

文章编号: 1000-7032(2023)01-0174-12

OLEDs中的激子及其高效利用

马东阁*

(华南理工大学 材料科学与工程学院, 分子聚集发光中心, 高分子光电材料与器件研究所,
广东省分子聚集发光重点实验室, 发光材料与器件国家重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 有机发光二极管(OLEDs)是基于有机半导体的发光器件, 由于具有自发光、响应速度快、发光颜色可调、轻薄、大面积柔性可弯曲等优点, 被认为是新一代的显示和照明技术。OLEDs是通过注入的电子和空穴复合形成激子并辐射发光的过程, 因此如何有效利用激子, 特别是三线态激子, 已经成为OLEDs材料和器件研究的重要课题。其中, 如何把三线态激子能量转换成单线态激子, 并最终实现100%激子的荧光发射更具有应用价值, 最近几年这方面的研究已经取得了显著进展。本文从OLEDs的工作原理和发光过程出发, 详细介绍了制备高效率荧光OLEDs的有效方法及其最新进展, 并对未来发展方向进行了展望, 为OLEDs材料和器件的研究提供重要参考。

关键词: 有机发光; 激子; 高效利用; 单线态和三线态

中图分类号: TN312.8

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20220259

Excitons and Their Efficient Utilization in OLEDs

MA Dongge*

(Center for Aggregation-induced Emission, Institute of Polymer Optoelectronic Materials and Devices, Guangdong Provincial Key Laboratory of Luminescence from Molecular Aggregates, State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

* Corresponding Author, E-mail: msdgm@scut.edu.cn

Abstract: Organic light emitting diodes (OLEDs) are light-emitting devices based on organic semiconductors. They are considered as a new generation of display and lighting technology because of their advantages such as self-illumination, fast response, adjustable light-emitting color, lightness, large area flexibility and foldability, etc. The emission of OLEDs is a process of the radiative decay of excitons formed by recombination of injected electrons and holes. Therefore, how to effectively use excitons, especially the use of triplet excitons, has become an important topic in the research on materials and devices of OLEDs. Among them, how to convert triplet exciton energies into singlet excitons and finally realize the fluorescence emission of 100% excitons has more application value. In recent years, significant progresses have been made in this field. This paper introduces the effective methods for the fabrication of high efficiency fluorescence OLEDs in detail based on working mechanism and luminescence processes of OLEDs and their latest progresses, and prospects the future development directions, which provide an important reference for the research on materials and devices of OLEDs.

Key words: organic light-emitting; excitons; efficient utilization; singlet and triplet states

收稿日期: 2022-07-01; 修订日期: 2022-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(21788102); 广东省分子聚集发光重点实验室(2019B030301003); 广东省科技计划项目(2020A0505140002)
Supported by National Natural Science Foundation of China(21788102); Guangdong Provincial Key Laboratory of Luminescence from Molecular Aggregates(2019B030301003); Guangzhou Science & Technology Plan Project(2020A0505140002)

1 引 言

有机发光二极管(OLEDs)由于具有自发光、响应速度快、色彩丰富、光线柔和、无蓝光伤害、轻薄,以及大面积柔性可弯曲等优点,被认为是新一代显示和照明技术,已经在智能手机、电视、可穿戴电子设备以及照明灯等产品上得到了应用^[1-4]。OLEDs的实际应用需要满足高效率、长寿命和低成本的要求,显然材料和器件非常关键,而从材料的角度来说同时满足上述三个要求目前还非常困难。到目前为止,大家比较公认的 OLEDs 发光材料有三代:第一代有机荧光发光材料^[5]、第二代有机磷光发光材料^[6-7]和第三代热活化延迟荧光发光材料^[8]。

我们知道,有机荧光材料是最早报道的 OLEDs 发光材料,由于具有长寿命、良好的效率滚降和低成本的优点被广泛研究,但受自旋统计理论的限制,由有机荧光发光材料制成的 OLEDs 只有 25% 的单线态激子辐射发光,而 75% 的三线态激子则通过热和声子非辐射的形式浪费掉了,大大限制了有机荧光发光材料的应用。为了提高 OLEDs 的效率,美国 Forrest 教授^[6]和中国马於光教授^[7]等设计合成了含有重金属原子的配合物发光材料(如铂、铱、铱等),由于重金属原子的强自旋轨道耦合作用,使三线态激子在室温下也能辐射发光,最终导致单线态激子和三线态激子都能以光的形式释放,实现了 100% 激子利用率,大大提高了 OLEDs 的效率。目前,绿光和红光磷光发光材料已经在 OLEDs 产品中得到了应用。然而,磷光发光材料仍存在价格昂贵以及器件在高亮度下严重效率滚降的问题,并且其蓝光器件的稳定性也没有得到很好的解决,限制了其应用。2012 年,日本 Adachi 教授等^[8]提出了热活化延迟荧光的设计思路,通过合理的分子结构设计,减小单线态能级和三线态能级的能级差(ΔE_{ST}),使三线态激子在热能的作用下通过反系间窜越到单线态能级上,实现 100% 激子的荧光发射。可以看到,热活化延迟荧光材料在具有高效率的同时,也有低成本的优点,最近几年得到了广泛研究,其器件效率也达到了磷光 OLEDs 的水平,但器件在高亮度下仍然存在效率滚降严重的问题,寿命和色纯度还没有达到产品的要求。显然,从应用的角度来说,如果器件效率能够得到进一步提高,第一代有

机荧光发光材料更具应用价值。实际上,目前 OLEDs 产品中所用的蓝光材料仍然采用属于第一代的有机荧光发光材料,并且一直是 OLEDs 领域材料发展的重要研究课题。

如何把三线态激子能量转换成单线态激子并实现 100% 的激子荧光发射是有机荧光发光材料发展的关键。为了更好地理解影响 OLEDs 效率的因素,我们首先了解下器件的工作原理。通常 OLEDs 的发光过程包括:载流子的注入、载流子的传输、载流子的复合形成激子以及激子辐射衰减发光四个过程^[9]。因此,器件的外量子效率 η_{EQE} 可以写成如下公式: $\eta_{EQE} = \eta_{IQE} \cdot \eta_{out} = r_{e-h} \cdot \gamma_{exciton} \cdot \eta_{PL} \cdot \eta_{out}$,其中, η_{IQE} 为内量子效率, η_{out} 为光耦合输出效率, r_{e-h} 为电子和空穴平衡因子, $\gamma_{exciton}$ 为每单位注入电荷形成的激子数, η_{PL} 为有机发光材料薄膜的荧光量子效率。可以看到,器件效率公式中与材料相关的参数有 $\gamma_{exciton}$ 和 η_{PL} 。因此,在设计高效的器件结构提高 r_{e-h} 和 η_{out} 的同时,选择具有高 η_{PL} 和良好三线态激子能量转移特性的有机荧光发光材料对制备高效率的荧光 OLEDs 非常重要。

可以看到,随着 OLEDs 材料和器件的不断发展,人们已经提出了许多方法和材料体系提高荧光 OLEDs 的效率,如具有三线态-三线态湮灭(TTA)上转换特性的 TTA 有机荧光发光材料^[10]、TADF 材料敏化荧光发光材料的方法^[11]、激基复合物(Exciplex)作为荧光发光材料的主体^[12]以及热激子(Hot exciton)有机荧光发光材料^[13]和聚集诱导发光(AIE)有机荧光发光材料^[14],极大地推动了荧光 OLEDs 的发展。特别是热激子和聚集诱导发光材料在 OLEDs 的应用及其效率的不断提高,有望成为新一代 OLEDs 材料体系,打破国外垄断,为我国 OLEDs 产业的发展奠定材料基础。

2 荧光 OLEDs 材料与器件

2.1 TTA 材料与高效 OLEDs

TTA 上转换有机荧光发光材料是 OLEDs 中最实用的一种有机发光材料,目前 OLEDs 产品中的蓝光发光材料就是采用的这种 TTA 材料。如图 1 所示,它是通过三线态激子-三线态激子相互作用产生聚变并形成较高激发态能级的(TTA)*态,之后再通过反系间窜越把能量转移到 S_1 能级上,并辐射发光的一个过程。这类材料的一个基

