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

**TCTA在外电场下的双分子发光现象**

张力江，赵饶缘，刘博旭，朱鹏达，吕昭月

引用本文:
张力江, 赵饶缘, 刘博旭, 等. TCTA在外电场下的双分子发光现象[J]. 发光学报, 2020, 41(6): 700–706.
ZHANG Li–jiang, ZHAO Rao–yuan, LIU Bo–xu, et al. Bimolecular Emission of TCTA Under External Electric Field[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(6): 700–706.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3788/fgxb20204106.0700

---

**您可能感兴趣的其他文章**

Articles you may be interested in

超薄发光层结构的荧光型白光有机发光器件

Performance of Fluorescent White Organic Light–emitting Device by Introducing Ultrathin Emitting Layer

发光学报. 2015, 36(6): 645–650 https://doi.org/10.3788/fgxb20153606.0645

空穴传输层对有机电致发光器件性能的影响

The Electroluminescent Performance of OLED Based on Different Hole Transport Layer

发光学报. 2013, 34(11): 1457–1461 https://doi.org/10.3788/fgxb20133411.1457

电子主体材料对蓝光OLED的影响

Effects of Host and Electron Transport Materials on Blue Organic Light–emitting Diodes

发光学报. 2018, 39(7): 955–960 https://doi.org/10.3788/fgxb20183907.0955

非掺杂型高效绿色磷光有机电致发光器件

High Efficiency Green Phosphorescent Organic Light Emitting Diodes Using An Ultrathin Nondoped Emitting Layer

发光学报. 2016, 37(8): 961–966 https://doi.org/10.3788/fgxb20163708.0961

TCTA对红绿磷光有机电致发光器件发光层激子的调控作用

Effect of TCTA Layer on Exciton Positions of Red and Green Phosphorescent Organic Light Emitting Diodes

发光学报. 2013, 34(7): 877–881 https://doi.org/10.3788/fgxb20133407.0877

文章编号：1000-7032(2020)06-0700-07

# TCTA 在外电场下的双分子发光现象

张力江[1†]，赵饶缘[2†]，刘博旭[2]，朱鹏达[3]，吕昭月[1*]
(1. 华东理工大学 理学院，上海　200237；2. 华东理工大学 中德工学院，上海　200237；
3. 华东理工大学 材料科学与工程学院，上海　200237)

**摘要：** 制备了三苯胺化合物 4,4′,4″-三(咔唑-9-基)三苯胺(TCTA)的单层器件 ITO/$MoO_3$/TCTA/LiF/Al 和 TCTA/TPBi 双层异质结器件 ITO/NPB/TCTA/TPBi/Bphen/LiF/Al，研究了 TCTA 的双分子发光现象。通过测试器件的光电性能和薄膜的稳态光谱，得出以下结论：(1)单层器件的电致发光光谱有 425 nm 和 600 nm 两个发光峰。与 TCTA 薄膜的光致发光光谱对比，可知 425 nm 附近的蓝色发光峰来源于 TCTA 单体发光，而 600 nm 附近的橙色发光应为 TCTA 二聚体 electromer 的发光。蓝色和橙色发光混合，使单层器件发光颜色表现为白色，对应色坐标为(0.381，0.343)。(2)TCTA/TPBi 双层异质结器件的电致发光光谱为 440 nm 的单峰，器件的最大发光亮度为 930 cd/$m^2$，发光性能明显优于单层器件。结合薄膜 TCTA、TPBi 和 TCTA/TPBi 的光致发光光谱和紫外-可见光吸收光谱，可知双层器件的发光来自 $TCTA^+TPBi^-$ 电致激基复合物。双层器件表现出良好的色稳定性，电压在 6～11 V 范围，CIE 色坐标为(0.18±0.01，0.14±0.01)。

**关　键　词：** TCTA；electromer；eletroplex；双分子激发态
**中图分类号：** O482.3；TN248　　**文献标识码：** A　　**DOI：** 10.3788/fgxb20204106.0700

# Bimolecular Emission of TCTA Under External Electric Field

ZHANG Li-jiang[1†], ZHAO Rao-yuan[2†], LIU Bo-xu[2], ZHU Peng-da[3], LYU Zhao-yue[1*]
(1. *School of Science, East China University of Science and Technology, Shanghai* 200237, *China*;
2. *Sino-German College of Technology, East China University of Science and Technology, Shanghai* 200237, *China*;
3. *School of Materials Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai* 200237, *China*)
* *Corresponding Author, E-mail: lvzhaoyue@ecust.edu.cn*

