**DOI:**10.16136/j.joel.2023.06.0333

# 基于 TPD:PO-T2T 的黄光激基复合物发光性能 研究

范烨齐,吕昭月\*,于志豪,丁婷婷,严舒洁

(华东理工大学物理学院,上海 200237)

摘要:通过多源有机分子气相沉积系统(LN-386SA)制备结构为 ITO/HAT-CN/TPD/TPD:PO-T2T/PO-T2T(*x*=10,20,30,40,50,60,70 nm)/LiF/Al的有机发光器件,研究了电子传输层 (PO-T2T)厚度对 TPD:PO-T2T 黄光激基复合物发光性能的影响。PO-T2T 厚度对其电致发光 (electroluminescence,EL)光谱几乎没有影响,但对电流密度(current density,CD)、亮度、效率等性 能有较大影响。由于金属铝扩散至发光层中会形成淬灭中心降低发光效率,当 PO-T2T 越厚时, 扩散至发光层的铝原子越少,因此发光效率随PO-T2T厚度增加而增加。当PO-T2T厚度为 70nm时,获得最大电流效率(current efficiency,CE)和功率效率(power efficiency,PE),分别为 2.16 cd/A、2.12 lm/W。此外,瞬态 EL 性能表明 TPD:PO-T2T 的发光来自 TPD 和 PO-T2T 分别对 载流子的直接捕获,没有发光瞬时过冲或者深陷阱中载流子逃逸复合发光的现象。 关键词:激基复合物;黄光;电子传输层;直接捕获;瞬时过冲 中图分类号:O482.3 文献标识码:A 文章编号:1005-0086(2023)06-0636-08

# Investigation of luminescent properties based on TPD: PO-T2T yellow exciplex

FAN Yeqi, LV Zhaoyue<sup>\*</sup>, YU Zhihao, DING Tingting, YAN Shujie (School of Physics, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: To investigate the effect of the thickness of electron transport layer (PO-T2T) on the luminescent properties of TPD:PO-T2T yellow exciplex, the devices with a structure of ITO/HAT-CN/TPD/ TPD:PO-T2T/PO-T2T (x=10,20,30,40,50,60,70 nm)/LiF/Al are fabricated by multi-source organic molecular vapor deposition system (LN-386SA). The electroluminescent (EL) spectra of the devices are barely changed by the thickness of PO-T2T, while other properties such as current density (CD), luminance as well as efficiencies are greatly changed. The luminescent efficiencies are increased with the increase of PO-T2T thickness, which is mainly attributed to the reduction of quenching center in the emissive layer caused by the diffusion of aluminum cathode . When the thickness of PO-T2T is 70 nm, the maximums of current efficiency (CE) and power efficiency (PE) are 2.16 cd/A and 2.12 lm/ W, respectively. In addition, transient overshoot and recombination of carriers captured by deep traps are not observed through the transient EL properties of the devices, which indicates that the emission of the TPD:PO-T2T exciplex are originated from the direct carrier recombination.

Key words: exciplex; yellow emission; electron transport layer; direct recombination; transient overshoot

0 引 言

激基复合物,一种激发态电荷转移复合物,在

有机发光二极管(organic light-emitting diode, OLED)中通常形成于电子传输层和空穴传输层界面<sup>[1,2]</sup>,对应的电子传输材料称为电子受体(accep-

\* E-mail:lvzhaoyue@ecust.edu.cn
 收稿日期:2022-05-07 修订日期:2022-07-19
 基金项目:国家级大学生创新创业训练项目(202110251093)资助项目

tor,A),空穴传输材料称为电子给体(donor,D)。 与常规单分子激子发光不同,激基复合物发光是 源自两种分子间的交叉跃迁,是一种双分子发光 现象。相对常规分子发光,激基复合物发光会产 生红移<sup>[2]</sup>,并且光谱呈现无明显特征、谱型宽的特 点。在早期 OLED 器件中,该特性可以用于调节 光谱、制作白光器件等,特别地,激基复合物参与 构筑的白光器件,结构简单,有助于简化工艺<sup>[3,4]</sup>。