本条件是低的 T_1 能级,其位置基本是 S_1 能级的一半,保证形成的 TTA 能量有效地转移到 S_1 能级上,形成更多的单线态激子能量。可以看到,由于两个三线态激子转换成了一个单线态激子能量,因此用 TTA 材料制成的 OLEDs 的内量子效率最大可达 62.5%,远远超过了传统荧光材料的 25%。因为 TTA 上转换过程在高电流密度下更为有效,因此其器件通常在高亮度下表现出高效率的特点,使器件具有良好的稳定性。TTA 有机荧光发光材料的激子能量传递和辐射发光过程可以表示为: $T_1+T_1\rightarrow(TTA)^*(37.5\%)\rightarrow S_1(37.5\%)$, $S_1(25\%)+S_1(37.5\%)\rightarrow S_0+h\nu(62.5\%)$ 。

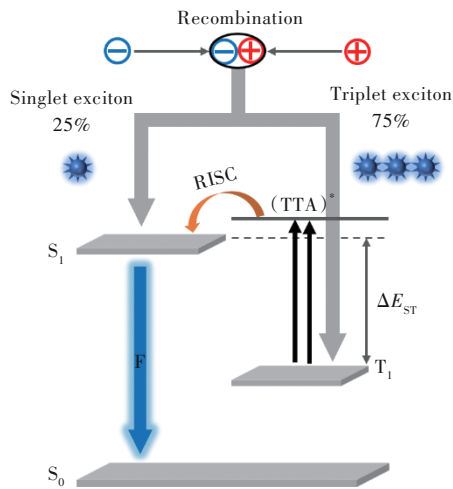


图1 TTA有机荧光发光材料的电致发光机理图

Fig.1 Electroluminescence mechanism diagram of TTA organic fluorescence luminescence materials

由于高效率 and 低效率滚降特性,TTA 有机荧光发光材料得到了广泛研究^[15-23]。通常芳香单元,如茈基、蒽基和菲基,以及长 π 共轭结构,如二苯乙烯和三苯胺,可以很好地用来设计 TTA 材料,确保分子具有足够低的 T_1 能级和足够高的 S_1 与 $T_n(n>2)$ 能级差。因此,设计合成 TTA 分子时,应避免强分子间电荷转移态的形成。

近年来,蓝光 TTA 有机荧光发光材料得到了广泛研究。如吉林大学路萍教授等^[18]合成的邻菲咪唑-蒽衍生物蓝光发光材料(简称 PIANCN)显示了很好的 TTA 特性,分子结构如图 2 所示,其 S_1 和 T_1 分别为 2.86 eV 和 1.74 eV,薄膜荧光量子效率 η_{PL} 为 50%,是典型的 TTA 材料。该材料发射很好的蓝光,用其制备的非掺杂 OLEDs 发射的峰值波长为 470 nm,相应的色度坐标 CIE 为 (0.14, 0.19),最大 η_{EQE} 达到了 9.44%,在 1 000 cd/m² 亮

度下仍维持 9.44%,没有效率滚降,这也是 TTA 材料的显著特征。

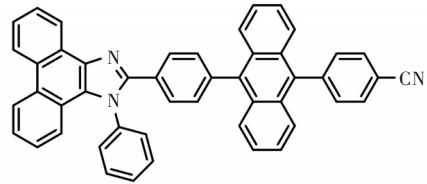


图2 蓝光 TTA 有机荧光发光材料 PIANCN 的分子结构图
Fig.2 Molecular structure diagram of blue fluorescence organic luminescence material PIANCN

除了自身表现良好的电致发光特性外,TTA 材料也可以作为荧光发光客体分子的主体实现高性能荧光 OLEDs。在这种情况下,注入的电子和空穴首先在 TTA 主体分子上形成激子,其 T_1 上的三线态激子能量还是通过形成的 $(TTA)^*$ 态系间窜越到单线态能级上,然后主体单线态上的激子能量再通过 Förster 传递给客体上的单线态激子,并最终实现 62.5% 激子的客体的荧光发射。如图 3 所示为 TTA 主体掺杂荧光客体的电致发光机理,其激子能量传递和辐射发光过程可以表示为: $T_1^H+T_1^H\rightarrow(TTA)^{*H}(37.5\%)\rightarrow S_1^H(37.5\%)$, $S_1^H(25\%)+S_1^H(37.5\%)\rightarrow S_1^G(62.5\%)$, $S_1^G(62.5\%)\rightarrow S_0^G+h\nu(62.5\%)$ 。

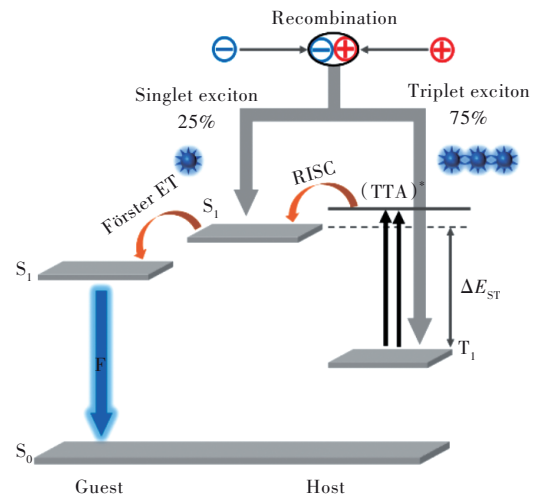


图3 TTA 主体掺杂有机荧光发光材料的电致发光机理图

Fig.3 Electroluminescence mechanism diagram of TTA host doped organic fluorescence luminescence materials

大量的实验结果表明,用 TTA 上转换材料作为有机荧光发光客体材料的主体,不但保持了高效率 and 低效率滚降的电致发光特性,而且大大提高了器件的稳定性。日本半导体能源实验室有限

公司 Suzuki 等^[16]用 TTA 材料 CzPA 主体掺杂一种荧光发光客体分子制备出了高效率、长寿命蓝光荧光 OLEDs, 主体 CzPA 和发光客体的分子结构如图 4 所示, CzPA 的 S_1 和 T_1 分别为 2.95 eV 和 1.74 eV, 客体发光分子的 S_1 和 T_1 分别为 2.68 eV 和 1.84 eV, 主客体材料均表现一定的 TTA 特性。通过优化器件结构, 制备的蓝光荧光 OLEDs 在 $1\ 000\ \text{cd}/\text{m}^2$ 亮度下取得了最大 η_{EQE} , 达到 11.9%, 基本达到了 TTA 材料的理论极限值, 峰值发射波长为 466 nm, 色度坐标 CIE 为 (0.14, 0.17)。该器件也表现了非常好的稳定性, 其半衰期寿命 T_{50} 在 $1\ 000\ \text{cd}/\text{m}^2$ 亮度下达到了 8 000 h, 充分体现了 TTA 材料作为主体的优越性。

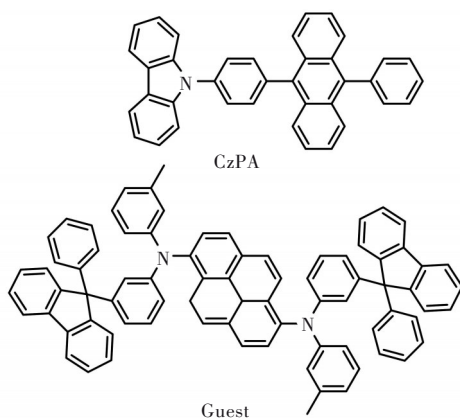


图 4 Suzuki 等器件中所用的 TTA 主体 CzPA 和荧光发光客体材料的分子结构图

Fig.4 Molecular structure diagram of TTA host CzPA and fluorescence luminescence guest materials used in device by Suzuki *et al.*