**Abstract:** In order to investigate bimolecular excited state emission of 4, 4, 4-tris(N-carbazolyl) triphenylamine(TCTA), a single-layer device(ITO/$MoO_3$/TCTA/LiF/Al) and a bilayer heterojunction device(ITO/NPB/TCTA/TPBi/Bphen/LiF/Al) were fabricated, respectively. Optical and electrical characteristics of devices and steady-state spectra of films were measured. The following conclusions are drawn. (1)Electroluminescent (EL) spectra of single layer devices demonstrate two emission peaks: 425 nm and 600 nm. The peak at 425 nm is originated from the emission of TCTA monomer according to photoluminescent (PL) spectrum of TCTA film, and the peak centered at 600 nm is attributed to the emission from electromer. White color with 1931 CIE values of (0.381, 0.343) was obtained for the single layer devices because of the superposition of blue emission peaked at 425 nm and orange emission centered at 600 nm. (2)TCTA/TPBi bilayer device exhibited EL spectra peaked at 440 nm, which is belonged to the emission of $TCTA^+TPBi^-$ electroplex according to the PL and UV-Vis absorption spectra of TCTA, TPBi and TCTA/TPBi films. Meanwhile, better

**收稿日期：** 2020-03-23；**修订日期：** 2020-04-23
**基金项目：** 华东理工大学大学生创新训练项目(X19184)资助
Supported by Innovation Training Program for College Students of East China University of Science and Technology(X19184)
†：共同贡献作者

properties were shown in the bilayer device than those of single devices. The maximum brightness was 930 cd/m$^2$ and CIE coordinates were (0.18 ±0.01, 0.14 ±0.01) for applied voltages varying from 6 V to 11 V.

**Key words**: TCTA; electromer; electroplex; bimolecular excited state

## 1 引　　言

有机发光二极管(Organic light-emitting diode,OLED)是一种电注入式半导体发光器件,在显示、照明等领域具有广阔的应用前景[1-3]。这主要源自 OLED 的诸多优点:柔性、透明、可弯曲;全固化;自发光、响应速度快、视角广、对比度高;有机材料色彩丰富、选择性多等。目前,OLED 在信息显示领域已实现产业化,广泛应用于手机等便携式智能电子产品中,如华为 P40&P30 系列、iPhone 11 和 X 系列(XR 除外)、三星 Galaxy 系列等。OLED 因其质量轻、超薄、柔性、透明等特点将颠覆传统照明和显示领域,蕴含着巨大的学术和商业价值,自 1987 年华人科学家邓青云(Tang C W)发明以来广受研究人员的青睐,至今仍是发光与信息显示领域的研究热点[4-6]。

高性能的 OLED 器件一般采用多层结构,从功能来看,除了发光层外,还需电子注入/传输层、空穴注入/传输层、激子阻挡层等。苯胺类化合物在高性能器件中起着举足轻重的作用。如 TPD (N, N′-Bis (3-methylphenyl)-N, N′-bis (phenyl)-benzidine;N,N′-二(3-甲基苯基)-N,N′-二苯基-1,1′-联苯-4,4′-二胺)、TCTA(4,4′,4″-tris(carbazol-9-yl) triphenyl-amine;4,4′,4″-三(咔唑-9-基)三苯胺),因具有较大的空穴迁移率、较深的 HOMO (The highest occupied molecular orbitals)和较浅的 LUMO(The lowest unoccupied molecular orbitals)能级,常被用作空穴传输层(Hole transport layer, HTL)、激子限制层(Exciton confinement)等[7-8]。同时,苯胺化合物还具有较高的第一激发三重态能级(Triplet energy, $T_1$),可以作磷光主体材料(Host material),TCTA 就是典型的优良磷光主体材料[9]。

苯胺类化合物容易产生双分子激发态,如激基缔合物(excimer)、电致激基缔合物(electromer)、激基复合物(exciplex)、电致激基复合物(electroplex)。缔合物是同种分子形成的双分子激发态,而复合物是两种不同分子之间的双分子激发态,早期也称作 hetero-excimer[10]。发光光谱表现为:excimer 和 exciplex 在光致发光(Photoluminescence, PL)光谱和电致发光(Electroluminescence, EL)光谱中都能观察到[3,8,11-12],而 electromer 和 electroplex 只在 EL 光谱中出现,PL 光谱中不存在[13-14]。

