文章编号:1005-4642(2022)09-008-07

# 基于 HAT-CN/m-MTDATA 中间连接层的 叠层 OLED 光电性能研究

袁晟杰,张一鸣,马剑剑,田 野,吕昭月,谢海芬 (华东理工大学物理学院,上海 200237)

摘 要:有机发光二极管(Organic light-emitting diode, OLED)已广泛应用于手机等中小屏幕,叠层层 OLED 作为 提升器件寿命、亮度和效率的方法倍受关注.以 n 型材料 HAT-CN 和 p 型材料 m-MTDATA 构筑中间连接层、NPB/ C545T: Alq<sub>3</sub>/Alq<sub>3</sub> 为发光单元,通过多源真空沉积系统制备叠层 OLED.器件的光电性能表明:150 mA・cm<sup>-2</sup>电流密度 下,叠层器件的电流效率(5.7 cd/A)和发光亮度(8 557 cd・m<sup>-2</sup>)可达常规器件(2.3 cd/A,3 460 cd・m<sup>-2</sup>)的 2.5 倍,实现 了低驱动电流密度下的高亮度和高效率.

日常工作和生活所用的电子显示屏,主要有 液晶显示(Liquid crystal display, LCD)、发光二 极管(Light-emitting diode, LED)、有机发光二 极管 (Organic light-emitting diode, OLED)<sup>[1]</sup> 等. 其中,OLED 具有工艺简单、自发光、色彩丰 富、柔性、透明等特点,已经成为手机屏的标配. OLED 作为电流注入式器件,其发光亮度随电流 密度的增加而增大. 室外夜间照明应用场景要求 高亮度,器件的工作电流较大,而大电流密度下, 器件的有机功能层容易被破坏,导致工作寿命缩 短.为了解决这一难题,研究人员提出了叠层 OLED (Tandem OLED, TOLED)结构<sup>[2-3]</sup>,它由 中间连接层将 n(n≥2)个发光单元串联起来. TOLED 与常规单发光单元 OLED 相同(图1所 示),只有1对电极(阳极和阴极),电源的正负极 分别连接器件的阳极和阴极,空穴和电子分别从 器件阳极和阴极注入,并迁移至最近的发光层. 对于常规 OLED [图 1(a)],电子和空穴迁移至同 一个发光单元,并在该发光单元中相遇形成激子, 从而辐射发光;而 TOLED 中 图 1(b), 电子迁 移至阴极一侧的发光单元,空穴迁移至阳极一侧

的发光单元,它们分别与中间连接层提供的异号 载流子复合而发光.

通常,TOLED的发光亮度和电流效率是常 规单发光单元器件的 n 倍,高亮度时所需电流大 大降低,从而延长 OLED 的使用寿命. TOLED 的关键在于发光单元之间的中间连接层,有效的 中间连接层结构主要有:金属/金属氧化物<sup>[4]</sup>、有 机/金属(或金属氧化物)<sup>[5]</sup>、n 型掺杂/p 型掺 杂<sup>[3]</sup>、n 型/p 型<sup>[6]</sup>. 后两者都可称为 n/p 结中间 连接层,一个是掺杂形成 n 型或 p 型材料,另一个 是固有 n 型或 p 型材料. 其中,固有 n 型和 p 型 材料构建中间连接层研究更加广泛,因为这类材 料无需复杂的掺杂工艺且电荷容易从一种传输材 料转移至另一种传输材料形成富载流子体系,适 合做电荷产生层<sup>[7]</sup>.

n型材料 2, 3, 6, 7, 10, 11-六氰基-1, 4, 5, 8, 9, 12-六氮杂苯并菲(HAT-CN)常与空穴 传输材料形成 n/p结作为中间连接层,如HAT-CN/TAPC(1, 1-双[4-[N, N-二(对甲苯基)氨 基]苯基]环己烷)<sup>[6]</sup>、HAT-CN/NPB(N, N'-二 苯基-N, N'-(1-萘基)-1, 1'-联苯-4, 4'-二胺)<sup>[8]</sup>.

