



有机半导体异质结电荷产生层及其在叠层有机发光二极管中的应用

陈永华, 马东阁*

中国科学院长春应用化学研究所, 高分子物理与化学国家重点实验室, 长春 130022

* 联系人, E-mail: mdg1014@ciac.jl.cn

2011-05-18 收稿, 2011-06-08 接受

国家自然科学基金创新研究群体(20921061)、国家自然科学基金(50973104)和国家重点基础研究发展计划(2009CB623604)资助项目

摘要 叠层有机发光二极管因其具有更高的亮度、效率以及稳定性, 其研究备受关注. 本文综述了叠层有机发光二极管的最新进展; 总结了作者研究小组基于有机半导体异质结的概念, 设计了由一种 p 型有机半导体和一种 n 型有机半导体层层组成的双层有机半导体异质结电荷产生层, 并用它们作为连接单元制备了叠层有机发光二极管, 器件的电压得到了降低, 功率效率得到了提高. 通过对电荷产生层的工作机制的深入剖析, 揭示了降低电压、提高功率效率的内在物理原因, 为进一步设计高性能有机电致发光器件提供了新的思路; 最后对叠层有机发光二极管的未来发展方向进行了展望.

关键词

有机半导体异质结
叠层有机发光二极管
电荷产生层
功率效率

自 1987 年由柯达公司 Tang 等人^[1]首次制备出有机发光二极管(organic light-emitting diode, OLED)以来, 由于在显示和照明领域的巨大应用市场, 其研究备受关注^[2~7]. 同无机发光二极管相比, 有机发光二极管具有材料选择范围宽、可实现由蓝光区到红光区的全彩色显示、驱动电压低、发光亮度和发光效率高、视角宽、响应速度快、制作工艺简单、成本低, 并易实现大面积和柔性显示等诸多优点, 因而在过去的 20 多年中得到了迅速的发展. OLED 是一种电流驱动的器件, 随着电流密度的增加亮度逐渐增加. 然而, 为了达到实用所需的较高发光亮度, OLED 必须在较高的电流密度下工作, 这大大降低了 OLED 的效率和使用寿命^[8]. 因此, 在较低的电流密度下实现较高的发光亮度和效率, 提高器件的工作寿命, 是 OLED 能否产业化的关键. 叠层有机发光二极管(Tandem OLEDs)因其在较低的电流密度下具有较高的电流效率、发光亮度和较长的使用寿命引起了科学界和产业界越来越多的关注. 本文综述了 Tandem OLEDs 的结构特点及其原理, 以及所面临的机遇与挑战, 提出了

基于有机半导体异质结为电荷产生层的 Tandem OLEDs, 讨论了相关物理机制, 并对其未来的发展作出了展望.

1 叠层有机发光二极管的基本原理

1.1 叠层有机发光二极管的结构和特点

叠层有机发光二极管的概念最早是由日本山形大学 Junji Kido 教授于 2003 年提出来的^[9]. 顾名思义, Tandem OLEDs 就是将两个或多个 OLED 单元堆叠在一起, 具体地说, 是通过一种叫做电荷产生层(charge generation layer, CGL)的结构将这些发光的 OLED 单元串联起来, 并且只由 1 个外电源控制的 OLED^[9~22]. 如图 1 所示的两单元的 Tandem OLED, 左侧为传统的 OLED, 其只有 1 个发光单元; 右侧是叠层 OLED, 它有 2 个发光单元, 由电荷产生层串联起来.

我们知道, 有机电致发光的一个完整过程是电子与空穴载流子在 OLED 中的注入、传输、复合形成激子、最后辐射衰减发光. 显然形成的激子数越多

英文引用格式: Chen Y H, Ma D G. Organic semiconductor heterojunction charge generation layer and its application in tandem organic light-emitting diodes (in Chinese). Chinese Sci Bull (Chinese Ver), 2011, 56: 1947–1955, doi: 10.1360/972011-990