一般而言,双分子激发态与正常激子形成发光竞争关系,导致器件发光效率低;能量相对正常激子较低[15],使发光产生红移、器件色稳定性差。但近年来,双分子激发态越来越受到研究人员青睐,原因是它们可以作为磷光材料[16-17]、热活化延迟荧光材料(Thermally activated delayed fluorescence, TADF)[3,18-19]的主体材料,改善器件性能。鉴于此,理解苯胺化合物的双分子激发态发光特性对高性能器件结构的优化设计具有重要的指导意义。本文选取 OLED 中广泛使用的三苯胺化合物 TCTA,以 TCTA 单层和 TCTA/TPBi 双层异质结为发光层制备器件,研究了 TCTA 的双分子发光特性。

## 2 实　　验

### 2.1 实验材料

表 1 是实验所用材料的简写和英文全称。ITO 导电玻璃,表面电阻 10 Ω/□,购于深圳华南

**表 1　实验中所用材料对应的英文全称**

Tab. 1　Material full names used in the experiment

| 简称 | 英文全称 |
|---|---|
| ITO | Indium-tin oxide |
| $MoO_3$ | Molybdenum trioxide |
| LiF | Lithium fluoride |
| Al | Alumium |
| NPB | N,N′-Bis(naphthalene-1-yl)-N,N′-bis(phenyl)-benzidine |
| TCTA | 4,4′,4″-tris(N-carbazolyl) triphenylamine |
| TPBi | 1,3,5-tris(1-phenyl-1H-benzimidazol-2-yl) benzene |
| Bphen | 4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline |

湘城科技有限公司;$MoO_3$ 购自百灵威科技有限公司;NPB、TCTA、TPBi、Bphen、LiF 均购自中国台湾 Lumtec 科技有限公司;金属 Al 购于中诺新材(北京)科技有限公司。实验所用有机材料分子结构如图1 所示。实验时,所有材料未经提纯直接使用。

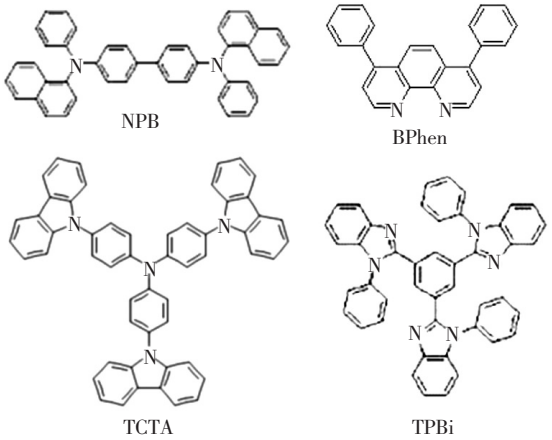



图1 实验所用有机材料的分子结构

Fig. 1 Molecular structures of organic materials in the experiment

### 2.2 器件制备

实验制备了两组器件:TCTA 单层器件(Single-layer device)和以 TCTA/TPBi 双层异质结为核心的多层器件(Multilayer device)。A 组,单层器件,结构为:ITO/$MoO_3$(5 nm)/TCTA($x$ nm)/LiF(0.5 nm)/Al(120 nm),$x$ = 100,120 分别命名为 A1 和 A2。其中,ITO 为阳极,$MoO_3$ 为阳极缓冲层(空穴注入层),TCTA 为发光层兼载流子传输层,LiF 为电子注入层,Al 为阴极。B 器件为多层结构:ITO/NPB(30 nm)/TCTA(10 nm)/TPBi(10 nm)/Bphen(40 nm)/LiF(0.5 nm)/Al(120 nm)。NPB 为空穴传输层、TCTA 为空穴传输层兼发光层、TPBi 和 Bphen 为电子传输层,NPB、BPhen 是为了使 ITO 阳极与 TCTA、Al 阴极与 TPBi 之间形成阶梯势垒,有助于载流子注入(后文通过能级结构详述)。