由于给体的空穴传输性和受体的电子传输性 使给-受体混合薄膜形成的激基复合物具有双载 流子传输特性,载流子在混合薄膜内可以无势垒 地传输,而且激基复合物具有较宽的激子复合区 域,因此,近年来被广泛用作磷光和热活化延迟荧光 (thermally activated delayed fluorescence, TADF)的主 体材料[4-6],大大改善器件的光电性能,尤其在降低驱 动电压、提高功率效率(power efficiency, PE)方面起 关键性作用<sup>[5]</sup>。利用激基复合物作主体,KIM 研究 小组取得了不俗的成绩:他们采用 mCP [1,3-Bis (carbazol-9-yl)benzene] 与 B3PYMPM [4,6-Bis(3, 5-di(pyridin-3-yl)phenyl)-2-methylpyrimidine] 共掺 形成的激基复合物作主体,TADF 绿光材料 4CzIPN [2, 4, 5, 6-Tetrakis (carbazol-9-yl)-1, 3-dicyanobenzene]为客体,器件的外量子效率(external quantum efficiency, EQE)可达 29.6%<sup>[5]</sup>;以 mCBP [3, 3'-Bis(carbazol-9-yl)biphenyl]和PO-T2T[2,4,6-Tris[3-(diphenylphosphinyl)phenyl]-1,3,5-Triazine] 共掺为主体, 蓝色磷光材料 FIrpic [Iridium (III) Bis  $\lceil 2-(4, 6-difluorophenyl)$  pyridinato-N, C2'  $\rceil$ picolinate]为客体,器件的 EQE 高达 34.1%<sup>[6]</sup>。

除了作为主体材料,激基复合物还可能是天然的 TADF 材料,因为其最高占有轨道 (the highest occupied molecular orbital, HOMO)和最低空轨道 (the lowest unoccupied molecular orbital,LUMO) 能级位于不同的分子上,使其单重态一三重态能级 差( $\Delta E_{sT}$ )很小甚至为零<sup>[7]</sup>,目前 TADF 激基复合物 发光的 EQE 可达 20%<sup>[7]</sup>。基于上述原因,激基复合物 物俨然成为获取三重态能量、制备高效 OLED 的新 宠。为提高激基复合物器件的发光效率,深入研究 其光物理过程和光电性能的影响因素和机制是十分 必要的。

激基复合物的形成中,给一受体材料的选择非 常关键,根据文献[8],苯胺类空穴传输材料与三嗪 衍生物电子传输材料容易产生激基复合物。鉴于黄 光激基复合物在简化白光器件结构方面的重要作 用,发展高性能黄光激基复合物器件是非常必要的。 PO-T2T常用作电子传输层,且因具有缺电子特性常 与电子给体材料形成激基复合物。而 TPD [N,N'- Bis(3-methylphenyl)-N,N'-bis(phenyl) benzidine] 常用作空穴传输材料,其苯胺基团具有较强的给电 子能力。考虑 PO-T2T 与 TPD 如上的特点,本实验 中,选取苯胺化合物 TPD 为给体,三嗪衍生物 PO-T2T 为受体。MIAO 研究团队曾报道了 TPD 与 PO-T2T 形成激基复合物<sup>[8]</sup>,给出了简要的性能参 数,但不曾对该激基复合物进行深入研究,未探讨载 流子复合机理和提升性能的方法。在此,利用稳态 光谱和瞬态电致发光(electroluminescence,EL)衰减 探究 TPD:PO-T2T 激基复合物的形成和载流子复 合机制,并探究电子传输层厚度影响其发光性能的 内部机理,为改进发光性能提供参考。