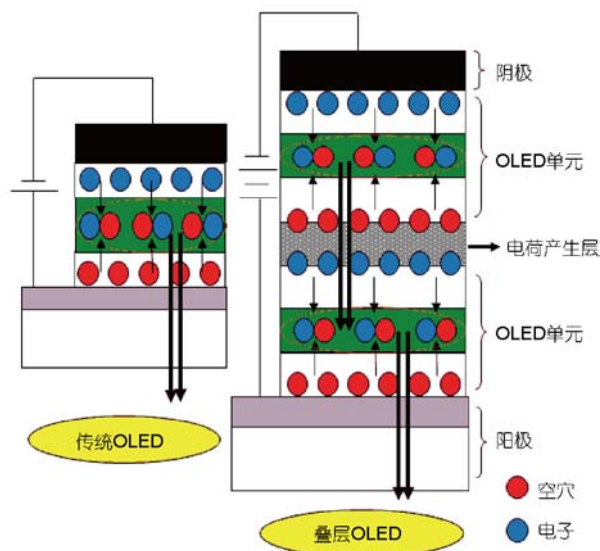


图1 叠层 OLED 和传统 OLED 的结构示意图

发出的光子数就越多,器件的效率也就越高.从图1可以看出,对于传统的 OLEDs,从阴极和阳极注入的电子和空穴在发光区复合形成激子,注入的一对电子和空穴最多形成一对激子;对于叠层 OLEDs,注入的电子和空穴分别和电荷产生层产生的空穴和电子在发光区复合形成激子,注入的一对电子和空穴可以形成两对激子,因此,相比于传统的 OLEDs,叠层 OLEDs 能够获得更高的发光亮度,其电流效率随着串联 OLED 单元的个数可以成倍地增长,如图2所示.而且,在同样的电流密度下,叠层 OLEDs 和传统 OLEDs 的老化性质是一样的,但由于叠层 OLEDs 的初始亮度比较大,因此换算成同样初始亮度时,叠层 OLEDs 的寿命将比传统 OLEDs 大大延长^[20,21].除此之外,叠层 OLEDs 中有2个或多个 OLED 单元,每个单元可以由不同的发光颜色组成,因此可以通过蓝光和橙光两种互补光或红、绿、蓝三基色光混合得以实现白光发射^[11,12,21~24].由于白光有机发光器件在全色显示以及照明等方面所显现的巨大优势,结合叠层 OLEDs 高效率长寿命的优势,叠层白光器件将极具竞争优势.

1.2 电荷产生层的结构及其内在物理过程

由以上的分析我们可以看到,要想获得高性能的 Tandem OLEDs,高效的电荷产生层是关键,因为其不仅起着连接各个 OLED 单元的作用,更重要的是要产生电荷.实际上电荷产生层的物理过程不只

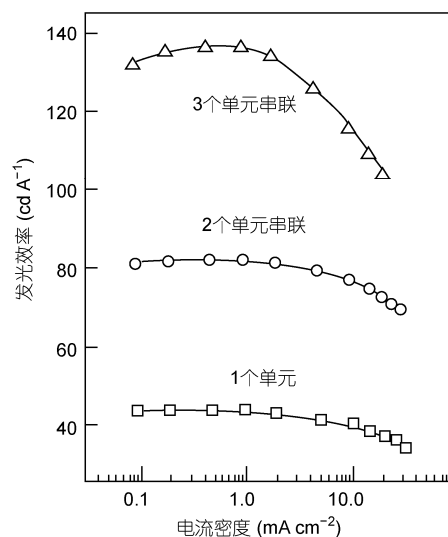
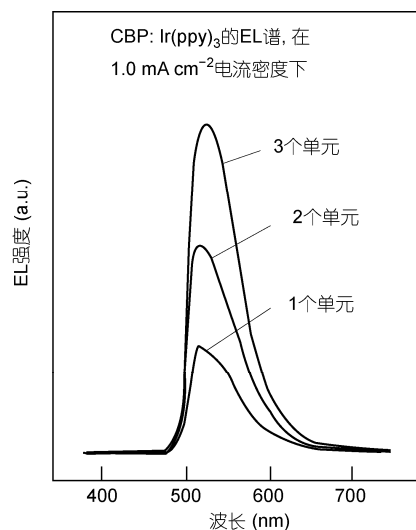


图2 2个单元和3个单元叠层 OLED 与传统 OLED(1个单元)的光谱和电流效率
修改自文献[16]

是产生电荷,除此之外,它还必须将产生的电荷快速传输并注入到发光单元中,所以电荷产生层的作用包括电荷的产生、传输和注入这3个重要过程,缺一不可.任何高效的电荷产生层都必须具有高效的电荷产生、快速的电荷传输以及有效的注入性质,才能制得高效的 Tandem OLEDs.自从2003年 Kido 教授首次提出 Tandem OLEDs 的概念以来,这方面的研究已经取得了显著进展,不同电荷产生层结构被研究者设计出来,目前,从掺杂到非掺杂的电荷产生层都有报道,大体分为以下几类:(1) n 型掺杂的有机层/无机金属氧化物,如 $\text{Alq}_3\text{:Mg/WO}_3$ ^[10], Bphen:Li/