制备器件前,首先对 ITO 透明导电电极进行常规处理:ITO 玻璃置于 200 mL 的烧杯中,依次用去离子水、酒精、丙酮超声清洗,每种溶液超声两遍,每次 10 min;然后用压缩空气吹干玻璃表面残留液体;最后紫外臭氧处理 10 min。

处理好的 ITO 玻璃基片放入多源有机分子气相沉积系统(LN-386SA),依据器件结构顺次蒸镀各功能层。蒸镀过程中,腔内气压维持在 $5\times10^{-4}$ Pa 以下,用6 MHz 石英晶振监测蒸镀速率和厚度。通常,有机材料的沉积速率约 0.1 nm/s,$MoO_3$ 约 0.04 nm/s, LiF 约 0.02 nm/s,Al 电极速率需 1.0 ~ 2.0 nm/s。通过掩膜版控制发光面积,Al 电极与 ITO 电极的重叠区域为器件有效发光面积(本实验为 2 mm × 2 mm)。

### 2.3 性能表征

器件制备好后,未封装,直接取出,在室温、大气环境中测试器件的光电性能,包括电流密度-电压-亮度和电致发光光谱。电压-电流密度由 Keithley2400 记录,亮度和电致发光光谱由 Konica Minolta CS2000 分光光度计记录。

另外,通过 LS-55 荧光光谱仪和 Lambda 950 紫外-可见-近红外吸收光谱仪分别测试薄膜 TCTA、TPBi 及 TCTA/TPBi 的光致发光光谱和吸收光谱。

## 3 结果与讨论

### 3.1 TCTA 单层器件的双分子发光

TCTA 单层器件 A1 和 A2 的 EL 光谱如图 2 所示,图中显示 TCTA 单层器件在电激发下有两个发光峰:(425 ± 10) nm 和(600 ± 10) nm。与 TCTA 的 PL 光谱(峰值为 401 nm)对比发现,425 nm 附近的发光峰应来自 TCTA 分子的单体(monomer)发光。600 nm 的发光只在 EL 光谱中出现,应是电场作用下的电荷转移态 electromer 的发光。即外加电场时,相邻两个 TCTA 分子分别捕获电子和空穴形成 $TCTA^-$ 和 $TCTA^+$,分子间产生交叉跃迁导致的发光。两个相邻分子形成的电

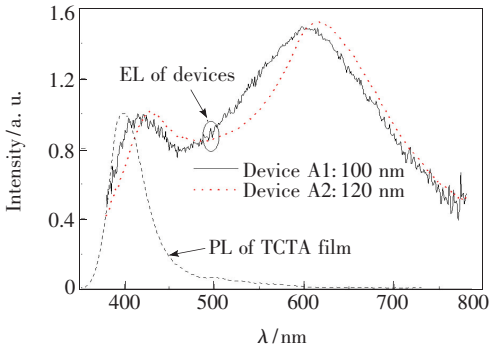



图2 器件 A1、A2 的电致发光光谱和 TCTA 薄膜的光致发光光谱。

Fig. 2 EL spectra of A1&A2 devices and PL spectrum of TCTA film

子-空穴对激发态，其能量比同一个分子上形成的激发态能量低[15]，因此双分子激发态的发光波长比单体发光长。同时，EL 光谱中 TCTA 单体的发光峰相比 PL 光谱有一定的红移，原因是 EL 中 electromer 发光表现为非特征发光，其半高全宽（Full width at half maximum，FWHM）很大，与单体发光叠加时，导致单体发光峰红移。

假定 monomer 和 electromer 的发光光谱是高斯型，器件发光是二者的线性叠加，对器件 EL 光谱进行高斯分解，可获得 monomer 和 electromer 各自的发光光谱，如图 3 所示。二者线性叠加合成的曲线（图 3 中 Fitting curve 所示）与实测光谱曲线较好地吻合。

由分解获得的 monomer 和 electromer 光谱可计算对应的色坐标：A1 和 A2 器件中，monomer 色坐标分别为（0.296，0.265）、（0.275，0.251），偏蓝色；electromer 的色坐标对应为（0.400，0.402）和（0.426，0.399 8），偏橙色。单分子（monomer）蓝色发光和双分子（electromer）橙色发光叠加，使器件发光颜色位于白光区域，A1、A2 的色坐标分别为（0.379，0.365）和（0.381，0.343）。上述色坐标在 1931 CIE 色坐标中的位置如图 4 所示。