用 TTA 材料制备的 OLEDs 还有一个非常重要的特性, 即低工作电压特性, 这也是 TTA 材料不同于其他有机发光材料的显著特点, 因此 TTA 器件通常具有高的功率效率。美国北卡罗莱纳州立大学 So 教授等^[19]对此进行了详细研究, 他们把一种蓝光荧光有机发光材料 (简称 BCzVBi, $S_1=3.03\ \text{eV}$ 和 $T_1=1.94\ \text{eV}$, 分子结构在图 5(b) 中) 掺杂在 TTA 材料 CzPA ($S_1=3.17\ \text{eV}$ 和 $T_1=1.77\ \text{eV}$) 主体中作为发光层制备了蓝光荧光 OLEDs, 并与 CBP 为主体的器件进行了比较, 图 5(a)、(b) 分别显示了两个器件的电流密度-亮度-电压和功率效率-亮度特性对比曲线。可以看到, TTA 器件的开启电压降到了 2.4 V, 这对蓝光器件来说是非常低的, 其器件的最大功率效率达到了 16.4 lm/W, 最大 η_{EQE} 也有 9.8%, 在 $1\ 000\ \text{cd}/\text{m}^2$ 亮度下仍保持

14.5 lm/W 和 9.8% 的高效率, 这种低电压特性对于 OLEDs 照明应用来说非常有用。关于 TTA 器件低工作电压的机理问题, 目前仍存在争议^[24-26]。So 教授等的研究认为, TTA 器件中的三线态激子是电子直接注入到 TTA 分子的三线态能级形成的。因此, TTA 器件的开启电压是由空穴注入势垒 ϕ_h 和 TTA 分子的三线态能级 T_1 决定的, 即 $V_{\text{on}} \sim \phi_h + T_1$ 。

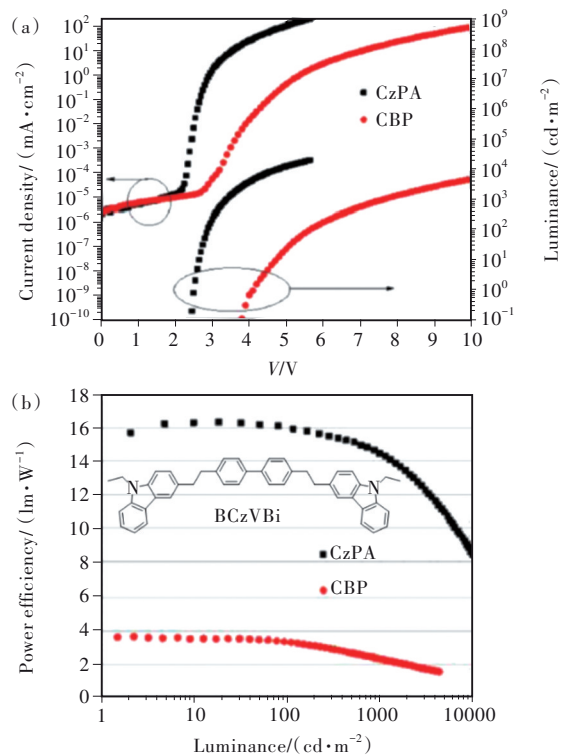


图 5 So 等制备的 TTA 蓝光荧光 OLEDs 的电流密度-亮度-电压 (a) 和功率效率-亮度 (b) 特性曲线, 图 (b) 中为 BCzVBi 的分子结构^[19]。

Fig.5 Current density-luminance-voltage (a) and power efficiency-luminance (b) characteristics of TTA-based blue fluorescence OLEDs fabricated by So *et al.*. The inset of (b) is the molecular structure of BCzVBi^[19].

2.2 TADF 敏化与高效 OLEDs

敏化概念最早是由美国 Forrest 教授等^[27]提出来的, 他们设计了一种磷光层/荧光层 (CBP: Ir(ppy)₃/CBP: DCM2) 交替发光层结构, 通过把磷光层的三线态激子能量传递给荧光层的 DCM2, 实现了高效率的红光荧光 OLEDs。后来这个概念被应用到 TADF 材料体系^[11, 28], 把传统的荧光有机发光材料和 TADF 材料混合在一起, 即 TADF 敏化方法。这里的 TADF 材料也称为敏化剂, 利用 TADF 材料反系间窜越过程将三线态激子能量传

递给单线态激子的特性,同样可以实现 100% 激子效率的荧光 OLEDs。图 6 给出了 TADF 敏化有机荧光发光材料的电致发光机理,注入的电子和空穴首先在 TADF 敏化分子上形成激子,其 75% 的三线态激子能量通过反系间窜越过程传递到单线态激子的能级上,之后再通过 Förster 过程传递给发光客体分子。可以看到,通过调节 TADF 敏化材料的混合浓度,在实现激子有效利用率的同时,也避免了三线态激子在 TADF 分子上的猝灭。因此,制备的荧光器件不但具有高效率,也表现了良好的稳定性。TADF 敏化体系激子能量传递和辐射发光过程可以表示为: $T_1^{\text{TADF}}(75\%) \rightarrow S_1^{\text{TADF}}(75\%)$, $S_1^{\text{TADF}}(25\%) + S_1^{\text{TADF}}(75\%) \rightarrow S_1^{\text{G}}(100\%)$, $S_1^{\text{G}}(100\%) \rightarrow S_0^{\text{G}} + h\nu(100\%)$ 。

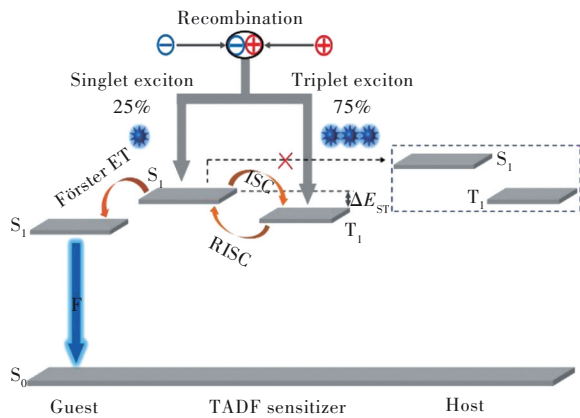


图 6 TADF 敏化有机荧光发光材料的电致发光机理图

Fig.6 Electroluminescence mechanism diagram of TADF sensitized organic fluorescence luminescence materials

日本九州大学 Adachi 教授等^[11]将蓝、绿、黄、红荧光有机发光分子(分别简称为 TBPc、TTPA、TBRb 和 DBP)和相应的 TADF 敏化剂(分别简称为 ACRSA、ACRXTN、PXZ-TRZ 和 tri-PXZ-TRZ)分别掺杂在不同的主体(分别简称为 DPEPO、mCP、mCBP 和 CBP)中作为发光层,制备出了高效率荧光 OLEDs。图 7 给出了荧光有机发光材料和 TADF 敏化剂的分子结构式,相应的器件的电致发光性能总结在表 1 中。可以看到,TADF 敏化后器件效率得到了显著提高,蓝、绿、黄、红光器件的最大 η_{EQE} 分别达到了 13.4%、15.8%、18.0% 和 17.5%,在 1 000 cd/m^2 亮度下仍有 8.8%、11.7%、17.2% 和 10.9%,这对荧光 OLEDs 来说是非常高的效率,预示着激子利用率几乎达到了 100%。并且敏化器件的稳定性也得到了显著改善,制备的

敏化黄光荧光器件在初始亮度 3 225 cd/m^2 下的半衰期寿命 T_{50} 达到了 194 h,比非敏化黄光荧光器件提高了近 20 倍,进一步阐明了 TADF 敏化方法对改善荧光 OLEDs 器件性能的有效性及其未来应用价值。