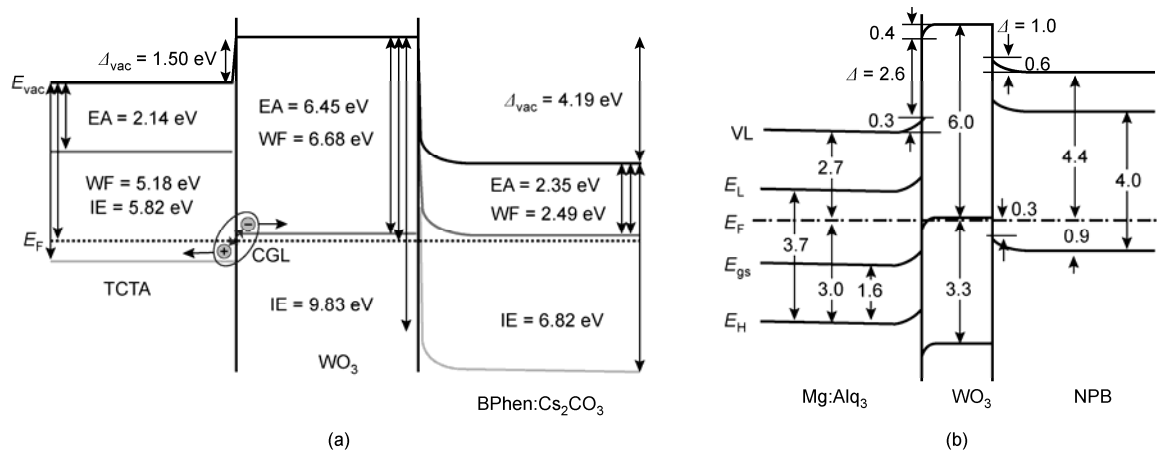


图4 TCTA/ WO_3 /Bphen: Cs_2CO_3 界面(a)和 Mg:Alq₃/ WO_3 /NPB 界面(b)电子结构

修改自文献[27,28]

(3) 目前已有的电荷产生层制备的叠层有机发光二极管,其亮度和电流效率成倍增加的同时,电压也成倍增加,这意味着现有的 Tandem OLEDs 的功率效率与单元发光二极管的相当并没有得到改善,这在实际应用中特别是在照明应用中是非常不利的,也掩盖了 Tandem OLEDs 的优点。

因此,开发新的电荷产生层,使制备的叠层有机发光二极管在成倍增加亮度和电流效率的同时,工作电压降低,功率效率得到提高将是该领域的重要研究课题。

2 有机半导体异质结电荷产生层的叠层有机发光二极管

2.1 设计思想

针对上述问题,我们发现,电荷产生层实际上就是 p 型半导体和 n 型半导体组成的异质结,电荷的产生其实就是异质结的界面行为。实际上,由 p 型有机半导体和 n 型有机半导体构成的有机半导体异质结在有机薄膜太阳能电池器件中已经得到了广泛的应用,在光照下产生的激子通常是在异质结界面处形成,并在电场的作用下分离、传输和提取并最终形成电流。相比之下, Tandem OLEDs 在电荷产生层中产生的载流子也应该是类似的过程,唯一不同的就是在电荷产生层中产生的载流子是在电场的诱导下产生的,并在电场的作用下传输和向发光单元注入。因此,理论上讲,由这种 p/n 有机半导体异质结构成的电荷产生层也应该具有类似其他电荷产生层产生电

荷的功能。实际上这方面已经有文献报道,如李述汤研究小组^[18]用酞菁铜和氟代酞菁铜构成的异质结作为电荷产生层制备的叠层蓝光 OLED,亮度和电流效率的确得到了成倍的增加。然而,和其他类型电荷产生层一样,该器件同样存在由于工作电压成倍增加而功率效率没有得到提高的问题。

对于 Tandem OLEDs 来说,电荷产生层的作用实际上应该包括 3 个过程:电荷产生、电荷传输和电荷注入到相应的发光单元。和电荷产生一样,电荷传输和电荷注入同样是非常重要的,对于由 p/n 有机半导体异质结构成的电荷产生层的情况,和有机太阳能电池一样,电荷产生应该和所使用的 p 型有机半导体和 n 型有机半导体的能级结构位置有关,在电场的诱导下,电子应该积累在 n 型侧,而空穴应该积累在 p 型侧,即形成所谓的积累型空间电荷区,这样在外电场的作用下,产生的电子和空穴就能有效地分离。为了达到这个要求, p 型有机半导体应该有比 n 型有机半导体更高的费米能级,这对结构丰富的有机半导体来说显然是可行的。电荷传输主要和所使用的有机半导体的迁移率有关,为了实现产生的电荷在电荷产生层中的有效传输,高迁移率有机半导体的使用显然是非常必要的。对于电荷注入问题,一个最为有效的方法是引入界面层,这也是目前 OLED 器件中降低电子和空穴注入势垒最为成功的方法。基于这些过程要求,目前我们已经开发出了这样的电荷产生层,这里我们以界面修饰的 C_{60} /Pentacene 有机半导体异质结作为电荷产生层为例进行简单的工作过程说明。