# 1 实 验

### 1.1 实验材料

实验采用钢锡氧化物(indium tin oxide,ITO)作 阳极,HAT-CN [1,4,5,8,9,11-hexaazatriphenylene-hexacarbonitrile]为空穴注入材料<sup>[9]</sup>,TPD 为空 穴传输材料兼激基复合物的给体材料,PO-T2T 为电 子传输材料兼激基复合物受体,氟化锂(LiF)为电子 注入材料,金属铝(Al)为阴极。ITO 导电玻璃购于 深圳华南湘城科技有限公司,有机材料购于台湾机 光科技股份有限公司,金属铝购于中诺新材(北京) 科技有限公司,实验时所有材料未经提纯直接使用, 其中有机材料分子结构如图1所示。



#### 图 1 实验所用有机材料的分子结构:





#### 1.2 器件结构

为探究电子传输层厚度对 TPD:PO-T2T 激基 复合物发光性能的影响,设计了如下器件:ITO/ HAT-CN(10nm)/TPD(40nm)/TPD:PO-T2T (1:1,20nm)/PO-T2T(x nm)/LiF(0.6 nm)/Al (150 nm),其中 x=10,20,30,40,50,60,70。鉴于蒸 镀设备每批次只能控制4种不同的厚度,器件分两 批制作,第一批器件 PO-T2T 厚度由 10 nm 变化至 40 nm,第二批由 40 nm 变化至 70 nm,步长均为 10 nm。由于相同结构、不同批次制备的器件,性能 会有差异,因此选择 40 nm 器件为公共器件以便合 理比较不同厚度的器件性能变化。

# 1.3 器件制备

器件制备前,先清洗 ITO 玻璃基片。把 ITO 玻 璃片放入栅型聚四氟乙烯支架,依次用去离子水、无 水乙醇、异丙醇进行超声清洗,每种溶液清洗 3 次, 每次 10 min。清洗完毕后,用压缩空气吹干玻璃表 面残留溶液,最后放入紫外臭氧处理腔中 120 ℃处 理 10 min。

处理好的 ITO 玻璃片放入多源有机分子气相沉 积系统(LN-386SA),当蒸镀腔内的真空度低于 5× 10<sup>-4</sup> Pa 时,根据器件结构依次蒸镀各功能层,其中 掺杂层采用双源共蒸,蒸镀速率和厚度由 6 MHz 石 英晶振膜厚仪监测。蒸镀 Al 电极时,采用金属掩膜 板控制 Al 电极与 ITO 电极的重叠区域(即有效发光 面积),本实验发光面积为 2 mm×2 mm。

#### 1.4 性能表征

器件蒸镀完成后直接取出,不封装,在室温、大 气环境下,通过 Keithley2400 电源和 Konica Minolta CS2000 分光光度计测试其电流密度(current density,CD)-电压-亮度及 EL 光谱特性,瞬态 EL 衰减特 性则由信号发生器、光电倍增管和示波器组成的测 试系统测量。相关薄膜的光致发光(photoluminescence,PL)光谱和吸收(absorption,Abs.)光谱分别 由 LS-55 荧光光谱仪和 Lambda 950 紫外-可见-近红 外吸收光谱仪测试。

# 2 结果与讨论

# 2.1 TPD 与 PO-T2T 形成激基复合物发光

图 2 所示是 TPD、PO-T2T 与 TPD:PO-T2T 薄 膜的 PL 光谱与吸收光谱。PL 光谱显示:TPD 薄膜 有两个中心位于 402 nm 和 420 nm 的发光峰,与 YANG<sup>[10]</sup>及 ZHU 等<sup>[11]</sup>文献报道的一样;PO-T2T 薄膜则表现为半高全宽较宽且无特征的光谱,这是 PO-T2T激基缔合物的发光,与文献观察到的 一致<sup>[12]</sup>。

TPD:PO-T2T 混合薄膜呈现 3 个发光峰,中心 波长分别位于 402 nm、420 nm 以及 569 nm,显然 402 nm、420 nm 的发光来自 TPD,但 569 nm 发光峰 既不来自 TPD,也不源于 PO-T2T,而是相比 TPD 和 PO-T2T 各自的发光峰发生了红移。同时,图 2 的吸收光谱显示,TPD:PO-T2T 混合薄膜与 TPD、 PO-T2T 相比,没有新的吸收峰,即没有新物种产生, 因此,569 nm 发光峰应源自 TPD 与 PO-T2T 分子间 的电荷转移复合物发光,即激基复合物发光。