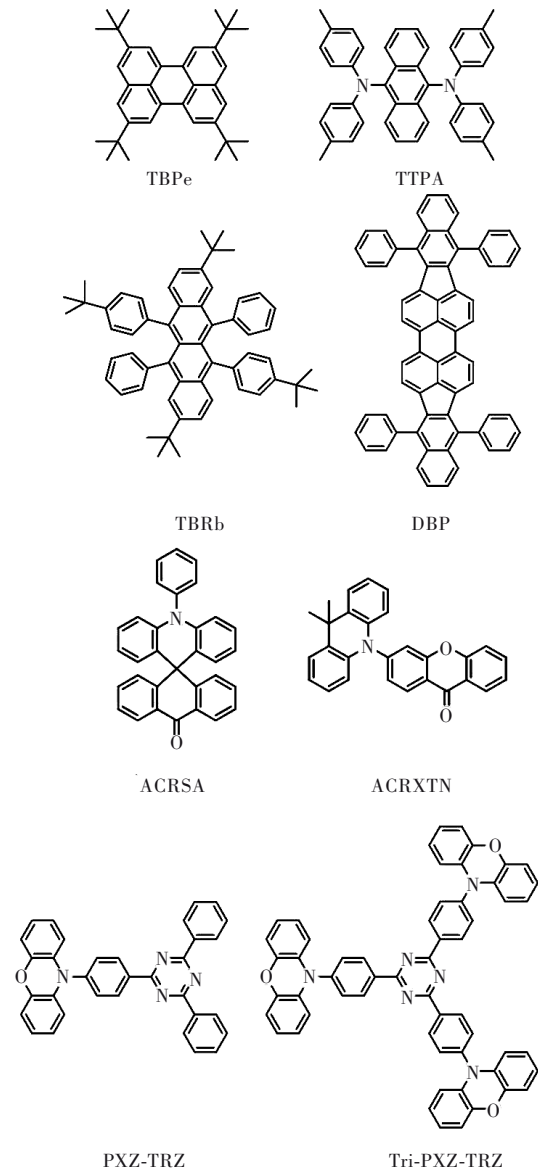


图 7 Adachi 等制备的 TADF 敏化荧光 OLEDs 中所用的荧光有机发光材料和 TADF 敏化剂的分子结构图

Fig.7 Molecular structure diagram of the used fluorescence organic luminescence materials and TADF sensitizers in TADF-sensitized fluorescence OLEDs by Adachi et al.

清华大学段炼教授等^[29]系统地研究了不同宽带隙主体对 TADF 敏化荧光 OLEDs 性能的影响。图 8 给出了器件中所用的荧光发光客体(简称 PhTBuPAD)、TADF 敏化剂(简称 DACT-II)和 4 个不同主体(分别简称 m32aICT ($S_1=2.90$ eV, $T_1=$

表 1 TADF 敏化的蓝光、绿光、黄光和红光荧光 OLEDs 的电致发光性能^[11]

Tab. 1 Electroluminescence performances of TADF-sensitized blue, green, yellow and red fluorescence OLEDs^[11]

器件	V_{on}/V	最大效率/ $%(cd \cdot A^{-1})/(lm \cdot W^{-1})$	1 000 $cd \cdot m^{-2}$ 下的效率/ $%(cd \cdot A^{-1})/(lm \cdot W^{-1})$
蓝光	4.7	13.4/27.0/18.0	8.8/18.0/7.0
绿光	3.0	15.8/45.0/47.0	11.7/38.0/30.0
黄光	3.2	18.0/60.0/58.0	17.2/56.0/33.0
红光	3.0	17.5/25.0/28.0	10.9/20.0/10.0

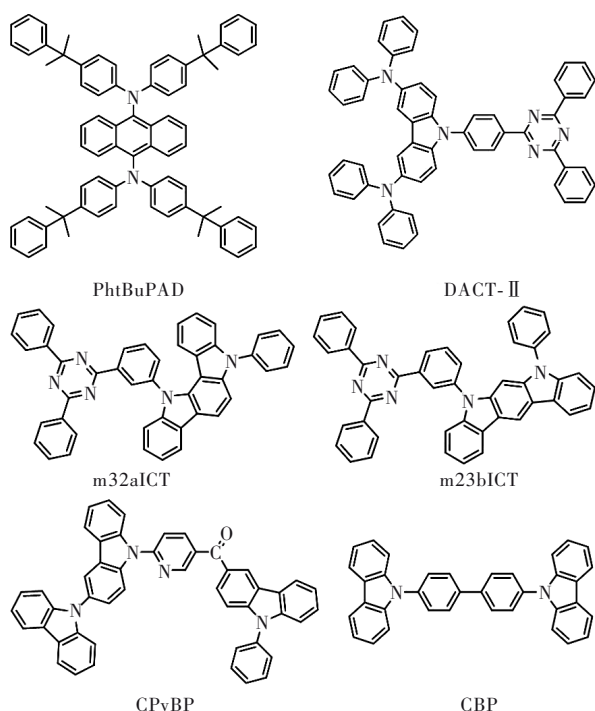


图 8 段炼等制备的不同主体下 TADF 敏化荧光 OLEDs 中所用的有机荧光发光材料、TADF 敏化剂和四个主体材料的分子结构图。

Fig. 8 Molecular structure diagram of the used organic fluorescence luminescence materials, TADF sensitizer and four host materials in TADF-sensitized fluorescence OLEDs by Duan *et al.*.

2.89 eV)、m23bICT ($S_1=2.92$ eV, $T_1=2.72$ eV)、CPyBP ($S_1=3.09$ eV, $T_1=2.88$ eV) 和 CBP ($S_1=2.90$ eV, $T_1=2.89$ eV) 材料的分子结构式。研究发现,通过控制电荷在主体和敏化分子上的复合可以很好地调控激子损耗,从而提高激子的利用率和器件效率。可以看到,如果把激子复合控制在主体上,对于 TADF 主体情况(类型 I),所有复合的激子都能有效地通过 TADF 敏化剂最终传递给荧光客体分子并发光;而对于非 TADF 主体情况(类型

II),由于其大的 S_1 和 T_1 能级差,主体上的三线态激子会通过敏化剂传递给荧光客体分子的三线态能级,造成激子的大量损耗。如果电荷直接在 TADF 敏化剂上复合,无论是 TADF 主体(类型 III),还是非 TADF 主体(类型 IV),在 TADF 敏化剂上复合的三线态激子能量都会有部分通过 Dexter 传递给荧光客体而损耗掉。因此,制备高效率 TADF 敏化荧光 OLEDs,除了敏化材料的能级匹配和三线态激子能量的有效转移外,主体的特性也非常重要。表 2 总结了用 4 个不同主体制备的 TADF 敏化荧光 OLEDs 的电致发光效率。可以看到,类型 I 的器件显示了最大效率,并通过优化电子传输层材料,其最大 η_{EQE} 达到了 24.2%,在 5 000 cd/m^2 亮度下仍保持有 21.1%,在初始亮度 2 000 cd/m^2 下的半衰期寿命 T_{50} 达到了 400 h,器件性能远远高于其他三种主体的情况,充分显示了主体选择和激子复合位置控制的重要性。

表 2 四种不同主体下的 TADF 敏化荧光 OLEDs 的电致发光性能比较^[28]

Tab. 2 Electroluminescence performances of TADF-sensitized fluorescence OLEDs with four different hosts^[29]

器件	传输层	最大效率/ $%(lm \cdot W^{-1})$	5 000 $cd \cdot m^{-2}$ 下的效率/ $%(lm \cdot W^{-1})$
类型 I	BPhen	23.2/76.9	20.0/46.4
类型 II	BPhen	16.1/58.2	14.5/34.5
类型 III	BPhen	18.5/65.1	13.5/28.1
类型 IV	BPhen	19.4/52.1	17.2/33.1
类型 I	DPPyA	24.2/89.5	21.1/51.3

2.3 Exciplex 主体与高效 OLEDs

激基复合物(简称 Exciplex)即激发态电荷转移复合物,是分子激发后电子给体分子和电子受体分子之间在激发态发生部分电荷转移而形成的。激基复合物一个重要特征是其单线态激子和三线态激子具有非常小的能级差,具有热活化延迟荧光发射的特性,类似 TADF 材料,可以实现 100% 的激子利用率,因此在 OLEDs 上得到了广泛研究^[12, 30-32]。