对于 C_{60} /Pentacene 体系, 其中 n 型有机半导体 C_{60} 的费米能级低于 p 型有机半导体 Pentacene 的费米能级^[29], 因此, 当 C_{60} 和 Pentacene 接触后, 根据热电子发射理论, 电子会从费米能级高的 Pentacene 转移到费米能级低的 C_{60} 上(图 5 左). 实际上, Kang 等人^[29,30]已经通过 UPS 和 XPS 确定了 Pentacene 向 C_{60} 的电荷转移; 很多研究小组也已经仔细地研究了 C_{60} 和 Pentacene 的界面, 并详细地阐述了界面偶极在 C_{60} 和 Pentacene 界面的形成机制^[29~31]. 界面偶极可能来源于两种材料之间的电荷转移、不对称的电子分布诱导的极化效应、界面的化学反应以及电中性能级准直等^[32~35], 然而无论如何, 界面偶极的形成有利于 C_{60} 和 Pentacene 之间能级准直, 这样就使得电子很容易从 Pentacene 转移到 C_{60} 上, 同时, 电荷转移也能够使界面能级达到平衡, 如此高密度的电子和空穴累积在 C_{60} 和 Pentacene 两侧, 形成了积累型空间电荷区, 产生了电荷(图 5 中), 这样产生的电子和空穴在外电场的作用下很容易分离, 并沿着 C_{60} 和 Pentacene 传输(图 5 右). 由于 C_{60} 和 Pentacene 分别具有较高的电子和空穴迁移率^[36,37], 因此产生的电荷就会很快地传输出去而不会积累在 C_{60} 和 Pentacene 的界面处造成猝灭, 大大有利于降低电压. 当然, 由于 C_{60} 和 Pentacene 分别与其相邻的电子传输层和空穴传输层之间存在一定的能级势垒, 电子和空穴要有效地注入到发光单元中必须克服他们之间的能级势垒, 为了做到这一点, 我们在 C_{60} /Pentacene 有机半导体异质结两侧分别引入了 LiF 和 MoO_3 界面层, 降低了电子和空穴的注入势垒.

2.2 叠层器件与性能

基于以上设计的有机半导体异质结电荷产生层, 我们制备了如下叠层(Tandem)器件 ITO/ MoO_3 (6 nm)/

NPB(90 nm)/ Alq_3 :C545T(30 nm)/ Alq_3 (30 nm)/LiF(0.3 nm)/ C_{60} (20 nm)/Pentacene(15 nm)/ MoO_3 (3 nm)/NPB(50 nm)/ Alq_3 :C545T(1%, 30 nm)/ Alq_3 (30 nm)/LiF(1 nm)/Al(120 nm). 为了比较, 我们也制备了单元(Single-unit)器件 ITO/ MoO_3 (6 nm)/NPB(90 nm)/ Alq_3 :C545T(1%, 30 nm)/ Alq_3 (30 nm)/LiF(1 nm)/Al(120 nm). Single-unit 器件我们采用经典的 Alq_3 :C545T 绿光荧光为发光层, 电子和空穴传输材料分别为 Alq_3 和 NPB, 这样构成的一个发光单元(EL unit)为 NPB/ Alq_3 :C545T/ Alq_3 , 空穴和电子注入层分别为 MoO_3 和 LiF. 在 Tandem 器件中, 电荷产生层采用 C_{60} 和 Pentacene 构成的有机半导体异质结, 电子和空穴的注入层分别采用 LiF 和 MoO_3 , 因为两者在 Single-unit 器件中分别表现出较好的电子和空穴注入性能, 两个 EL unit 由电荷产生层 C_{60} /Pentacene 连接构成了 Tandem 器件. 在分别考察各有机层厚度、发光层中染料掺杂浓度对器件性能的影响后, 最终优化后的器件结构如图 6 所示.

图 7 给出了优化的器件性能. 可以看到, Tandem 器件的工作电压要大于 Single-unit 器件的工作电压, 但小于 Single-unit 器件的 2 倍. 例如, 在 20 mA cm^{-2} 相同电流密度下, Single-unit 器件的工作电压为 9.1 V, 而 Tandem 器件只有 14.5 V(图 7(a)), 电压的增幅仅为 59%, 可以看到, 使用界面修饰的 C_{60} /Pentacene 异质结做为电荷产生层的确降低了叠层器件的工作电压. 如图 7(b)所示, Tandem 器件的最大电流效率达到了 37 cd A^{-1} , 是 Single-unit 器件最大电流效率 15 cd A^{-1} 的 2.5 倍, 这表明 C_{60} /Pentacene 有机半导体异质结是非常高效的电荷产生层. 更值得注意的是, 如图 7(c)所示, Tandem 器件的最大功率效率达到了 21.9 lm W^{-1} , 也达到了 Single-unit 器件 10.1 lm W^{-1} 功率效率的 2 倍, 即使在高的亮度下, 如 1000, 10000