# 图 2 TPD、PO-T2T 和 TPD;PO-T2T(1:1)薄膜的 (a) 光致发光光谱和(b) 吸收光谱 Fig. 2 (a) Photoluminescence and (b) absorption

spectra of TPD, PO-T2T, TPD: PO-T2T(1:1) films

图 3 所示是 TPD 和 PO-T2T 的能级结构图,若 忽略库仑相互作用,它们之间形成激基复合物的光 子能量应为 TPD 的 HOMO 与 PO-T2T 的 LUMO 之间的能级差(2.28 eV),相应的波长约 544 nm。考 虑库仑相互作用<sup>[13]</sup>,TPD 与 PO-T2T 形成的激基复 合物发光会进一步红移,与实验所测 569 nm 吻合。

#### 2.2 优化电子传输层厚度

TPD 的空穴迁移率约 2×10<sup>-3</sup> cm<sup>2</sup>/(V・s), PO-T2T 的电子迁移率为 1.7-4.4×10<sup>-3</sup> cm<sup>2</sup>/(V •s),因此TPD:PO-T2T混合薄膜的载流子传输性



能很好地平衡,有利于制备高效的激基复合物发光 器件。常规的底发射 OLED 器件中,最后蒸镀的金 属电极与有机分子之间存在能量转移,导致有机分 子发光淬灭,而且这种能量转移是长程、非接触 的<sup>[14]</sup>,因此,为避免金属电极引起此类发光淬灭,金 属电极与发光层之间电子传输层的厚度非常关键。 于是,实验制备了不同电子传输层(PO-T2T)厚度的 器件来优化 TPD:PO-T2T 激基复合物的发光性能。 器件结构为:ITO/HAT-CN/TPD/ TPD:PO-T2T/ PO-T2T(x nm, x = 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70)/LiF/ Al。

不同厚度的 PO-T2T 器件在 6 V 下的 EL 光谱 如图 4 所示,可以看出所有器件 EL 光谱的发光峰均 位于 594 nm 附近,是来自 TPD:PO-T2T 激基复合 物的发光,只是相比 PL 光谱有红移,原因是器件中 TPD:PO-T2T 两侧分别有 TPD 和 PO-T2T,两侧界 面使激基复合物能级发生了变化。另外,TPD 的发 光在 EL 光谱中被抑制了。在外加电场下,电子由 Al 电极注入,经 PO-T2T 后进入发光层 TPD:PO-T2T,同样地,空穴由 ITO 电极注入,经 HAT-CN、 TPD 传输 至发光层 TPD:PO-T2T。TPD 较浅的 LUMO 能级和较低的电子迁移率使其具有电子阻挡 效应,电子很难到达 TPD 分子,因此 EL 光谱中没有 观察到 TPD 分子的发光。另一方面,较深的 HO-MO 能级和较低的空穴迁移率使 PO-T2T 具有空穴 阻挡效应,于是,电子和空穴各自堆积于发光层 TPD:PO-T2T中的相应能级,空穴堆积于TPD分子 的HOMO能级上,电子堆积于PO-T2T分子的LU-MO能级上,二者交叉跃迁形成激基复合物发光。图 4还显示PO-T2T厚度对TPD:PO-T2T激基复合物 的EL光谱影响较小,不过后文将看到厚度对器件的 其他电学性能影响较大。



图 4 器件在 6 V 下的电致发光光谱及 TPD:PO-T2T 薄膜的光致发光光谱

Fig. 4 Electroluminescence spectra of all devices at 6 V and photoluminescence spectra of TPD: PO-T2T thin film

PO-T2T 不同厚度的器件光电特性,即 CD-电 压-亮度(*J-V-L*)性能,如图 5 所示。鉴于不同批次制 备的同一器件性能有差异,把不同批次数据分开 展示。首先讨论*J-V*曲线,当PO-T2T厚度由 10 nm 增至 40 nm,相同电压下的 CD呈现先增大后 减小的趋势,而厚度从 40 nm 继续增加至 70 nm 时, CD 持续减小,即 PO-T2T 厚度大于 20 nm 时,达到 相同 CD 所需电压随厚度增加而增加,而且驱动电压 与厚度的关系不是线性关系。这种非线性关系说明 电流注入不仅与电场有关,还与 PO-T2T 厚度有关。