收稿日期:2022-01-25;修改日期:2022-04-24

基金项目:国家级大学生创新训练项目(No. 202110251091);上海高校市级重点课程《有机光电器件》虚拟仿真实验教 学项目(沪教委[2020]58号)

作者简介:袁晟杰(2000-),男,浙江温州人,华东理工大学物理学院 2018 级本科生. E-mail: 969682118@qq.com

通讯作者:吕昭月(1983-),女,云南镇雄人,华东理工大学物理学院副教授,博士,从事有机光电器件的研究. E-mail: lvzhaoyue@ecust.edu.cn

本文选取另一种宽带隙材料,p型材料4,4',4",-三(N-3-甲基苯基-N-苯基氨基)三苯胺(m-MT-DATA),与HAT-CN一起构筑新的n型/p型中 间连接层,探究HAT-CN/m-MTDATA作为中 间连接层的可行性和电荷产生机制.HAT-CN 和 m-MTDATA的禁带宽度分别为3.2 eV 和 4.8 eV<sup>[9]</sup>,几乎不吸收可见光,不会因吸收发光单 元发射的光而降低器件发光亮度、外量子效率等 性能,理论上是很好的中间连接层.



(a)常规器件



(b)叠层器件图 1 OLED 简要工作原理

### 1 实 验

#### 1.1 实验仪器和材料

仪器:超声波清洗机、紫外臭氧处理机、多源 真空镀膜系统、Keithley 2400 高精度电源和柯尼 卡美能卡 CS2000 分光光度计.

材料:方块电阻为 10 Ω 的氧化铟锡(Indium tin oxide, ITO)导电玻璃基片、无水乙醇(分析 纯)、异丙醇(分析纯)、金属 Al(99.99%)和一系 列有机材料.实验所用有机材料名称、分子结构 及其功能如表 1 所示.

表 1 实验	所用有机材料的名称、分子	结构及功能
简写	分子结构	功能
NPB		空 穴 传输层
$\mathrm{Alq}_3$		发光以 及电子 传输层
C545T	N C C C C C C C C C C C C C C C C C C C	发光层
Liq		电 子 注入层
HAT-CN	$NC \xrightarrow{CN} N$ $N \xrightarrow{N} N$ $NC \xrightarrow{N} N$ $NC \xrightarrow{N} N$ $NC \xrightarrow{N} N$ $NC \xrightarrow{N} N$ $NC$ $NC$ $NC$ $NC$ $NC$ $NC$ $NC$ $N$	中 间 连接层
m-MTDATA		中 间 连接层

#### 1.2 基片清洗

把刻蚀好图案的 ITO 玻璃基片放入烧杯中, 依次用去离子水、无水乙醇、异丙醇超声清洗,每 种溶液超声 2 次,每次超声 10 min.超声完成后, 由镊子夹住基片用压缩空气吹干基片表面的液 体,并使 ITO 朝上将玻璃基片放置于培养皿中进 行 10 min 臭氧处理.

### 1.3 器件制备

器件制备是实验的核心环节,所用多源真空 镀膜系统包含 3 个腔体:进样室、有机室和金属 室. 3 个腔体可独立工作,功能分别为:进样室保 证不破坏有机室、金属室的真空状态传送玻璃基 片;有机室用于蒸镀 NPB,C545T,Alq<sub>3</sub>,Liq, MoO<sub>3</sub>,HAT-CN 以及 m-MTDATA 等材料;金 属室用于蒸镀 Al 等金属电极.腔体气压达到 10<sup>-4</sup> Pa 及以下时,按器件结构顺次蒸镀各功能 层,用石英晶体膜厚仪监测厚度和速率,一般有机 材料的蒸镀速率为 0.1 nm/s,金属 Al 电极的蒸 镀速率为1~2 nm/s, Al 作为中间连接单元时厚 度仅1 nm,此时蒸镀速率为 0.05~0.1 nm/s. ITO 电极和 Al 电极交叉区域即为发光区域,实 验中通过掩膜版控制发光区域面积和形状. 该实 验中,每个玻璃基片上有4个独立、相同的发光 区,每个发光区的面积为2mm×2mm.