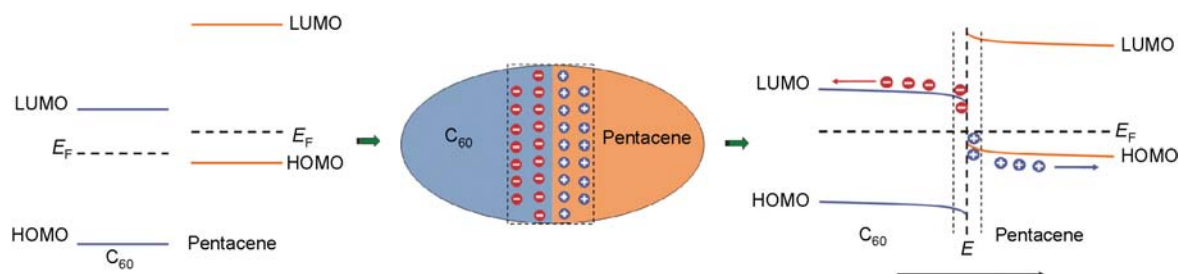


图 5 C_{60} /Pentacene 有机半导体异质结电荷产生层的工作原理

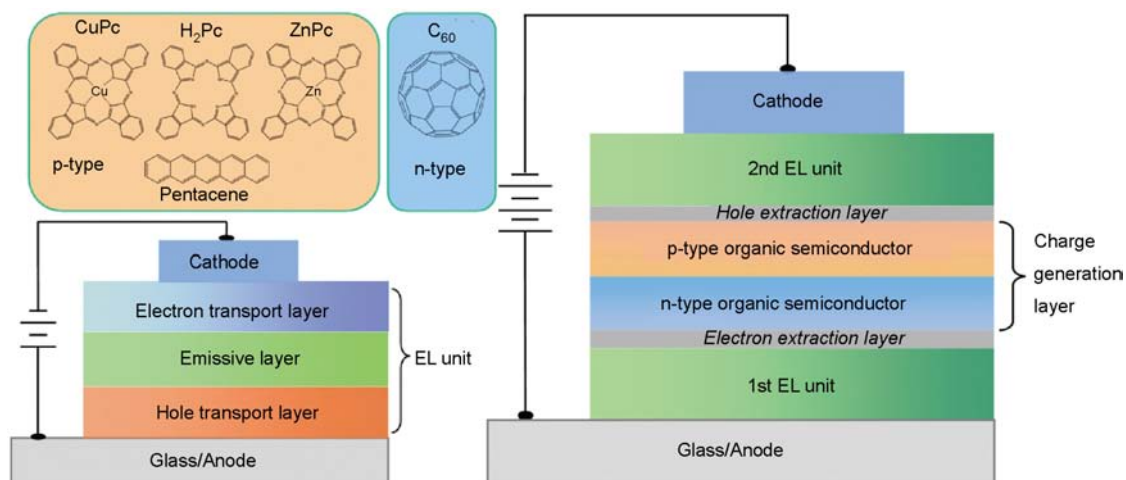


图6 Single-unit 和 Tandem 器件的结构示意图

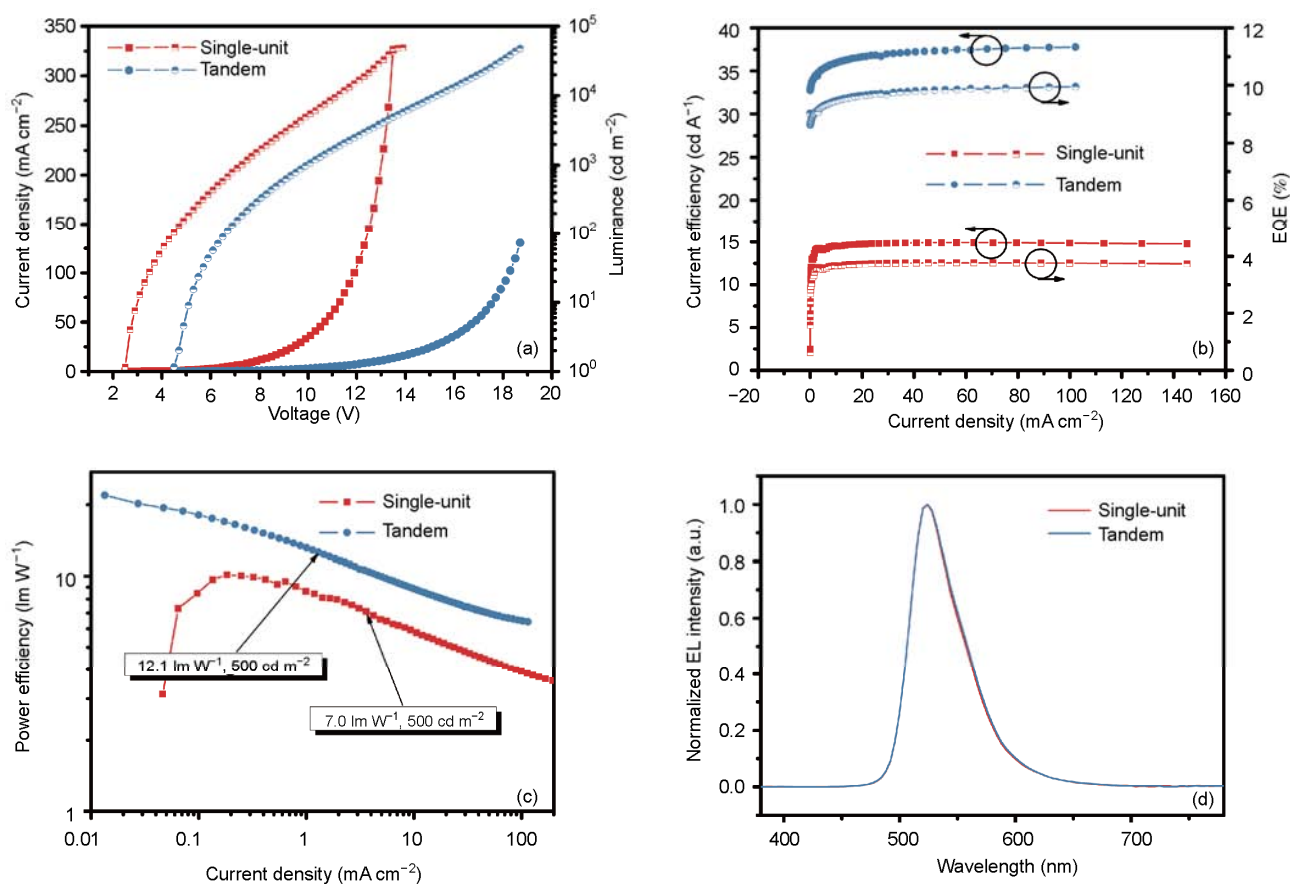


图7 Single-unit 和 Tandem 器件的性能比较

(a) 电流密度-电压-亮度特性; (b) 电流效率-电流密度特性; (c) 功率效率-电流密度特性; (d) 光谱特性

和 38000 cd m^{-2} 下, Tandem 器件的功率效率也分别达到了 Single-unit 器件的 1.74, 1.81 和 1.9 倍, 这在以前的报道中是从来没有过的^[11,14,16]. 正如图 7(d) 所示, Tandem 器件也发射了与 Single-unit 器件几乎相同的电致发光光谱, 表明 Tandem 器件没有因为有机半导体异质结电荷产生层的使用带来附加的微腔效应.

实际上, 除了 $\text{C}_{60}/\text{Pentacene}$ 有机半导体异质结外, 我们还开发出来了 $\text{C}_{60}/\text{ZnPc}$, $\text{C}_{60}/\text{CuPc}$, $\text{C}_{60}/\text{H}_2\text{Pc}$ 以及 $\text{C}_{60}/\text{Thiophenes}$ 有机半导体异质结作为电荷产生层, 基于他们所制备的 Tandem OLEDs 的功率效率都得到了不同程度的提升. 