电子运动形成 CD 的表达式为:

$$J = \frac{I}{S} = \frac{neSv}{S} = nev , \qquad (1)$$

式中,*n*为单位体积内的电子数,*e*为电子电量,*v*为电子迁移速度。式(1)两边取对数得:

 $\ln J = \ln(nev) = \ln n + \ln e + \ln v$ , (2) 式中, ln e 为常量。PO-T2T 较薄时, 电子注入势垒 随厚度的增加而增大, 由阴极隧穿进入 PO-T2T 的 电子数量将减少, 即  $\delta \ln n < 0(\delta \ln n \neq \ln n)$  的变化 量, 代表了电子浓度 n 的变化)。另一方面, 有机材 料的载流子迁移率也与厚度有关,当厚度很薄时(如本实验中的 10 nm),薄膜无序度较高,载流子迁移率 很低,随着薄膜厚度增加,有序度增加,迁移率随之 大幅增加,即  $\delta \ln v > 0(\delta \ln v \ge \ln v$ 的变化量,代 表了电子迁移率 v 的变化)。当器件中 PO-T2T 厚 度从 10 nm 增至 20 nm 时, $|\delta \ln n| < |\delta \ln v|$ ,依 据式(2)有, $\delta \ln J > 0(\delta \ln J \ge \ln J$ 的变化量),即 CD 增加。当 PO-T2T 厚度大于 20 nm,电子注入势 垒和迁移率的增加幅度有限,但迁移率与电场正相 关,相同电压下,电场随厚度增加而减少,电子迁移 率 v 随之减小,导致 $|\delta \ln n| > |\delta \ln v|$ ,甚至  $\delta \ln v$ 也小于0,因此 $\delta \ln J < 0$ ,即 CD 随厚度的增加而 减小。

图 5 中亮度-电压曲线则表明,PO-T2T 厚度较 薄时,相同驱动电压下器件发光亮度随厚度的增加 而增加,从 10 nm 增至 20 nm 时,亮度有较大提升; 30 nm 也比 20 nm 有一定的升高;厚度大于 40 nm 后,亮度则随厚度的增加而降低。由于金属电极的 扩散,电子传输层厚度较薄时,金属 Al 扩散至发光 层形成淬灭中心,因此 PO-T2T 厚度为 10 nm 时,器 件亮度很低;厚度增加至 20 nm 时,扩散至发光层的 Al 原子减少,同时 CD 的增加也会使亮度增加,因 此,发光亮度有很大提升;30 nm、40 nm 时,虽然 CD 低于 20 nm,但扩散至发光层中的 Al 原子减少了,所 以亮度可与20nm器件媲美,甚至稍好些;直到厚度 大于 40 nm 时,扩散至发光层的 Al 可以忽略,器件 亮度恢复与 CD 成正比的关系——即相同电压下, CD 和亮度均随厚度增加而减小。

图 6 所示是器件的电流效率(current efficiency, CE)-CD-PE 曲线,可以看出,器件效率随着 PO-T2T 厚度 的 增 加 而 增 加,当 PO-T2T 厚 度 为 6 0 nm、







70 nm 时,器件的最大 CE 和 PE 分别为 1.95、2.16 cd/A 和 2.09、2.12 lm/W。图 7 为器件的 EQE-CD 曲线,其规律与 CE-CD 曲线一致。虽然 70 nm 器件 的效率更高,比 60 nm 提升了 10.5%,但是其驱动电 压也更高;如果进一步增加 PO-T2T 厚度,驱动电压 也进一步增大,综合考虑,没有继续增加 PO-T2T 厚 度的必要性。