实验制备2批器件:第一批器件探索中间连 接层的有效性,采用 Al (1 nm)/HAT-CN (5 nm)/m-MTDATA(5 nm), Al(1 nm)/HAT-CN(5 nm)和 Al(1 nm)作为中间连接层制备了 3 类叠层器件,器件结构和命名见表 2;第二批器件 则研究 HAT-CN: m-MTDATA 异质结和 HAT-CN/m-MTDATA平面异质结作为中间连 接层的性能差异,同样制备了3种器件,器件结构 如图 2 所示. S 器件是常规 OLED 器件, 只有 1 个 发光单元(EL unit),发光单元结构为 NPB (40 nm)/0.1% C545T : Alq<sub>3</sub> (30 nm)/Alq<sub>3</sub> (30 nm)/Liq (1 nm); T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 是叠层器件,包含 2个与S器件相同的发光单元,中间连接单元由 1 nm Al 薄层和 HAT-CN, m-MTDATA 形成的 异质结构成,体异质结 HAT-CN: m-MTDATA (1:1,10 nm)对应 T<sub>1</sub> 器件,平面异质结 HAT-CN(5 nm)/ m-MTDATA(5 nm)对应 T<sub>2</sub> 器件. 图 3 所示为发光器件实物照片.

表 2 第一批器件结构

名称		
发光单元(EL)	NPB(40 nm)/Alq <sub>3</sub> (60 nm)/Liq(1 nm)	
$T_{0-1}$	ITO/MoO <sub>3</sub> (5 nm)/EL/Al/HAT-CN/m-MTDATA/EL/Al(120 nm)	
$T_{0-2}$	ITO/MoO <sub>3</sub> (5 nm)/EL/Al/HAT-CN/EL/Al(120 nm)	
$\mathrm{T}_{0-3}$	ITO/MoO <sub>3</sub> (5 nm)/EL/Al/EL/Al(120 nm)	

Al/HAT-CN: m-MTDATA

Al (120 nm)

发光单元2

发光单元1

 $MoO_3(5 nm)$ 

ITO



(a)S器件

(b)T1 器件



(c)T<sub>2</sub>器件



图 3 器件发光实物照片

### 1.4 性能测试

在室温、大气环境、暗室中进行器件的光电性

能测试,通过软件控制 Keithley 2400 电源和柯尼 卡美能达 CS 2000 分光光度计,采集器件的电压-电流、亮度和光谱性能相关数据,并同时计算出电 流效率、功率效率等性能参量.

### 2 结果与讨论

### 2.1 HAT-CN/m-MTDATA 作为中间连接层的 可行性

为了探索 HAT-CN/m-MTDATA 作为中间 连接层的可行性,制备了第一批器件 T<sub>0-1</sub>,T<sub>0-2</sub>和 T<sub>0-3</sub>,图4所示为器件T<sub>0-1</sub>~T<sub>0-3</sub>的电流密度-电 压-亮度曲线.可以看出:1 nm Al 薄层作为中间 连接层的器件 T<sub>0-3</sub>,其驱动电压远高于器件 T<sub>0-1</sub> 和 T<sub>0-2</sub>,说明单独的 Al 薄层不能成为有效的中间 连接层,而器件 T<sub>0-2</sub>中 HAT-CN 与 NPB 之间能 形成电荷转移从而产生载流子<sup>[8]</sup>,相同电压下的 电流密度、亮度均高于器件 T<sub>0-3</sub>.在 HAT-CN 与 NPB 之间加入 m-MTDATA 后,即器件 T<sub>0-1</sub>,其 电流密度-电压-亮度曲线与器件 T<sub>0-2</sub> 相近,说明 HAT-CN 与 m-MTDATA 之间也能有效地产生 载流子.不过,由于 m-MTDATA 的加入,有机层 厚度增加了,相应的驱动电压也比器件 T<sub>0-2</sub>高.