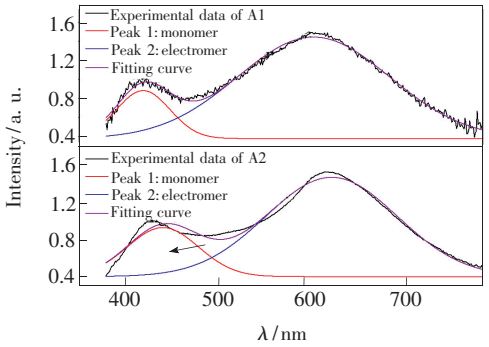



图 3　器件 A1 和 A2 电致发光光谱的高斯分解

Fig. 3　Gaussian decomposition of EL spectra of A1&A2 devices

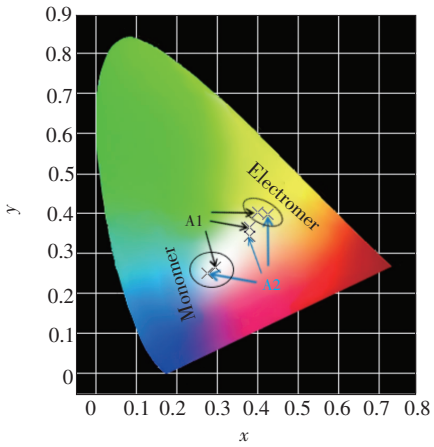



图 4　器件 A1、A2 的 EL 光谱和高斯分解获得的 monomer 和 electromer 发光光谱对应的色坐标。

Fig. 4　CIE coordination of EL spectra devices A1&A2, and monomer and electromer emission *via* Gaussian fitting.

作为空穴传输材料[20]，TCTA 的空穴迁移率高于电子迁移率，单层器件中空穴浓度多于电子，载流子浓度不平衡，阳极注入的空穴大部分直接泄露至阴极，因此器件发光很弱，效率很低。随着 TCTA 厚度的增加，发光亮度略有增加，光谱曲线更平滑。

### 3.2　TCTA 与 TPBi 形成的双分子发光

三苯胺化合物含三苯胺给电子基团，不仅自身可以形成二聚体（dimer）产生双分子发光（excimer 或 electromer），还可以与电子受体材料形成异质的双分子发光（exciplex，electroplex）。为研究 TCTA 与电子传输材料产生的双分子发光情况，实验中选取 TPBi，通过二者形成双层异质结（Bilayer heterojunction）制备器件 B：ITO/NPB/TCTA/TPBi/Bphen/LiF/Al。

B 器件的 EL 光谱如图 5 所示，发光峰位于 440 nm，该发光峰在 TCTA、TPBi 或 TCTA/TPBi 薄膜的 PL 光谱中未观察到，而且相对于 TCTA（峰位于 401 nm）、TPBi（峰位于 384 nm）的发光有较大的红移。同时，图 5 中 TCTA、TPBi 和 TCTA/TPBi 的紫外-可见吸收光谱表明，TCTA/TPBi 相对 TCTA、TPBi 没有新吸收峰，即 TCTA/TPBi 界面未生成新物质。因此，B 器件 440 nm 发光峰

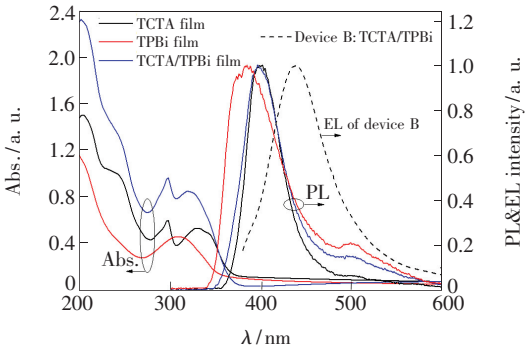



图 5　TCTA、TPBi、TCTA/TPBi 薄膜的吸收光谱、光致发光光谱及器件 B 的电致发光光谱。

Fig. 5　Absorption and PL spectra of TCTA, TPBi and TCTA/TPBi films, and EL spectrum of device B.