### 2.3 瞬态 EL 特性

为进一步了解激基复合物发光的载流子行为, 测试了器件的瞬态 EL 特性。一般而言,若 OLED 器件发光层内积累有载流子对、或存在浅陷阱电荷, 则撤去正向脉冲后,载流子对或陷阱中电荷逃逸出 来会产生辐射复合,从而出现发光瞬时过冲现象<sup>[15]</sup>; 又或者电荷是被深陷阱束缚,那么撤除正向脉冲一 段时间后施加反向脉冲,反向电压促使陷阱中的电







荷逃逸出来并复合发光,从而在反向电压开始时观 察到发光恢复现象<sup>[16]</sup>。 实验时,首先给器件施加一个持续时间为 1952 μs 的 6 V 正向脉冲使器件稳定发光,图 8(a)是 关闭驱动电压后的瞬态 EL 归一化曲线,可以看出, 电子传输层的厚度对瞬态 EL 归一化曲线,可以看出, 电子传输层的厚度对瞬态 EL 性能没有影响,所有器 件呈现相同的特点:瞬态发光规律一致地衰减,没有 瞬时过冲现象,说明器件中不存在发光层内累积的 载流子对或陷阱电荷逃逸的再复合过程。图 8(b)是 关闭 正向脉冲854 μs 后,施加366 μs 的反向脉冲, 所有器件同样呈现一致的衰减规律,施加反向脉冲 没有观察到发光恢复现象,说明器件中不存在电荷 从深陷阱逃逸出再辐射复合的过程。





事实上,对 TPD:PO-T2T 系统,发光的载流子本就陷于相应的分子中,电子陷于 PO-T2T 的 LU-MO 能级,空穴陷于 TPD 的 HOMO 能级,相当于直接捕获载流子发光。施加正向偏压稳定发光时,PO-

T2T 分子中 LUMO 能级上的电子与 TPD 分子在 HOMO 能级上的空穴产生交叉跃迁发光,撤去电压 或进一步施加反向偏压,都是这些能级上电子一空 穴对复合发光,参与复合发光的载流子并没有得到 补充,因此观察不到发光过冲或发光恢复现象。同 时,由于复合发光的载流子陷于相应的能级上,导致

# 3 结 论

发光衰减时间较长。

通过稳态的 PL 光谱和吸收光谱,证实了 TPD 与 PO-T2T 之间存在电荷转移形成激基复合物,发 射中心波长为 569 nm 的黄光。为优化 TPD: PO-T2T 激基复合物的性能,实验制备了一系列 ETL 厚 度不同的器件。所有器件的EL发光峰均位于 594 nm,器件中载流子传输层与发光层形成的界面 使得 EL 发光比 PL 发光略有红移。当电子传输层 厚度由 10 nm 增至 20 nm 时,电子传输层膜无序度 减小、迁移率增加,使得相同电压下器件的 CD 增加; 大于 20 nm 时,厚度增加导致有机层中电场减小,迁 移率降低,因此 CD 随厚度增加而降低。电子传输层 厚度小于 40 nm 时,扩散至发光层中的 Al 随厚度减 少, 淬灭中心的减少使得器件发光强度升高; 大于 40 nm 时,可忽略 Al 扩散,由于有机层中电场随厚度增 加而减小,电子迁移率随之降低,从而导致发光层中 载流子数量减少,发光强度降低。实验中 70 nm 时, 器件效率最优, CE和PE最高达2.16 cd/A和 2.12 lm/W。同时,瞬态 EL 衰减曲线中没有观察到 发光瞬时过冲或者发光恢复现象,因为空穴和电子 分别被 TPD 和 PO-T2T 直接捕获,分子间的交叉跃 迁产生 TPD: PO-T2T 激基复合物发光。

# 参考文献:

- GUO J F, ZHEN Y G, DONG, H L, et al. Recent progress on organic exciplex materials with different donor-acceptor contacting modes for luminescent applications [J].
   Journal of Materials Chemistry C, 2021, 9 (47): 16843-16858.
- [2] GAO H F, FANG S H, ZHANG Y F, et al. Adjustment of exciton recombination zone by utilizing the donor of exciplex as spacer layer [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2017,38(4):514-520.