激基复合物除了自身良好的发光特性,也是非常好的主体材料,由于其热活化延迟荧光特性,用作荧光发光分子的主体理论上也可以实现 100% 激子效率的荧光 OLEDs^[33]。激基复合物是通过电子传输材料与空穴传输材料简单混合而成,除了具有高效率的特点,其制备的器件还具有

低工作电压特性,可显著提高器件的功率效率和稳定性。在激基复合物掺杂荧光发光客体分子的器件中,注入的电子和空穴在发光层中沿着电子传输材料的 LUMO 和空穴传输材料的 HOMO 传输并复合形成激子,其 T_1 上的三线态激子能量通过反系间窜越到其 S_1 能级上,最后再通过 Förster 能量传递给荧光客体分子并发光。电致发光机理如图 9 所示,其激子能量传递和辐射发光过程可以表示为: $T_1^E(75\%) \rightarrow S_1^E(75\%)$, $S_1^E(25\%) + S_1^E(75\%) \rightarrow S_1^G(100\%)$, $S_1^G(100\%) \rightarrow S_0^G + h\nu(100\%)$ 。

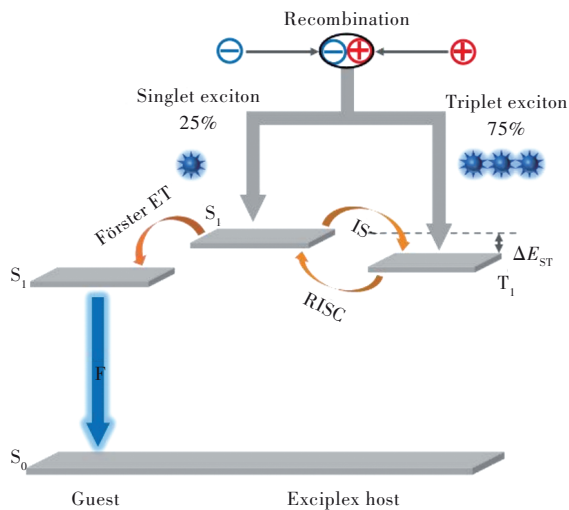


图 9 Exciplex 主体有机荧光发光材料的电致发光机理图
Fig.9 Electroluminescence mechanism diagram of exciplex host organic fluorescence luminescence materials

韩国首尔国立大学 Kim 教授等^[34]用一种空穴传输材料(简称 TCTA)和一种电子传输材料(简称 B4PYMPM)按 1:1 质量比混合构成的激基复合物($S_1=2.436\text{ eV}$, $T_1=2.428\text{ eV}$)为主体,掺杂一种红光荧光发光客体分子(简称 DCJTb),成功制备出了高效率红光荧光 OLEDs,所用材料的分子结构如图 10 所示。该器件发射了很好的 DCJTb 红光,并显示了高效率,最大 η_{EQE} 达到了 10.6%,远远超过了传统荧光 OLEDs 的效率,预示着激基复合物作为荧光发光材料的主体制备高效率荧光 OLEDs 的可行性。

中国台湾大学 Wong 教授等^[35]用一种双咔唑给体材料(简称 BCzPh)和一种三嗪受体材料(简称 3P-T2T)混合构成的高效激基复合物($S_1=2.70\text{ eV}$, $T_1=2.67\text{ eV}$),作为一种绿光荧光发光客体分子(简称 C545T)的主体,成功地制备出了高效率绿光荧光 OLEDs,所用材料分子结构如图 11 所示。可以看到,由于 BCzPh-3P-T2T 单线态和三线

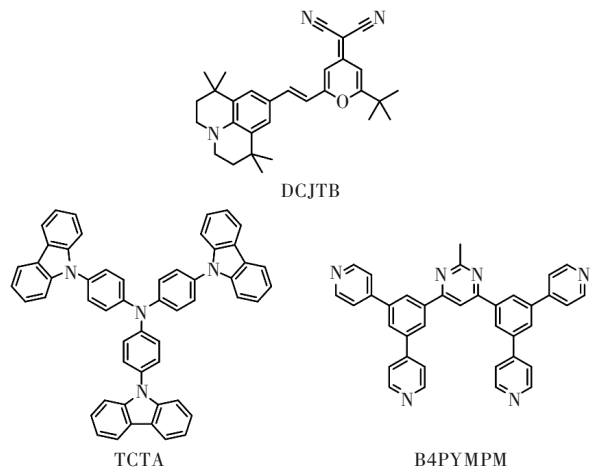


图 10 DCJTb、TCTA 和 B4PYMPM 的分子结构图。

Fig.10 Molecular structure diagram of DCJTb, TCTA and B4PYMPM.

态能级差小,在激基复合物上的三线态激子能有效地传递到其单线态能级上,并进一步传递给 C545T 客体分子,导致有效的绿光发射,该器件最大 η_{EQE} 达到了 15.5%,在 1000 cd/m^2 亮度下 η_{EQE} 仍有 12.3%,表现了良好的效率和效率滚降特性。3 个对比器件的电致发光性能如表 3 所示,激基复合物主体的使用显著提高了器件效率。

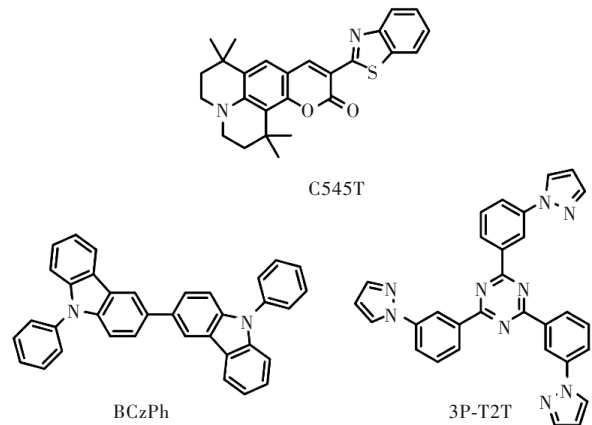


图 11 C545T、BCzPh 和 3P-T2T 的分子结构图。

Fig.11 Molecular structure diagram of C545T, BCzPh and 3P-T2T.

西南大学熊祖洪教授等^[36]通过掺杂黄光荧光发光客体分子红荧烯(简称 Rubrene)在空穴传输材料(简称 TCTA)和电子传输材料(简称 PO-T2T)混合组成的激基复合物($S_1=2.71\text{ eV}$, $T_1=2.70\text{ eV}$)主体中,把制备的黄光荧光 OLEDs 的最大 η_{EQE} 提高到了 16.1%,最大电流效率和功率效率也分别达到了 46.8 cd/A 和 56.1 lm/W ,在 1000 cd/m^2 亮度下仍分别保持在 15.2%、 43.8 cd/A 和 32.5 lm/

表 3 制备的不同主体荧光 OLEDs 的电致发光性能比较^[35]
Tab. 3 Comparison of the electroluminescence performances of the fabricated fluorescence OLEDs with different hosts^[35]

器件	$V_{on}/$ V	$\eta_p/$ ($\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$)	$\eta_{EQE}/$ %
BCzPh:3P-T2T	2.36	44.9/45.9	11.7/13.5
BCzPh:3P-T2T:C545T	2.33	66.5/58.3	15.2/15.5
Alq ₃ :C545T	2.77	14.9/10.4	5.0/5.5

其中, V_{on} : 开启电压, η_p : 功率效率(在 100 cd/m^2 和 1 000 cd/m^2 亮度下), η_{EQE} : 外量子效率(在 100 cd/m^2 和 1 000 cd/m^2 亮度下)。

W。研究发现, 在 Rubrene 中从高能级三线态 T_2 到 S_1 的反系间窜越 HL-RISC 过程对实现高效率非常重要, 因此需要把激子能量有效地限制在 Rubrene 的 T_2 能级上。