是外加电场下,空穴和电子在 TCTA、TPBi 之间交叉跃迁导致的,即界面电致激基复合物(electroplex)发光。器件 B 的 EL 光谱中未观察到 600 nm 附近的发光峰,说明双层异质结 TCTA/TPBi 器件中 TCTA electromer 的发光被抑制了。

TCTA/TPBi 界面电致激基复合物的跃迁发光可通过能级结构分析,如图 6 所示,图中相关材料的能级值摘自文献[21]。空穴和电子分别从 ITO 阳极和 LiF/Al 阴极注入,经 NPB 或 BPhen 形成的阶梯势垒,更有效地进入 TCTA、TPBi 中。当空穴到达 TCTA、继续向阴极方向迁移时,由于 TPBi 和 TCTA 的 HOMO 能级之间有 0.4 eV 的势垒,且 TPBi 的空穴迁移率很低[22],空穴会在 TCTA/TPBi 界面累积,使部分 TCTA 分子带正电形成 $TCTA^+$;同理,电子到达 TPBi、向 TCTA 迁移时,TPBi 和 TCTA 的 LUMO 能级之间存在 0.4 eV 的势垒,且 TCTA 中电子迁移率低[20],于是,部分电子堆积在 TPBi/TCTA 界面使 TPBi 分子带负电形成 $TPBi^-$。$TCTA^+$ 与 $TPBi^-$ 复合发光形成 electroplex 的发光,即

$$(TCTA^+\ TPBi^-) \rightarrow (TCTA\ TPBi) + h\nu, \quad (1)$$

理论上,electroplex 发射的光子能量可以通过给体离化势(Ionization potential,即 HOMO 能级)和受体亲和能(Electron affinity,即 LUMO 能级)定量计算:

$$h\nu \approx HOMO_{(TCTA)} - LUMO_{(TPBi)} - C, \quad (2)$$

其中,$C$ 是库伦相互作用能[10]。若 $C$ 等于零,图 6 中能级值代入公式(2)可得 electroplex 的波长约为 429 nm。考虑库伦相互作用,理论计算波长数值会更大些,与实验所测 440 nm 吻合。

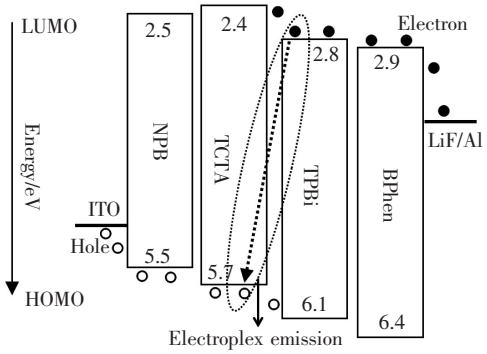



图 6 器件 B 的能级结构图

Fig. 6 Energy level diagram of device B

图 7 是器件 B 在不同电压下的电致发光光谱,随着电压的变化,光谱的峰位、半高全宽几乎

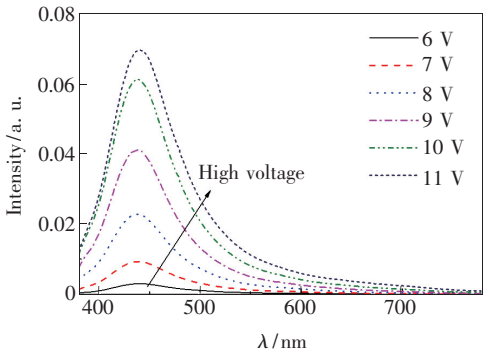



图 7 不同驱动电压下,器件 B 的电致发光光谱。

Fig. 7 EL spectra of device B at various operation voltages

不变。经计算,[6 V,11 V]电压区间内,器件色坐标在(0.18 ± 0.01,0.14 ± 0.01)范围内变化,即电压对色坐标的影响很小,如图 8 所示。

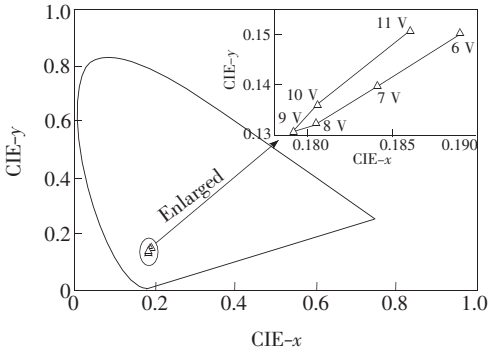



图 8 器件 B 不同电压下的 CIE 色坐标

Fig. 8 CIE coordinates of device B under different voltages

图 9 是器件 B 的亮度-电压-电流密度和电流效率-电流密度曲线。20 mA/cm² 电流密度下,亮度为 87 cd/m²。器件的最大亮度为 930 cd/m²,最大电流效率约 0.44 cd/A。