图 4 不同器件的电流密度-电压-亮度曲线

图 5 所示为器件  $T_{0-1} \sim T_{0-3}$ 的电流效率-电流 密度曲线,由于 Al 薄层不是有效的中间连接层, 因此基于 Al 的器件电流效率较低,而 HAT-CN 与 NPB 或 m-MTDATA 之间能形成有效的电荷 转移而产生载流子,因此 Al/ HAT-CN 和 Al/ HAT-CN/m-MTDATA 是有效的中间连接层, 对应器件的电流效率较高, $T_{0-1}$ 器件效率高于器 件  $T_{0-2}$ (相当于 Al/HAT-CN/NPB 为中间连接 层),说明 Al/HAT-CN/m-MTDATA 比 Al/ HAT-CN/NPB 更有效.



图 5 不同器件的电流效率-电流密度曲线

### 2.2 HAT-CN/m-MTDATA 中间连接层的工作 原理

TOLED 结构通过中间连接层将 2 个发光单 元串联(见图 2),电源正负极分别接 ITO 阳极和 Al 阴极. 在外电场作用下,空穴从 ITO 阳极注入 至发光单元1中,电子由Al 阴极注入至发光单元 2中,发光单元1的电子和发光单元2的空穴则 来自中间连接层.因此,只有中间连接层高效地 产生电子和空穴,并且有效注入至相邻的发光单 元中,TOLED 才会表现出优异的发光效率、发光 亮度等性能. 实验所用 HAT-CN 是 n 型有机材 料,m-MTDATA 是 p 型有机材料,m-MTDATA 的本征费米能级高于 HAT-CN. 当 2 种材料接 触时,电子将由 m-MTDATA 向 HAT-CN 转移, 如图 6 所示,使得空穴堆积在 p 型区 m-MTDA-TA,而电子堆积于 n 型区 HAT-CN,形成堆积型 异质结<sup>[10]</sup>.在外电场作用下,堆积的电子和空穴 分别在 n 型材料 HAT-CN 和 p 型材料 m-MT-DATA 中迁移,最后注入至相邻的发光单元. HAT-CN/m-MTDATA 中间连接层包揽了载流 子的产生、传输和注入过程,宛如"载流子源",源 源不断地向两侧发光单元输送载流子.



图 6 中间连接层的工作机理(LUMO:最低空轨道; HOMO:最高占有轨道)

#### 2.3 叠层器件的光电性能

以 HAT-CN 与 m-MTDATA 形成体异质结 和平面异质结构筑中间连接层,制备器件 T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub>,探究体异质结和平面异质结中载流子产生、 传输的性能差异,为了对比,同时制备了只有 1 个 发光单元的常规器件 S.

图 7 所示为器件 S, T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 的电流密度-电 压曲线, 3 个器件都显示出典型的二极管伏安特 性曲线, 即:电压较低时, 电流几乎为零, 当电压高 于某个数值时,电流密度随电压的升高迅速增加. 由于叠层器件比常规器件增加了发光单元,同时 叠层器件需要中间连接层,总厚度是常规器件的 2 倍多,因此常规器件S驱动电压较低,而叠层器 件  $T_1$  和  $T_2$  驱动电压则高很多.例如,达到 20 mA·cm<sup>-2</sup>的电流密度,器件S, $T_1$  和  $T_2$  所需 的电压分别为 6.0,14.4 和 17.1 V. 器件  $T_1$  和  $T_2$  的驱动电压是器件S的 2.4 倍和 2.85 倍.



图 7 不同器件的电流密度-电压曲线

图 8 所示为 3 个器件的发光亮度-电压曲线, OLED 作为电流注入式器件,发光亮度与电流密 度成正比,所以器件发光亮度随电压的变化趋势 与电流密度相似,电压高于阈值时,亮度随电压的 增加迅速增加.叠层器件的驱动电压同样比常规 器件高 2 倍多,例如发光亮度为 1 000 cd • m<sup>-2</sup> 时,器件 S 的驱动电压为 6.7 V,器件 T<sub>1</sub>和 T<sub>2</sub> 的 驱动电压则为 14.9 V 和 17.4 V,分别为器件 S 的 2.2 倍和 2.6 倍.