此外, 有机半导体异质结, 如 $\text{ZnPc}:\text{C}_{60}$ 和 $\text{Pentacene}:\text{C}_{60}$; 有机 p-i-n 异质结, 如 $\text{C}_{60}/\text{Pentacene}:\text{C}_{60}/\text{Pentacene}$ 都可以作为很好的电荷产生层, 并制备出了高功率效率的 Tandem OLEDs, 表明我们开发出来的这种有机半导体异质结电荷产生层非常具有普适性, 利用有机半导体异质结作为电荷产生层这个概念, 可以设计一系列高效的电荷产生层, 从而制备高性能的 Tandem OLEDs.

可以看到, 有机半导体异质结电荷产生层是全有机的、非掺杂的, 其制备简单、性能优异并且是一种普适性的电荷产生层结构. 有机半导体异质结中 p 和 n 型有机半导体之间能级位置导致了电荷由 p 型有机半导体转移到 n 型有机半导体, 由此产生电荷, 所选用的 p 型和 n 型有机半导体均具有较高的空穴和电子迁移率, 保证了产生的空穴和电子能够快速地进行传输出去而不会累积在界面处导致大的电压降以及不会因空间电场导致电荷的猝灭. 由于我们在有机半导体异质结电荷产生层的两侧引入了经典的 LiF 作为电子注入层和 MoO_3 为空穴注入层, 实现了电子和

空穴高效注入到发光单元中, 三者结合, 有效地降低了器件的驱动电压, 提高了器件的功率效率.