高浩锋,方圣欢,张叶峰,等.激基复合物给体作间隔层 对激子复合区域的调节[J].发光学报,2017,38(4): 514-520.

- [3] LIU W,ZHENG C J, WANG K, et al. High performance all fluorescence white organic light emitting devices with a highly simplified structure based on thermally activated delayed fluorescence dopants and host[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(48): 32984-32991.
- [4] JAIN N, PANDEY S, SINGH R K, et al. Double co-host emitter based top emitting white organic light emitting diodes with enhanced brightness and efficiency[J]. Optoelectronics Letters, 2021, 17(10):581-585.
- [5] SUN J W, LEE J H, MOON C K, et al. A fluorescent organic light-emitting diode with 30% external quantum efficiency [J]. Advanced Materials, 2014, 26 (32): 5684-5688.
- SHIN H, LEE J H, MOON C K, et al. Sky-blue phosphorescent OLEDs with 34.1% external quantum efficiency using a low refractive index electron transporting layer
   [J]. Advanced Materials, 2016, 28(24): 4920-4925.
- [7] CHAPRAN M, PANDER P, VASYLIEVA M, et al. Realizing 20% external quantum efficiency in electroluminescence with efficient thermally activated delayed fluorescence from an exciplex [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(14):13460-13471.
- [8] GUO Y Y, ZHAO Y P, MIAO Y Q, et al. All-exciplex-based white organic light-emitting diodes by employing an interface-free sandwich light-emitting unit achieving high electroluminescence performance[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2020, 8(35):12247-12256.
- [9] ZHAO H, ZHANG F H, LIN Z C, et al. Effect of new spacer layer on fluorescent-phosphorescent hybrid white organic light-emitting device[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2019, 30(12): 1265-1272.
   赵会,张方辉,林志超,等.新型间隔层对荧磷杂化白光

OLED 器件性能的影响[J]. 光电子・激光, 2019, 30 (12): 1265-1272.

- [10] YANG S Y, ZHANG X L, HOU Y B, et al. Charge carriers at organic heterojunction interface: Exciplex emission or electroplex emission? [J]. Journal of Applied Physics, 2007,101(9):096101.
- ZHU H N, XU Z, ZHANG F J, et al. Exciplex or electroplex emissions from the interface between aromatic diamine and 2, 9-dimethyl-4, 7-diphenyl-1, 10-phenanthroline?
   [J]. Applied Surface Science, 2008, 254 (17): 5511-

5513.

- [12] YUAN P, GUO X, QIAO X, et al. Improvement of the electroluminescence performance of exciplex-based OLEDs by effective utilization of long-range coupled electron-hole pairs[J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7 (9):1801648.
- [13] LEE J H, CHENG S H, YOO S J, et al. An exciplex forming host for highly efficient blue organic light emitting diodes with low driving voltage[J]. Advanced Functional Materials, 2015, 25(3): 361-366.
- [14] WU Y, WU H R, WANG M L, et al. Metal-induced photoluminescence quenching in thin organic films originating from noncontact energy transfer between single molecule and atom [J]. Applied Physics Letters, 2007, 90 (15): 154105.
- [15] HONG X X, XU Z, ZHAO S L, et al. Study on the overshoot effect of doped PhOLED with transient electroluminescence[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017,

37(3):710-714.

洪晓霞,徐征,赵谡玲,等.采用瞬态电致发光研究磷光 掺杂体系发光瞬时过冲的发射机理[J].光谱学与光谱 分析,2017,37(3):710-714.

[16] WANG H, ZHAO S L, XU Z, et al. The influence of deep trap on the efficiency decrease in PhOLEDs based on double dopants strategy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2019,39(4):1018-1024.
王浩,赵谡玲,徐征,等.深陷阱对有机磷光双掺杂体系 电致发光器件效率衰退的影响[J].光谱学与光谱分析, 2019,39(4):1018-1024.

作者简介:

**吕昭月** (1983-),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事有机光电 器件方面的研究.