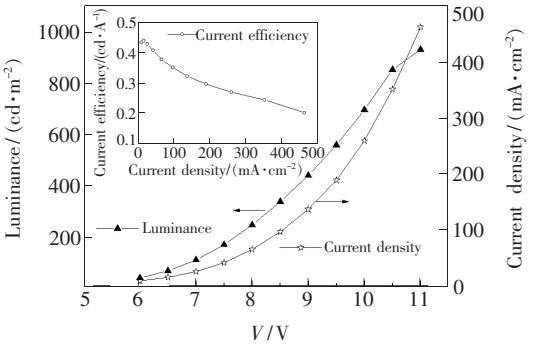



图 9 器件 B 的亮度-电压-电流密度曲线(插图为电流密度-电流效率曲线)

Fig. 9 Characteristics of luminance-voltage-current density (Inset: current efficiency-current density plot) for device B

## 4 结　　论

实验制备了 TCTA 单层器件(ITO/$MoO_3$/TCTA/LiF/Al)和 TCTA/TPBi 双层异质结器件(ITO/NPB/TCTA/TPBi/Bphen/LiF/Al)。单层器件中,除了 TCTA 的本征发光外,还观察到发光峰位于 600 nm 附近的 TCTA 二聚体 electromer 发光。TCTA 的蓝色本征发光和 electromer 的橙色发光混合,使单层器件的发光位于白光区域,色坐标为(0.381,0.343)。不过,单层器件中,载流子严重不平衡,器件的发光亮度和效率都很低。而双层异质结器件的光谱主要表现为 $TCTA^+TPBi^-$ electroplex 的发光,峰值为 440 nm,electromer 发光在双层异质结中被抑制了。双层异质结发光稳定性良好,电压从 6 V 变化至 11 V 时,其色坐标变化为 ±0.01。另外,在双层异质结器件的阳极和阴极分别加入了 NPB 和 Bphen 形成阶梯势垒,使载流子注入更容易,器件性能更优,最大亮度可达 930 cd/$m^2$。

## 参 考 文 献:


[1] WU Y C, WU T Y, IGUCHI S, *et al.*. An inkjet printed 31-inch UHD AMOLED display [J]. *SID Sym. Digest. Tech. Papers*, 2018, 49(S1): 348-350.

[2] COBURN C, JEONG C, FORREST S R. Reliable, all-phosphorescent stacked white organic light emitting devices with a high color rendering index [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(2): 630-635.

[3] HE Z Y, WANG C Y, ZHAO J W, *et al.*. Blue and white solution-processed TADF-OLEDs with over 20% EQE, low driving voltages and moderate efficiency decrease based on interfacial exciplex hosts [J]. *J. Mater. Chem.* C, 2019, 7(38): 11806-11812.

[4] DING L, FO W F, LIU X Y, *et al.*. Highly efficient green phosphorescent organic light-emitting diodes based on tetraphenyl silicon derivative host materials [J]. *Org. Electron.*, 2020, 78: 105581-1-6.

[5] ZHENG X H, ZHAO J W, HUANG T T, *et al.*. Versatile host materials for highly-efficient green, red phosphorescent and white organic light-emitting diodes [J]. *Chem. Electro. Chem.*, 2019, 6(23): 5810-5818.

[6] SALEHI A, FU X Y, SHIN D H, *et al.*. Recent advances in OLED optical design [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2019, 29(15): 1808803-1-21.

[7] ZHANG Y L, RAN Q, WANG Q, *et al.*. High-performance sky-blue phosphorescent organic light-emitting diodes employing wide-bandgap bipolar host materials with thermally activated delayed fluorescence characteristics [J]. *Org. Electron.*, 2020, 81: 105660-1-9.

[8] JIANG J H, LIN X, LEI H, *et al.*. The effect of the exciplex heterojunction interlayer on efficiency roll-off in non-doped blue phosphorescent organic light-emitting diodes [J]. *Opt. Mater.*, 2020, 99: 109561-1-6.

