓度磷光掺杂系统中能量传递 不够完全,表现出敏化剂自身的残余发光。随着 PO-01-TB浓度的增加,敏化剂的激子能量完全被 磷光三线态激子俘获(见图4),主要表现为Dexter 能量转移过程。同时,在10 mA·cm⁻²的大电流密 度注入时,以DMAC-DPS为主体的器件外量子效 率均高于以mCP为主体的器件,表明TADF主体 和敏化剂不仅能够快速地将能量传递给客体磷光 分子,而且有利于提高三线态激子的利用^[23],抑制 高亮度下的激子湮灭过程。

在三元掺杂敏化系统中,常规主体mCP倾向 于通过Dexter能量转移,将激子能量传递给敏化 剂,再级联传递给磷光分子的三线态激子。而对 于TADF主体DMAC-DPS,由于其单线态-三线态

表1 以TADF聚合物 PABPC2.5 为敏化剂、不同主体制备的磷光器件性能比较 Tab.1 Electroluminescent performances of the devices with different host and a TADF polymer sensitizer PABPC2.5

Host	PO-01-TB/%	$V_{_{\rm on}}/{\rm V^a}$	$\mathrm{EQE}_{\mathrm{max}} / \%^{\mathrm{b}}$	$EQE_{10}/\%^{\circ}$	$\mathrm{PE}_{max} / (\mathrm{lm} \boldsymbol{\cdot} \mathrm{W}^{-1})^{d}$	$\mathrm{CE}_{max}/(\operatorname{cd}\boldsymbol{\cdot}\mathrm{A}^{-1})^e$	$\lambda_{_{ m max}}/{ m nm}^{ m f}$	FWHM/nm ^g
mCP	1	3.3	10.7	8.4	23.3	31.1	558	106
mCP	5	4.0	8.4	7.5	12.2	25.5	560	90
mCP	50	4.4	4.7	4.6	6.8	13.3	566	87
DMAC-DPS	1	3.4	12.2	9.7	25.7	35.5	560	95
DMAC-DPS	5	4.6	9.7	8.8	14.3	28.3	562	87
DMAC-DPS	50	4.8	4.8	4.8	6.4	14.3	566	80

^aDriving voltage (V) at a luminance of 10 cd·m⁻². ^bMaximal external quantum efficiency(EQE)(%). ^cEQE at 10 mA·cm⁻². ^dMaximal power efficiency (PE)(lm·W⁻¹). ^eMaximal current efficiency(CE)(cd·A⁻¹). ^fPeak wavelength under EL(λ_{max})(nm). ^gFull-width at half-maximum(FWHM)(nm) of the EL spectrum.



- 图4 三元发光体系的主要能量传递路径示意图和单-三 线态能级比较
- Fig.4 Schematic diagram of dominant energy transfer paths in the ternary-blended emitting layer and the singlettriplet levels(not to scale for guiding the eye)

能级差较小,反向系间窜越速率大,可能增加额外的Förster能量传递通道,从而提高级联能量传递的效率(见图4)。这就是为什么在相同客体磷光分子掺杂浓度下,TADF主体结合TADF聚合物敏化剂PABPC2.5所制备的器件中敏化剂残余发光有所减弱的原因之一。

4 结 论

本文以传统荧光分子 mCP 和 TADF 分子 DMAC-DPS 为主体、TADF 聚合物 PABPC2.5 为敏 化剂、不同浓度的磷光客体 PO-01-TB 构建具有级 联能量传递/敏化的溶液加工有机电致发光器件, 系统比较了不同磷光掺杂浓度下传统荧光主体与 TADF 主体制备的器件性能差异。研究发现,针 对不同磷光客体掺杂浓度,TADF主体 DMAC-DPS 的引入不仅有利于提高激子利用率,抑制大电流 注入下的激子湮灭过程,也可以有效地加速能量 传递过程,抑制三元发光层体系中敏化剂的残余 发光,同时有利于改善色纯度。以DMAC-DPS为 主体的器件 EQE 都高于传统主体 mCP 所制备的 器件效率。不同于常规荧光主体 mCP, TADF 主 体具有较为高效的反向系间窜越过程,有利于增 加能量传递通道,为构建高效、高色纯度的器件提 供了一种可行的方案。

本文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.20220323.