3 结束语

Tandem OLED 及其电荷产生层的研究涉及材料、物理、化学、电子、光学、凝聚态物理等多学科交叉领域, 目前已经成为有机光电子学研究的一个重要方向, 许多国家和地区的科研人员都在积极开展这方面的研究工作, 尽管已经取得了一定的进展, 但仍存在许多待解决的问题. 对于 Tandem OLEDs, 未来的研究工作应该从以下几个方面入手:

(1) 借助目前已经成熟的 X 射线光电子能谱 (XPS)、紫外光电子能谱 (UPS) 以及反光电子能谱 (IPES), 研究电荷产生层中 p 型和 n 型有机半导体界面处电荷的转移机制, 并结合量子化学计算量化电荷转移的数量, 探寻界面能级结构和电子结构的关系, 为电荷产生层的设计提供必要的理论指导.

(2) 有机半导体异质结电荷产生层的关键是电荷产生层的形成, 从目前的发展来看, 人们更多关注的是电荷的产生, 而忽略了电荷的传输和注入(提取). 实际上, 电荷的传输和注入也同样是非常重要的, 他们对降低叠层器件的驱动电压有显著的贡献. 因此, 选择或设计合成高迁移率的材料, 选取恰当的界面材料, 优化界面能级结构, 降低界面势垒, 使得产生的电荷能够有效地传输并注入到发光单元是发展有机半导体异质结电荷产生层的关键.

(3) 对有机半导体异质结电荷产生层的物理机制研究仍需加强, 电荷的累积宽度、传输的机制以及电荷产生层的老化问题都需要深入研究, 从而指导开发出性能更优越的有机半导体异质结电荷产生层.

参考文献

- 1 Tang C W, Vanslyke S A. Organic electroluminescent diodes. *Appl Phys Lett*, 1987, 51: 913–915
- 2 Burroughes J H, Bradley D D C, Brown A R, et al. Light-emitting-diodes based on conjugated polymers. *Nature*, 1990, 347: 539–541
- 3 Forrest S R, Burrows P E, Shen Z, et al. The stacked OLED (SOLED): A new type of organic device for achieving high-resolution full-color displays. *Synthetic Met*, 1997, 91: 9–13
- 4 Kido J, Kimura M, Nagai K. Multilayer white light-emitting organic electroluminescent device. *Science*, 1995, 267: 1332–1334
- 5 Baldo M A, O'Brien D F, You Y, et al. Highly efficient phosphorescent emission from organic electroluminescent devices. *Nature*, 1998, 395: 151–154
- 6 Xiao L X, Chen Z J, Qu B, et al. Recent progresses on materials for electrophosphorescent organic light-emitting devices. *Adv Mater*, 2011, 23: 926–952
- 7 Gather M C, Kohnen A, Meerholz K. White organic light-emitting diodes. *Adv Mater*, 2011, 23: 233–248