[9] MU H C, JIANG Y X, XIE H. F. Electroluminescence performance of the blue, white and green-red organic light emitting diodes treated by *in-situ* heating [J]. *J. Lumin.*, 2018, 203: 554-567.

[10] GORDON M, WARE W R. *The Exciplex* [M]. New York: Academic Press Inc, 1975.

[11] BARYSHNIKOV G V, GAWRYS P, IVANIUK K, *et al.*. Nine-ring angular fused biscarbazoloanthracene displaying a solid state based excimer emission suitable for OLED application [J]. *J. Mater. Chem.* C, 2016, 4(24): 5795-5805.

[12] CHAPRAN M, ANGIONI E, FINDLAY N J, *et al.*. An ambipolar BODIPY derivative for a white exciplex OLED and cholesteric liquid crystal laser toward multifunctional devices [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2017, 9(5): 4750-4757.

[13] 朱唯一, 金敏峰, 屠燮豪, 等. 3DTAPBP 的双分子激发态——电致激基缔合物和激基复合物 [J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(8): 2344-2349.
ZHU W Y, JIN M F, TU X H, *et al.*. Bimolecular excited states based on 3DTAPBP: electromer and exciplex [J]. *Spectrosc. Spectr. Anal.*, 2018, 38(8): 2344-2349. (in Chinese)

[14] WEI M Y, GUI G, CHUNG Y H, *et al.*. Micromechanism of electroplex formation [J]. *Phys. Status Solidi* (B), 2015, 252(8): 1711-1716.

[15] TENG M Y, XU Q L, LI H Y, *et al.*. Color changeable OLEDs controlled by doping ratio and driving voltage with an anthracene derivative doped layer [J]. *RSC Adv.*, 2012, 2(27): 10175-10178.

[16] JUNG M, LEE K H, LEE J Y, *et al.*. A bipolar host based high triplet energy electroplex for an over 10 000 h lifetime in

pure blue phosphorescent organic light-emitting diodes [J]. *Mater. Horiz.*, 2020,7(2):559-565.

[17] WU M G,WANG Z J,LIU Y F,*et al.*. Non-doped phosphorescent organic light-emitting devices with an exciplex forming planar structure for efficiency enhancement [J]. *Dyes Pigments*, 2019,164:119-125.

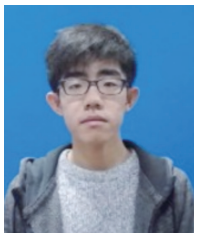
[18] FENG Y L,LU T T,LIU D,*et al.*. High-performance blue phosphorescent and thermally activated delayed fluorescent solution-processed OLEDs based on exciplex host by modifying TCTA [J]. *Org. Electron.*, 2019,67:136-140.

[19] WANG Z Q,WANG C,ZHANG H,*et al.*. The application of charge transfer host based exciplex and thermally activated delayed fluorescence materials in organic light-emitting diodes [J]. *Org. Electron.*, 2019,66:227-241.

[20] LEE D H,LIU Y P,LEE K H,*et al.*. Effect of hole transporting materials in phosphorescent white polymer light-emitting diodes [J]. *Org. Electron.*, 2010,11(3):427-433.

[21] WANG X,WANG R,ZHOU D L,*et al.*. Study of organic light-emitting diodes with exciplex and non-exciplex forming interfaces consisting of an ultrathin rubrene layer [J]. *Synth. Met.*, 2016,214:50-55.

[22] HU Y X,XIA X,HE W Z,*et al.*. Novel Ir(Ⅲ) complexes ligated with 2-(2,6-difluoropyridin-3-yl)benzo[d]thiazole for highly efficient OLEDs with mild efficiency roll-off [J]. *Dyes Pigments*, 2019,166:254-259.



**张力江**(1995 - ),男,天津人,硕士研究生,2019年于华东理工大学获得学士学位,主要从事有机发光二极管的研究。

E-mail: box_ks@163.com

**吕昭月**(1983 - ),女,云南镇雄人,博士,副教授,2012年于北京交通大学获得博士学位,主要从事有机光电子器件和材料的研究。

E-mail: lvzhaoyue@ecust.edu.cn

**赵饶缘**(1999 - ),女,江西上饶人,在读本科生,主要从事电子器件与电气自动化的研究。

E-mail: 992517034@qq.com