图 8 不同器件的发光亮度-电压曲线

性能优异的叠层器件,中间连接层应具备不 消耗电压、透明不吸收光的特性,同时能有效产生 载流子并注入两侧的发光单元,相应地,叠层器件 的驱动电压是常规器件的 n 倍(n 为叠层器件的 发光单元数).实验中叠层器件的驱动电压是常 规器件的 2 倍多,中间连接单元较好地连接了 2 个发光单元.2 个叠层器件相比较而言,体异质 结 HAT-CN:m-MTDATA 对应的器件 T<sub>1</sub> 的驱 动电压比平面异质结器件 T<sub>2</sub> 低,这是由于平面 异质结中 HAT-CN 与 m-MTDATA 之间存在势 垒,消耗了一部分电压,而体异质结中,HAT-CN 与 m-MTDATA 均匀混合,几乎没有势垒,有助 于载流子的产生和迁移.

图 9~11 所示分别为器件 S,T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 的亮 度-电流密度、电流效率-电流密度和功率效率-亮 度曲线.结果显示:相同电流密度下,叠层器件的 亮度、电流效率是常规器件的2倍左右;低亮度 下,由于中间连接层的功耗,叠层器件的功率效率 低于常规器件;高亮度下,叠层器件的功率效率与 常规器件相当. 例如,20 mA · cm<sup>-2</sup>电流下:器 件  $T_1$  和  $T_2$  的亮度分别为 744 和 864 cd • m<sup>-2</sup>, 是器件S(397 cd • m<sup>-2</sup>)的1.87 倍和2.18 倍;相 应地,器件 S,T<sub>1</sub>和 T<sub>2</sub>的电流效率分别为 2.0, 3.7,4.3 cd • A<sup>-1</sup>,器件 T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 是器件 S 的 1.85倍和 2.15 倍. 亮度为 1 000 cd • m<sup>-2</sup> 时,S, T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 的功率效率分别为 0.97,0.80 和 0.78 lm • W<sup>-1</sup>;而亮度为 8 000 cd • m<sup>-2</sup>时,3 个 器件的功率效率分别为 0.90,0.85 和 0.86 lm • ₩<sup>-1</sup>. 也就是说,高亮度应用场景下,叠层器件更 有优势.

图 10 还表明,随着电流密度增加,叠层器件的电流效率显著升高. 电流密度为 150 mA · cm<sup>-2</sup>时,器件 T<sub>1</sub>和 T<sub>2</sub>的电流效率分别为 4.8 和 5.7 cd · A<sup>-1</sup>,是器件 S (2.3 cd · A<sup>-1</sup>)的 2.1 倍



图 9 不同器件的亮度-电流密度曲线



图 10 不同器件的电流效率-电流密度曲线



图 11 不同器件功率效率-亮度曲线

和 2.48 倍,比 20 mA · cm<sup>-2</sup>时提升了 50%.这 源于中间连接层的载流子产生与电场有关<sup>[11]</sup>,电 场越强,HAT-CN 与 m-MTDATA 之间的电荷 转移越多,产生的载流子越多,因此电流效率越高,功率效率也更高.

#### 2.4 叠层器件的光谱性能

OLED 无论应用于显示还是照明,都要求其 颜色可控、稳定,所以发光光谱也是研究 OLED 器件的重要性能指标.图 12 所示为器件 S,T<sub>1</sub>和 T<sub>2</sub> 归一化电致发光光谱的对比图,发光峰均位于 515 nm,且光谱峰值和形状均不随电压的变化而 变化,表现出优异的色稳定性,这源于器件结构的 优化设计.3个器件电致发光光谱的半高全宽也 几乎相同,分别为 86.4,84.4,83.1 nm,不过叠层 器件在 570~700 nm 范围内的相对强度比常规 器件略低,这主要由叠层器件的弱微腔效应引 起<sup>[5,12]</sup>.

所设计的器件结构中,若 NPB 发光,则发射 440 nm 附近的蓝光<sup>[13]</sup>,C545T:Alq<sub>3</sub> 发射515 nm



图 12 不同器件电致发光光谱

附近的绿光<sup>[14]</sup>,Alq<sub>8</sub>的发光中心位于 525 nm 附 近<sup>[11]</sup>.外电场作用下,电子从阴极注入向阳极方 向迁移,经过 Alq<sub>8</sub>进入 C545T:Alq<sub>8</sub>层,且有可 能继续向阳极传输进入 NPB 层甚至泄露到阳极; 而空穴则从阳极注入向阴极迁移,经过 NPB 进入 C545T:Alq<sub>8</sub>,也有可能继续向阴极传输进入 Alq<sub>8</sub> 中甚至泄露到阴极.电子和空穴传输过程中,如 果在 NPB 中相遇则形成激子并辐射发光,光谱中 会观察到 NPB 发光峰,而实际上光谱中没有 NPB 的发光,这可以通过能级结构说明.