- 8 VanSlyke S A, Chen C H, Tang C W. Organic electroluminescent devices with improved stability. *Appl Phys Lett*, 1996, 69: 2160–2162
- 9 Kido J, Matsumoto T, Nakada T, et al. High efficiency organic EL devices having charge generation layers. *SID Int Symp Dig Tech*, 2003, 34: 964–965
- 10 Chang C C, Hwang S W, Chen C H, et al. High-efficiency organic electroluminescent device with multiple emitting units. *Jpn J Appl Phys* 1, 2004, 43: 6418–6422
- 11 Kanno H, Holmes R J, Sun Y, et al. White stacked electrophosphorescent organic light-emitting devices employing MoO_3 as a charge-generation layer. *Adv Mater*, 2006, 18: 339–342
- 12 Guo F W, Ma D G. White organic light-emitting diodes based on tandem structures. *Appl Phys Lett*, 2005, 87: 173510
- 13 Matsumoto T, Nakada T, Endo J, et al. Multiphoton organic EL device having charge generation layer. *SID Int Symp Dig Tech*, 2003, 34: 979–981
- 14 Liao L S, Slusarek W K, Hatwar T K, et al. Tandem organic light-emitting mode using hexaazatriphenylene hexacarbonitrile in the intermediate connector. *Adv Mater*, 2008, 20: 324–329
- 15 Cho T Y, Lin C L, Wu C C. Microcavity two-unit tandem organic light-emitting devices having a high efficiency. *Appl Phys Lett*, 2006, 88: 111106
- 16 Liao L S, Klubek K P, Tang C W. High-efficiency tandem organic light-emitting diodes. *Appl Phys Lett*, 2004, 84: 167–169
- 17 Law C W, Lau K M, Fung M K, et al. Effective organic-based connection unit for stacked organic light-emitting devices. *Appl Phys Lett*, 2006, 89: 133511
- 18 Lai S L, Chan M Y, Fung M K, et al. Copper hexadecafluorophthalocyanine and copper phthalocyanine as a pure organic connecting unit in blue tandem organic light-emitting devices. *J Appl Phys*, 2007, 101: 014509
- 19 Zhang H M, Dai Y F, Ma D G, et al. High efficiency tandem organic light-emitting devices with $\text{Al}/\text{WO}_3/\text{Au}$ interconnecting layer. *Appl Phys Lett*, 2007, 91: 123504
- 20 Kanno H, Hamada Y, Nishimura K, et al. High efficiency stacked organic light-emitting diodes employing Li_2O as a connecting layer. *Jpn J Appl Phys* 1, 2006, 45: 9219–9223
- 21 Chang C C, Chen J F, Hwang S W, et al. Highly efficient white organic electroluminescent devices based on tandem architecture. *Appl Phys Lett*, 2005, 87: 253501
- 22 Sun J, Zhu X L, Peng H J, et al. Bright and efficient white stacked organic light-emitting diodes. *Org Electron*, 2007, 8: 305–310
- 23 Liao L S, Ren X, Begley W J, et al. Tandem white OLEDs combining fluorescent and phosphorescent emission. *SID Int Symp Dig Tech*, 2008, 39: 818–821
- 24 Spindler J P, Hatwar T K. Fluorescent-based tandem white OLEDs designed for display and solid-state-lighting applications. *J Soc Inf Display*, 2009, 17: 861–868
- 25 Kroger M, Hamwi S, Meyer J, et al. Role of the deep-lying electronic states of MoO_3 in the enhancement of hole-injection in organic thin films. *Appl Phys Lett*, 2009, 95: 123301
- 26 Bao Q Y, Yang J P, Li Y Q, et al. Electronic structures of MoO_3 -based charge generation layer for tandem organic light-emitting diodes. *Appl Phys Lett*, 2010, 97: 063303
- 27 Meyer J, Kroger M, Hamwi S, et al. Charge generation layers comprising transition metal-oxide/organic interfaces: Electronic structure and charge generation mechanism. *Appl Phys Lett*, 2010, 96: 193302
- 28 Bao Q Y, Yang J P, Tang J X, et al. Interfacial electronic structures of WO_3 -based intermediate connectors in tandem organic light-emitting diodes. *Org Electron*, 2010, 11: 1578–1583
- 29 Kang S J, Yi Y, Kim C Y, et al. Energy level diagrams of C_{60} /pentacene/Au and pentacene/ C_{60} /Au. *Syn Met*, 2006, 156: 32–37
- 30 Kang S J, Yi Y, Kim C Y, et al. Ambipolar organic thin-film transistors using C_{60} /pentacene structure: Characterization of electronic structure and device property. *Appl Phys Lett*, 2005, 87: 233502
- 31 Verlaak S, Beljonne D, Cheyns D, et al. Electronic structure and geminate pair energetics at organic-organic interfaces: The case of pentacene/ C_{60} heterojunctions. *Adv Funct Mater*, 2009, 19: 3809–3814
- 32 Bao Q Y, Yang J P, Li Y Q, et al. Electronic structures of MoO_3 -based charge generation layer for tandem organic light-emitting diodes. *Appl Phys Lett*, 2010, 97: 063303
- 33 Ishii H, Sugiyama K, Ito E, et al. Energy level alignment and interfacial electronic structures at organic metal and organic organic interfaces. *Adv Mater*, 1999, 11: 605–625
- 34 Avilov I, Geskin V, Cornil J. Quantum-chemical characterization of the origin of dipole formation at molecular organic/organic interfaces. *Adv Funct Mater*, 2009, 19: 624–633
- 35 Vazquez H, Gao W, Flores F, et al. Energy level alignment at organic heterojunctions: Role of the charge neutrality level. *Phys Rev B*, 2005, 71: 041306

- 36 Rand B P, Xue J G, Uchida S, et al. Mixed donor-acceptor molecular heterojunctions for photovoltaic applications. I. Material properties. *J Appl Phys*, 2005, 98: 124902
- 37 Dimitrakopoulos C D, Mascaro D J. Organic thin-film transistors: A review of recent advances. *Ibm J Res Dev*, 2001, 45: 11–27

Organic semiconductor heterojunction charge generation layer and its application in tandem organic light-emitting diodes

CHEN YongHua & MA DongGe

State Key Laboratory of Polymer Physics and Chemistry, Changchun Institute of Applied Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China

Tandem organic light-emitting diodes (OLEDs) have attracted a great deal of attention from researchers because of their high luminance, efficiency and stability. This paper summarizes past advances in the study of tandem OLEDs. Then, we present a bilayer organic semiconductor heterojunction charge generation layer made of p- and n-type organic semiconductors. A low operational voltage, high power efficiency tandem OLED was fabricated using this charge generation layer as a connecting unit. We also analyze the physical mechanisms that guide the operation of the device, and discuss methods for reducing the voltage and enhancing the power efficiency. Our design concept provides a template for the fabrication of high performance tandem OLEDs. Finally, we discuss the future of tandem OLED technologies.

organic semiconductor heterojunction, tandem OLED, charge generation layer, power efficiency

doi: 10.1360/972011-990