参考文献:

- XUSD, LIUTT, MUYX, et al. An organic molecule with asymmetric structure exhibiting aggregation-induced emission, delayed fluorescence, and mechanoluminescence [J]. Angew. Chem. Int. Ed., 2015, 54(3): 874-878.
- [2] TAO Y, YUAN K, CHEN T, et al. Thermally activated delayed fluorescence materials towards the breakthrough of organoelectronics [J]. Adv. Mater., 2014, 26(47): 7931-7958.
- [3] PARKER C A, HATCHARD C G. Triplet-singlet emission in fluid solutions. Phosphorescence of eosin [J]. Trans. Faraday Soc., 1961, 57: 1894-1904.
- [4] 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): 083302-1-3.
- [5] KONDAKOV D Y, PAWLIK T D, HATWAR T K, et al. Triplet annihilation exceeding spin statistical limit in highly efficient fluorescent organic light-emitting diodes [J]. J. Appl. Phys., 2009, 106(12): 124510-1-7.
- [6] 唐歌,刘士浩,张乐天,等.单层热激活延迟荧光有机发光器件及其激子分布特性[J].发光学报,2022,43(4): 576-582.

TANG G, LIU S H, ZHANG L T, *et al.* Single-layer thermally activated delayed fluorescent organic light-emitting devices and exciton distribution profiles [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(4): 576-582. (in Chinese)

- [7] HIGGINBOTHAM H F, YI C L, MONKMAN A P, et al. Effects of ortho-phenyl substitution on the rISC rate of D-A type TADF molecules [J]. J. Phys. Chem. C, 2018, 122(14): 7627-7634.
- [8] LIU Y C, WANG Y K, LI C S, et al. Efficient thermally activated delayed fluorescence conjugated polymeric emitters with tunable nature of excited states regulated via carbazole derivatives for solution-processed OLEDs [J]. Macromolecules, 2018, 51(12): 4615-4623.
- [9] ZHANG D D, SONG X Z, CAI M H, et al. Blocking energy-loss pathways for ideal fluorescent organic light-emitting

diodes with thermally activated delayed fluorescent sensitizers [J]. Adv. Mater., 2018, 30(6): 1705250-1-10.

- [10] HUANG TY, JIANG W, DUAN L. Recent progress in solution processable TADF materials for organic light-emitting diodes [J]. J. Mater. Chem. C, 2018, 6(21): 5577-5596.
- [11] WANG S P, ZHANG Y W, CHEN W P, et al. Achieving high power efficiency and low roll-off OLEDs based on energy transfer from thermally activated delayed excitons to fluorescent dopants [J]. Chem. Commun. (Camb.), 2015, 51 (60): 11972-11975.
- [12] CHEN J X, WANG K, ZHENG C J, et al. Red organic light-emitting diode with external quantum efficiency beyond 20% based on a novel thermally activated delayed fluorescence emitter [J]. Adv. Sci. (Weinh.), 2018, 5(9): 1800436-1-7.
- [13] 刘婷婷, 李淑红, 王文军, 等. 基于器件结构提高 TADF-OLED 器件的发光性能 [J]. 发光学报, 2020, 41(1): 77-85.