图 12 给出了该激基复合物主体掺杂 Rubrene 黄光荧光 OLEDs 中的激子能量传递机制和电致发光过程。可以看到, 由于 TCTA:PO-T2T 激基复合物高的 T_1 和 S_1 (图中分别为 EX_3 和 EX_1) 能级, 在

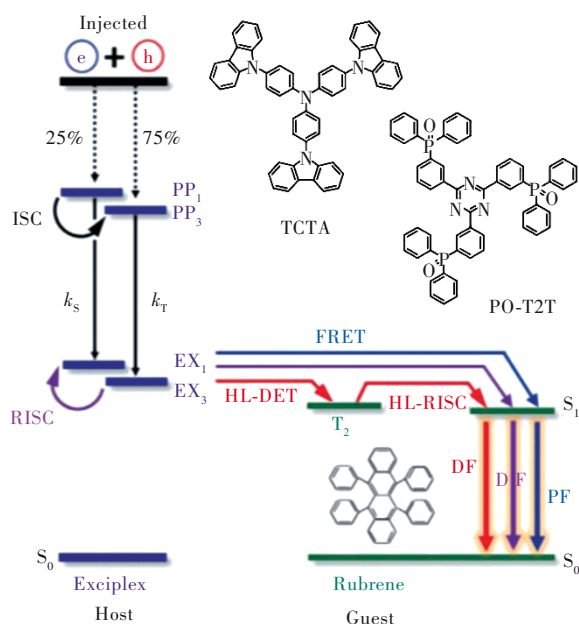


图 12 熊祖洪等制备的 Exciplex 黄光荧光 OLEDs 的激子能量传递机理和发光过程。图中给出了 Rubrene、TCTA 和 PO-T2T 的分子结构。DF 表示延迟荧光, PF 表示瞬态荧光^[36]。

Fig.12 Schematic diagram of exciton energy transfer mechanism and luminescence processes in exciplex host yellow fluorescence OLEDs by Xiong *et al.*. The molecular structures of rubrene, TCTA and PO-T2T are given. DF: delayed fluorescence, PF: prompt fluorescence^[36].

其 T_1 上的三线态激子能量很容易通过 Dexter 传递到 Rubrene 的 T_2 上, 从而实现 Rubrene 上的 HL-RISC 过程; 而激基复合物本身又可以通过 RISC 过程把 T_1 上的三线态激子能量传递到其 S_1 上, 并最终再通过 Förster 能量传递给 Rubrene 的 S_1 。这种双通道激子能量传递过程保证了激子的高效利用, 也降低了激子的聚集猝灭, 使器件表现了高效率 and 低效率滚降的特性。

2.4 热激子材料与高效 OLEDs

热激子指的是在较高激发态能级 (S_n 或 T_n , $n \geq 2$) 上的激子。根据卡沙定则, 在有机分子的发光过程中, 电子往往被激发到较高的激发态能级 (S_n 或 T_n , $n \geq 2$), 之后迅速弛豫到最低激发态能级 (S_1 或 T_1), 再辐射衰减到基态 (S_0) 而发光, 显然这个过程不能 100% 地利用激子 (荧光发射) 或激子猝灭 (磷光发射) 的问题。然而, 如果高能级上的激子如 T_2 上的三线态激子能直接反系间窜越到单线态 S_1 能级上并发光, 则可以实现 100% 激子的荧光发射, 这个发光过程也就是所说的热激子机理。2012 年, 华南理工大学马於光教授等^[37]把热激子的概念用于 OLEDs 发光材料的合成中, 突破了荧光 OLEDs 效率的激子统计理论限制。之后其得到了广泛研究, 大量热激子有机发光材料被设计合成出来, 实现了高效率器件^[13], 有望成为新一代 OLEDs 有机电致发光材料。

图 13 给出了热激子有机发光材料的电致发光机理。在热激子 OLEDs 中, 注入的电子和空穴在热激子分子的 S_1 上形成 25% 的单线态激子, 在 T_2 上形成 75% 的三线态激子, 由于 T_2 能级高于 S_1 能级, 因此 T_2 上的三线态激子能量通过反系间窜越又转移到 S_1 能级上, 最后再辐射衰减到基态 S_0 , 实现 100% 激子的荧光发射。如果用热激子材料作为荧光有机发光客体分子的主体, 则在热激子分子 S_1 上的激子会通过 Förster 能量传递给客体分子的 S_1 , 之后再激子辐射衰减到基态 S_0 , 从而导致客体的荧光发射。可以看到, 为了减小 T_2 能级上的激子损耗, 通常把热激子材料的 T_1 设计得很低, 类似 TTA 上转换材料, 避免从 T_2 到 T_1 的内转换 (IC) 造成的损耗。热激子材料的激子能量传递和辐射发光过程可以表示为: $T_2^{\text{HE}}(75\%) \rightarrow S_1^{\text{HE}}(75\%)$, $S_1^{\text{HE}}(25\%) + S_1^{\text{HE}}(75\%) \rightarrow S_0^{\text{HE}} + h\nu(100\%)$ 或 $S_1^{\text{HE}}(25\%) + S_1^{\text{HE}}(75\%) \rightarrow S_1^{\text{G}}(100\%)$, $S_1^{\text{G}}(100\%) \rightarrow S_0^{\text{G}} + h\nu(100\%)$ 。

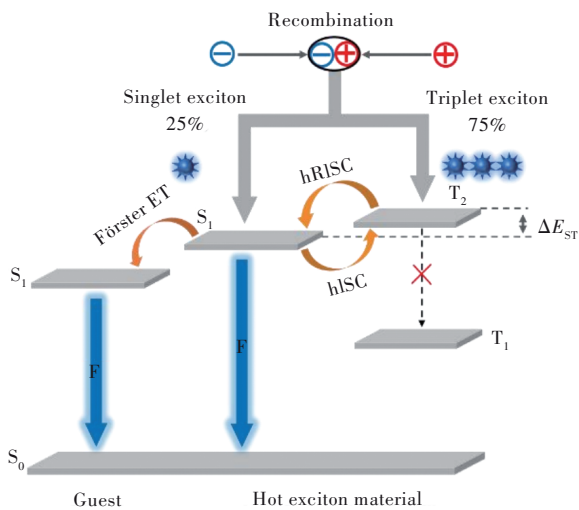


图 13 热激子有机荧光发光材料的电致发光机理图

Fig.13 Electroluminescence mechanism diagram of hot exciton organic fluorescence luminescence materials

华南理工大学马於光教授等^[38]设计合成了一种高效蓝光热激子有机发光材料(简称PAC),其分子结构和能级如图14所示。可以看到,该分子的 T_2 高于并接近 S_1 ,且 T_1 远离 S_1 ,保证了有效的热激子过程。因此,PAC的发光包含了从 T_2 到 S_1 反系间窜越过来的热激子,瞬态荧光衰减和磁电致发光特性测量很好地证明了这一点,并且也证明这种热激子反系间窜越是个数纳秒的快速过程,有效地避免了长寿命三线态激子的聚集。如此制备的非掺杂PAC为发光层的蓝光OLEDs显示了高效率 and 低效率滚降的特性。该器件发射很好的蓝光,色度坐标CIE为(0.15, 0.13),最大 η_{EQE} 达到了10.48%,在1000 cd/m^2 亮度下仍有7.54%,这对蓝光荧光OLEDs来说应该是非常好的性能。