图 13 所示为能级结构图,可以看出电子由 C545T:Alq。层向 NPB 传输时,需要克服 0.5 eV 的势垒,同时 NPB 电子迁移率很低<sup>[15]</sup>,所以电子 几乎不能进入 NPB 中,因此光谱中没有 NPB 的 发光.同样地,Alq。的空穴迁移率很低<sup>[15-16]</sup>,空 穴也很难由 C545T:Alq。迁移至 Alq。中,也观察 不到 Alq。的明显发光.综上所述,电子、空穴主 要在 C545T:Alq。层相遇复合形成激子并发光, 同时 C545T:Alq。发光层具有优异的色稳定性, 因此所有器件都表现出了优异的光谱稳定性.



图 13 发光单元的能级结构图

### 3 结 论

采用 2 种宽禁带材料 HAT-CN 和 m-MT-DATA 构筑中间连接层,通过多源真空蒸镀设备 制备了叠层 OLED.器件的光电性能表明,相同 电流密度下,叠层器件的发光亮度和电流效率可 达常规器件的 2 倍多,即:叠层器件可在较小电流 密度下实现高亮度和高电流效率.这说明 HAT-CN/m-MTDATA 异质结是构筑叠层 OLED 的 有效中间连接层,其电荷产生机理为:HAT-CN 和 m-MTDATA 因费米能级不同导致电子转移, 形成堆积型异质结,外电场的作用下,堆积的电子 和空穴源源不断向外输送,即有效产生电荷.通 过对常规器件、体异质结叠层器件、平面异质结叠 层器件的性能差异分析,揭示了器件结构与性能 的依存关系,丰富了中间连接层的构筑方案.

### 参考文献:

- [1] Hsiang E L, Yang Z, Yang Q, et al. Prospects and challenges of mini-LED, OLED, and micro-LED displays [J]. Journal of the Society for Information Display, 2021,29(6):446-465.
- [2] Kido J, Matsumoto T, Endo J, et al. High efficiency organic EL devices having charge generation layers [J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2003,34(1):964-965.
- [3] Huang C C, Zhang Y J, Zhou J G, et al. Hybrid tandem white OLED with long lifetime and 150 lm • W<sup>-1</sup> in luminous efficacy based on TADF blue emitter stabilized with phosphorescent red emitter [J]. Advanced Optical Materials, 2020, 8 (18):202000727.
- [4] Li Y Z, Lee C C, Li Y D, et al. Highly efficient and inverted tandem organic light-emitting devices using a MoO<sub>3</sub>/Al/MoO<sub>3</sub> charge generation layer [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2017,56 (12):129213.
- [5] 喻叶,林雯嫣,彭雪康,等.利用有效电荷产生层 Liq/Al/HAT-CN的叠层有机白光器件中弱微腔效 应的研究[J].中国光学,2019,12(2):382-394.
- [6] Yuan J K, Liu W, Yao J W, et al. Highly efficient charge generation and injection in HAT-CN/TAPC heterojunction for high efficiency tandem organic light - emitting diodes [J]. Organic Electronics,

2020,83:105745.