LIU T T, LI S H, WANG W J, et al. Enhanced luminescent properties of TADF-OLEDs based on device structures [J]. Chin. J. Lumin., 2020, 41(1): 77-85. (in Chinese)

- [14] CAI M H, ZHANG D D, DUAN L. High performance thermally activated delayed fluorescence sensitized organic lightemitting diodes [J]. Chem. Rec., 2019, 19(8): 1611-1623.
- [15] XIE G H, DING L M. Triplet manipulation for strong luminescence [J]. Sci. Bull., 2020, 65(21): 1780-1782.
- [16] SONG X Z, ZHANG D D, LU Y, et al. Understanding and manipulating the interplay of wide-energy-gap host and TADF sensitizer in high-performance fluorescence OLEDs [J]. Adv. Mater., 2019, 31(35): 1901923-1-9.
- [17]凌乾坤,董必正,陈志宽,等.用于高效红色磷光有机发光二极管的双极性芴基咔唑基主体材料[J].发光学报, 2022, 43(3): 359-370. LING Q K, DONG B Z, CHEN Z K, et al. Bipolar fluorenylcarbazole-based host materials for efficient red phosphorescent organic light-emitting diodes [J]. Chin. J. Lumin., 2022, 43(3): 359-370. (in English)
- [18] XIAO L X, CHEN Z J, QU B, et al. Recent progresses on materials for electrophosphorescent organic light-emitting devices [J]. Adv. Mater., 2011, 23(8): 926-952.
- [19] MURAWSKI C, LEO K, GATHER M C. Efficiency roll-off in organic light-emitting diodes [J]. Adv. Mater., 2013, 25 (47): 6801-6827.
- [20] ZHANG D D, DUAN L, LI Y L, et al. Towards high efficiency and low roll-off orange electrophosphorescent devices by fine tuning singlet and triplet energies of bipolar hosts based on indolocarbazole/1, 3, 5-triazine hybrids [J]. Adv. Funct. Mater., 2014, 24(23): 3551-3561.
- [21] LEE T W, CHUNG Y, KWON O, et al. Self-organized gradient hole injection to improve the performance of polymer electroluminescent devices [J]. Adv. Funct. Mater., 2007, 17(3): 390-396.
- [22] YANG Y K, WANG S M, ZHU Y H, et al. Thermally activated delayed fluorescence conjugated polymers with backbonedonor/pendant-acceptor architecture for nondoped OLEDs with high external quantum efficiency and low roll-off [J]. Adv. Funct. Mater., 2018, 28(10): 1706916-1-6.
- [23] 王哲, 武瑞霞, 冯洋, 等. 基于混合主体结构的溶液法制备的高效蓝色磷光 OLED [J]. 发光学报, 2022, 43(5): 763-772.

WANG Z, WU R X, FENG Y, et al. High-efficiency blue phosphorescent OLEDs based on mixed-host structure by solution-processed method [J]. Chin. J. Lumin., 2022, 43(5): 763-772. (in Chinese)



高羽晗(1997-), 女, 重庆人, 硕士, 2022年于武汉大学获得硕士学位,主 要从事有机光电材料和器件方面的 研究。 E-mail: gaoyuhan@whu. edu. cn



谢国华(1982-),男,福建漳州人,博 士,副研究员,博士生导师,2011年于 吉林大学获得博士学位,主要从事有 机光电材料和器件的交叉学科的 研究。

E-mail: guohua. xie@whu. edu. cn

青年编委介绍:

谢国华,《发光学报》第一届和第二届青年编委,英国皇家化学会会士,德国洪堡学者,博士生导师,武汉大学化学与 分子科学学院副研究员。2011年毕业于吉林大学集成光电子学国家重点联合实验室,获微电子学与固体电子学理学博 士学位。毕业后受德国洪堡基金会资助,同时在德累斯顿工业大学应用光物理研究所和 Fraunhofer COMEDD 开展 OLED 高温稳定性研究。2013年1月加入英国圣安德鲁斯大学物理与天文系有机半导体中心。2015年1月被引进到武汉大学 化学与分子科学学院从事有机光电材料和器件交叉学科研究。累计已发表 SCI论文 200余篇。目前还担任 InfoMat, The Innovation, SmartMat 等期刊青年编委。近年来主持国家自然科学基金面上项目3项、国际合作交流项目4项,参与国家重 点研发计划、国家自然科学基金委重大研究计划集成项目、湖北省技术创新专项重大项目、湖北省自然科学基金创新群 体等各1项。