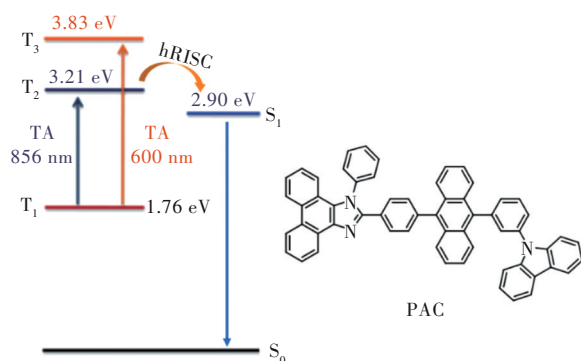
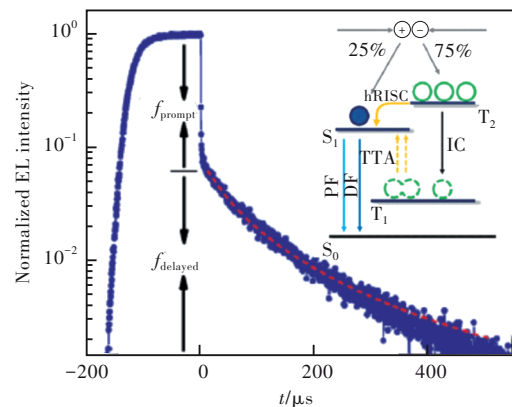


图 14 蓝光热激子有机发光材料PAC的能级和分子结构图

Fig.14 Schematic diagrams of the energy level and molecular structure of hot exciton organic luminescence material PAC

根据引言中的效率公式可以估算出PAC器件的内量子效率约为52.4%,这也意味着PAC器件内存在激子损耗。为了揭示这个损耗机制,我们测量了PAC器件的瞬态电致发光特性,如图15所示^[39]。可以看到,除了荧光发射的快速衰减部分,还存在一个衰减寿命长达91.7 μs 的部分,远远超过了通常TTA上转换产生的延迟时间。我们把这部分超长荧光发射归于 T_2 上的激子部分内转换到 T_1 并产生的TTA上转换过程,显然这是一个慢过程,也造成了激子损耗。为了进一步提高器件效率,我们在PAC中掺杂了一种高效荧光有机发光客体分子(简称BD),制备了PAC掺杂蓝光荧光OLEDs,最大 η_{EQE} 达到了17.4%,在1000 cd/m^2 亮度下也有11.6%。激子动力学研究表明,荧光客体DB的掺杂加速了PAC分子内从 T_2 到 S_1 的反系间窜越速率,降低了到 T_1 的内转换激子损耗,该结果为高效率热激子有机发光材料的设计提供了思路。

图 15 非掺杂PAC蓝光荧光OLEDs的瞬态电致发光衰减特性,其中红色短虚线是TTA模型的拟合结果。图内给出了PAC器件的电致发光过程^[39]。Fig.15 Transient electroluminescence decay curve of the non-doped PAC blue fluorescence OLEDs. The red dashed line is the fitting result using the TTA model. The inset gives the electroluminescence processes of the PAC-based device^[39].

热激子的高效发光特性在AIE材料中也得到了很好的验证。最近的研究发现^[14, 40-43],许多用AIE材料为发光层制备的蓝光荧光OLEDs,其 η_{EQE} 都超过了5%的理论极限。除了在薄膜状态下具有高的 η_{PL} 外,能级图清楚地表明了AIE材料的电致发光包括了从 $T_n(n \geq 2)$ 到 S_1 的热激子过程,并且发现高激发态 T_n 的能级位置对器件效率有很大影响^[43]。图16给出了两个AIE材料(简称

CN-TPB-TPA 和 TPBCzC1) 的分子结构及其理论计算的能级图, 它们都具有热激子发射的特征, CN-TPB-TPA 是从 T_3 到 S_1 , 而 TPBCzC1 是从 T_4 到 S_1 。通过比较可以看到, CN-TPB-TPA 的器件效率达到了 8.5%, 远远高于 TPBCzC1 的 4.5%。因此, 设计热激子材料时, 应充分考虑能级的影响。

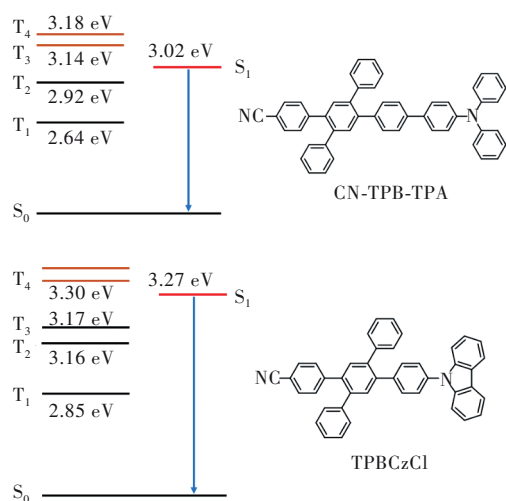


图 16 CN-TPB-TPA 和 TPBCzC1 的理论计算的能级和分子结构图

Fig.16 Schematic diagrams of the calculated energy levels and molecular structures of CN-TPB-TPA and TPBCzC1

3 总结与展望

作为新一代显示和照明技术, OLEDs 迫切需要开发高效率、长寿命和低成本有机电致发光材料, 材料作为 OLEDs 的重要组成部分, 也是最核心技术, 直接制约 OLEDs 产业的发展。磷光有机发光材料具有高效率的特点, 但其高昂的成本和严重的效率滚降, 以及蓝光材料寿命短等问题, 大大限制了 OLEDs 的发展; 虽然热活化延迟荧光有机发光材料具有高效率 and 低成本的优点, 但严重

的效率滚降和寿命问题使其还无法在 OLEDs 产品上进行应用; 传统荧光有机发光材料虽然具有低效率滚降、长寿命、低成本的优点, 但低效率也限制了其应用。更为重要的是, 这些材料的核心专利大部分被国外企业所垄断, 严重制约了我国 OLEDs 产业的发展, 我国迫切需要发展具有自主知识产权的 OLEDs 材料, 实现材料国产化, 解决“卡脖子”的问题。

如上所述, 目前有多种手段和方法通过实现三线态激子能量到单线态能级的转换来提高荧光有机发光材料的效率, 特别是热激子和聚集诱导发光材料的成功开发, 为高效率、长寿命、低成本 OLEDs 材料的设计与合成提供了新的思路, 也为材料国产化奠定了基础。

热激子和聚集诱导发光的概念是由我国科学家提出并应用在 OLEDs 中, 目前还需要我国科研工作者和企业共同努力, 开展深入研究, 提高材料性能。热激子材料具有 100% 激子发射的特性, 但存在薄膜荧光量子效率偏低的问题; 而聚集诱导发光材料具有在薄膜状态下高荧光量子效率的优点, 但器件中仍存在激子损耗, 如果能把热激子和聚集诱导发光材料的优点结合在一起, 通过调控三线态激子与单线态激子的能级位置, 设计合成更高性能的荧光有机发光材料, 应该是未来的发展方向。

总之, 热激子和聚集诱导发光材料展现了美好的应用前景, 我们有理由相信, 随着材料性能的不斷提高, 未来在 OLEDs 产品中会有更多材料、工艺, 甚至器件和装备等实现国产化, 这对推动我国 OLEDs 产业的发展无疑具有重要意义。

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.20220259>.

参 考 文 献:

- [1] FORREST S R. *Organic Electronics: Foundations to Applications* [M]. Oxford, United Kingdom: Oxford University Press, 2020.
- [2] 彭俊彪, 兰林锋. 印刷显示材料与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.
PENG J B, LAN L F. *Printed Display Materials and Technology* [M]. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese)
- [3] 于军胜, 黄维. *OLED 显示技术* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2021.
YU J S, HUANG W. *OLED Display Technology* [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2021. (in Chinese)
- [4] WU Z B, MA D G. Recent advances in white organic light-emitting diodes [J]. *Mater. Sci. Eng. R*, 2016, 107: 1-42.