- [7] 陈爱,王振,谢嘉凤,等. 基于有机异质结 C<sub>60</sub>/ZnPc 的绿色磷光 TOLED[J]. 光子学报, 2019,48(7): 0723003.
- [8] Kim Y K, Kim J W, Park Y. Energy level alignment at a charge generation interface between 4, 4'-bis (N-phenyl-1-naphthylamino) biphenyl and 1,4, 5,8,9,11-hexaazatriphenylene-hexacarbonitrile [J]. Applied Physics Letters, 2009,94(6):063305.
- [9] Sun H D, Guo Q X, Yang D Z, et al. High efficiency tandem organic light emitting diode using an organic heterojunction as the charge generation layer: An investigation into the charge generation model and device performance [J]. ACS Photonics, 2015,2(2):271-279.
- [10] Shi J W, Wang H B, Tian H K, et al. n-channel, ambipolar, and p-channel organic heterojunction transistors fabricated with various film morphologies [J]. Advanced Functional Materials, 2007,17 (3):397-400.
- [11] Lü Z Y, Zhang L J, Wang J L, et al. Enhanced efficiency of tandem organic light-emitting diodes via manipulating heterojunction composition of charge generation unit [J]. Physica Status Solidi (a), 2021,218(17):2100188.
- [12] Tan G J, Lee J H, Lin S C, et al. Analysis and optimization on the angular color shift of RGB OLED displays [J]. Optics Express, 2017, 25 (26):33629-33642.
- [13] Lü Z Y, Yin Y H, Xiao J. Manipulation of recombination zone by utilizing the donor of electroplex as a spacer [J]. Journal of Luminescence, 2016, 179:469-473.
- [14] Chen Y H, Tian H K, Geng Y H, et al. Organic heterojunctions as a charge generation layer in tandem organic light-emitting diodes: the effect of interfacial energy level and charge carrier mobility
   [J]. Journal of Materials Chemistry, 2011, 21 (39):15332-15336.
- [15] Liu S W, Wang J K. Charge mobility of mixed organic semiconductors: a NPB-AlQ<sub>3</sub> study [C]// Proceedings of SPIE, 2006,6333;63331R.
- [16] Fong H H, So S K. Hole transporting properties of tris (8-hydroxyquinoline) aluminum (Alq<sub>3</sub>) [J]. Journal of Applied Physics, 2006,100(9): 094502.

[11] 周红仙,王毅,胡瀛心,等.基于光纤迈克尔逊干涉 仪的非接触光声成像实验系统[J].实验室研究与 探索,2019,38(11):9-12. [12] 李英,尹丽菊,申晋,等. 微光成像实验平台的光路 设计[J]. 实验室研究与探索,2019,38(12):75-78, 155.

### Telecentric beam path used in lens parameter measurement

YOU Meng, WANG Jin-jiang, YU Yin, HUANG Rui

(School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to verify the function of telecentric beam path in the measurement, simulations were firstly made to find the difference in the data with or without telecentric beam path based on optical simulation software. Then it was described that the procedure of disassembling certain components of optical bench, rebuilding the coaxial optical path on the optical platform, collecting the image results and processing the data. Finally with the analysis of simulation and experiment data, the function of telecentric beam path was discussed along with the requirements on clear observation of the Bolo plate image.

Key words: telecentric beam path; lens parameter measurement; CODE V

[责任编辑:郭 伟]

(上接14页)

20

## Optical and electrical performance of tandem OLED based on HAT-CN/m-MTDATA intermediate connection layer

YUAN Sheng-jie, ZHANG Yi-ming, MA Jian-jian, TIAN Ye, LYU Zhao-yue, XIE Hai-fen

(School of Physics, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Organic light emitting diode (OLED) display technology has been widely used in small and medium-sized screens such as mobile phones. Tandem OLED, as an important approach to improve the properties, including lifetime, luminance and efficiency of OLED, has attracted much attention of the academic research and industrial community. Herein, tandem OLEDs, with the emissive unit of NPB/C545T :  $Alq_3/Alq_3$  and an intermediate connection layer of heterojunctions formed by ntype material of HAT-CN and p-type material of m-MTDATA, were prepared by multi-source vacuum deposition system. The optical and electrical performance of devices demonstrated that the current efficiency (5.7 cd/A) and brightness (8 557 cd  $\cdot$  m<sup>-2</sup>) of tandem OLED could reach 2.5 times those of the conventional device (2. 3 cd/A, 3460 cd  $\cdot$  m<sup>-2</sup>) at the current density of 150 mA  $\cdot$  cm<sup>-2</sup>. Both higher luminance and current efficiency had been fulfilled in a tandem OLED at lower current density.

Key words: tandem OLED; intermediate connection layer; charge generation layer; charge transfer

[责任编辑:任德香]