- [5] TANG C W, VANSLYKE S A. Organic electroluminescent diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, 51(12): 913-915.
- [6] BALDO M A, O'BRIEN D F, YOU Y, *et al.* Highly efficient phosphorescent emission from organic electroluminescent devices [J]. *Nature*, 1998, 395(6698): 151-154.
- [7] MA Y G, ZHANG H Y, SHEN J C, *et al.* Electroluminescence from triplet metal-ligand charge-transfer excited state of transition metal complexes [J]. *Synth. Met.*, 1998, 94(3): 245-248.
- [8] UOYAMA H, GOUSHI K, SHIZU K, *et al.* Highly efficient organic light-emitting diodes from delayed fluorescence [J]. *Nature*, 2012, 492(7428): 234-238.
- [9] BRÜTTING W, FRISCHEISEN J. Device efficiency of organic light-emitting diodes [M]. BRÜTTING W, ADACHI C. *Physics of Organic Semiconductors*. Weinheim: Wiley-VCH, 2012.
- [10] KIDO J, IZUMI Y. Fabrication of highly efficient organic electroluminescent devices [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, 73(19): 2721-2723.
- [11] NAKANOTANI H, HIGUCHI T, FURUKAWA T, *et al.* High-efficiency organic light-emitting diodes with fluorescent emitters [J]. *Nat. Commun.*, 2014, 5: 4016-1-7.
- [12] WANG Q, TIAN Q S, ZHANG Y L, *et al.* High-efficiency organic light-emitting diodes with exciplex hosts [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2019, 7(37): 11329-11360.
- [13] XU Y W, XU P, HU D H, *et al.* Recent progress in hot exciton materials for organic light-emitting diodes [J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2021, 50(2): 1030-1069.
- [14] MA D G. Status and prospects of aggregation-induced emission materials in organic optoelectronic devices [J]. *Top. Curr. Chem.*, 2021, 379(3): 16.
- [15] CHIANG C J, KIMYONOK A, ETHERINGTON M K, *et al.* Ultrahigh efficiency fluorescent single and Bi-layer organic light emitting diodes: the key role of triplet Fusion [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2013, 23(6): 739-746.
- [16] SUZUKI T, NONAKA Y, WATABE T, *et al.* Highly efficient long-life blue fluorescent organic light-emitting diode exhibiting triplet-triplet annihilation effects enhanced by a novel hole-transporting material [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2014, 53(5): 052102-1-6.
- [17] KUKHTA N A, MATULAITIS T, VOLYNIUK D, *et al.* Deep-blue high-efficiency TTA OLED using *para*- and *meta*-conjugated cyanotriphenylbenzene and carbazole derivatives as emitter and host [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2017, 8(24): 6199-6205.
- [18] TANG X Y, BAI Q, SHAN T, *et al.* Efficient nondoped blue fluorescent organic light-emitting diodes (OLEDs) with a high external quantum efficiency of 9.4%@1 000 cd m⁻² based on phenanthroimidazole-anthracene derivative [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2018, 28(11): 1705813-1-8.
- [19] SALEHI A, DONG C, SHIN D H, *et al.* Realization of high-efficiency fluorescent organic light-emitting diodes with low driving voltage [J]. *Nat. Commun.*, 2019, 10(1): 2305-1-9.
- [20] LIU F T, LIU H, TANG X Y, *et al.* Novel blue fluorescent materials for high-performance nondoped blue OLEDs and hybrid pure white OLEDs with ultrahigh color rendering index [J]. *Nano Energy*, 2020, 68: 104325-1-10.
- [21] NALAOH P, SUNGWORAWONGPANA N, CHASING P, *et al.* A dimeric π -stacking of anthracene inducing efficiency enhancement in solid-state fluorescence and non-doped deep-blue triplet-triplet annihilation organic light-emitting diodes [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2021, 9(17): 2100500-1-13.
- [22] LIM H, WOO S J, HA Y H, *et al.* Breaking the efficiency limit of deep-blue fluorescent OLEDs based on anthracene derivatives [J]. *Adv. Mater.*, 2022, 34(1): 2100161-1-8.
- [23] XIAO S, QIAO X F, LIN C W, *et al.* *In situ* quantifying the physical parameters determining the efficiency of OLEDs relying on triplet-triplet annihilation up-conversion [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2022, 10(6): 2102333-1-8.
- [24] XIANG C Y, PENG C, CHEN Y, *et al.* Origin of sub-bandgap electroluminescence in organic light-emitting diodes [J]. *Small*, 2015, 11(40): 5439-5443.
- [25] CHEN Q S, JIA W Y, CHEN L X, *et al.* Determining the origin of half-bandgap-voltage electroluminescence in bifunctional rubrene/C60 devices [J]. *Sci. Rep.*, 2016, 6: 25331-1-9.
- [26] QIAO X F, YUAN P S, MA D G, *et al.* Electrical pumped energy up-conversion: a non-linear electroluminescence process mediated by triplet-triplet annihilation [J]. *Org. Electron.*, 2017, 46: 1-6.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] SARMA M, WONG K T. Exciplex: an intermolecular charge-transfer approach for TADF [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, 10(23): 19279-19304.
- [31] KIM H B, KIM J J. Recent progress on exciplex-emitting OLEDs [J]. *J. Inf. Disp.*, 2019, 20: 105-121.
- [32] SARMA M, CHEN L M, CHEN Y S, *et al.* Exciplexes in OLEDs: principles and promises [J]. *Mater. Sci. Eng. R*, 2022, 150: 100689.
- [33] LIU X K, CHEN Z, ZHENG C J, *et al.* Nearly 100% triplet harvesting in conventional fluorescent dopant-based organic light-emitting devices through energy transfer from exciplex [J]. *Adv. Mater.*, 2015, 27(12): 2025-2030.
- [34] KIM K H, MOON C K, SUN J W, *et al.* Triplet harvesting by a conventional fluorescent emitter using reverse intersystem crossing of host triplet exciplex [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2015, 3(7): 895-899.
- [35] SHIH C J, LEE C C, YEH T H, *et al.* Versatile exciplex-forming co-host for improving efficiency and lifetime of fluorescent and phosphorescent organic light-emitting diodes [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, 10(28): 24090-24098.
- [36] TANG X T, PAN R H, ZHAO X, *et al.* Full confinement of high-lying triplet states to achieve high-level reverse intersystem crossing in rubrene: a strategy for obtaining the record-high EQE of 16.1% with low efficiency roll-off [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2020, 30(51): 2005765-1-10.
- [37] LI W J, LIU D D, SHEN F Z, *et al.* A twisting donor-acceptor molecule with an intercrossed excited state for highly efficient, deep-blue electroluminescence [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2012, 22(13): 2797-2803.
- [38] XU Y W, LIANG X M, ZHOU X H, *et al.* Highly efficient blue fluorescent OLEDs based on upper level triplet-singlet intersystem crossing [J]. *Adv. Mater.*, 2019, 31(12): 1807388-1-8.
- [39] LIN C W, HAN P B, XIAO S, *et al.* Efficiency breakthrough of fluorescence OLEDs by the strategic management of “hot excitons” at highly lying excitation triplet energy levels [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2021, 31(48): 2106912-1-8.
- [40] XU Z, GU J B, QIAO X F, *et al.* Highly efficient deep blue aggregation-induced emission organic molecule: a promising multifunctional electroluminescence material for blue/green/orange/red/white OLEDs with superior efficiency and low roll-off [J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(3): 767-778.
- [41] GUO X M, YUAN P S, QIAO X F, *et al.* Mechanistic study on high efficiency deep blue AIE-based organic light-emitting diodes by magneto-electroluminescence [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2020, 30(9): 1908704-1-8.
- [42] ZHANG H, ZHANG B, ZHANG Y W, *et al.* A multifunctional blue-emitting material designed *via* tuning distribution of hybridized excited-state for high-performance blue and host-sensitized OLEDs [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2020, 30(35): 2002323-1-10
- [43] GUO X M, YUAN P S, FAN J Z, *et al.* Unraveling the important role of high-lying triplet-lowest excited singlet transitions in achieving highly efficient deep-blue AIE-based OLEDs [J]. *Adv. Mater.*, 2021, 33(11): 2006953-1-8.



马东阁(1967–),男,辽宁兴城人,博士,教授,博士生导师,1995年于吉林大学获得博士学位,主要从事有机光电器件与物理及其应用的研究。
E-mail: msdgm@scut.edu.cn