

文章编号: 0253-2239(2007)11-2021-6

PS-TPD 空穴传输层的高亮度绿光有机电致发光器件的研究*

锁 钊 于军胜 邓 静 娄双玲 蒋亚东

(电子科技大学光电信息学院电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 成都 610054)

摘要: 研究了不同质量比的聚苯乙烯(PS)-三苯基二胺(TPD)复合空穴传输层对有机电致发光器件(OLED)性能的影响。采用此掺杂体系作器件的空穴传输层,利用旋涂工艺制备了结构为 indium-tin-oxide (ITO)/polystyrene (PS):N,N'-bis(3-methylphenyl)-N,N'-diphenylbenzidine (TPD)/tris-(8-hydroxyquinoline)-aluminium (Alq₃)/Mg:Ag 的双层有机电致发光器件。为便于比较,另直接蒸镀 TPD 薄膜做空穴传输层制备了相似结构的器件。利用飞行时间法对不同 PS-TPD 质量比例的薄膜的空穴迁移率进行了表征,并对器件的电致发光特性进行了测试。测试结果表明,掺杂薄膜的空穴迁移率比纯 TPD 膜的低 1~2 个数量级。当质量比为 $m(\text{PS}):m(\text{TPD})=10:90$ 时,器件具有最高光亮度 14280 cd/m^2 和最高流明效率 1.2 lm/W 。说明适当质量比 PS 的引入相对降低了薄膜的空穴迁移率,调节了 TPD 的空穴传输能力,更有效地平衡了复合区内正负载流子的数目,从而提高了器件的发光亮度和效率。

关键词: 材料;有机电致发光;空穴传输;掺杂;聚苯乙烯;三苯基二胺

中图分类号: TN383+.1 文献标识码: A

Study on High-Brightness Green Organic Light-Emitting Devices Using PS-TPD as Hole Transporting Layer

Suo Fan Yu Junsheng Deng Jing Lou Shuangling Jiang Yadong

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)

Abstract: The effect of the composite hole transporting layer with different polystyrene (PS)-triphenyl diamine (TPD) mass ratios on the performance of organic light-emitting devices (OLEDs) was investigated. By using this blending system as hole transporting layer, a double-layer organic light-emitting device was fabricated with the structure of indium-tin-oxide (ITO)/polystyrene (PS):N,N'-bis(3-methylphenyl)-N,N'-diphenylbenzidine (TPD)/tris-(8-hydroxyquinoline)-aluminum (Alq₃)/Mg:Ag by the spin-coating technique. For comparison, a similar double-layer device was fabricated using pure TPD as hole transporting layer by thermal vacuum deposition method. The hole drift mobility of PS-TPD thin films with different mass ratios was characterized by time-of-flight method, and electroluminescent characteristics of these devices were measured. Results demonstrated that the hole mobility of blending thin films is 1~2 orders of magnitude lower than that of pure TPD film. When the mass ratio is $m(\text{PS}):m(\text{TPD})=10:90$, the device has a maximum luminance of 14280 cd/m^2 and a maximum lumen efficiency of 1.2 lm/W . It was concluded that the incorporation of PS with proper concentration will lower the hole mobility of the functional layer, adjust the hole transporting ability of TPD, more effectively balance the number of positive and negative charge carriers in the recombination zone, and thus enhance the luminance and efficiency of the device.

Key words: material; organic electroluminescence; hole transportation; doping; polystyrene, triphenyl diamine

* 国家杰出青年科学基金项目(60425101)和“电子科技大学中青年学术带头人”计划(060206)资助课题。

作者简介: 锁 钊(1982-),男,回族,四川人,硕士研究生,主要从事有机电致发光器件及其技术等方面的研究。

E-mail: lulu882@yeah.net

导师简介: 于军胜(1970-),男,山东人,教授,博士生导师,主要从事有机光电子器件及技术的研究工作。

E-mail: jsyu@uestc.edu.cn

收稿日期: 2007-02-02; 收到修改稿日期: 2007-04-30

1 引 言

高亮度有机电致发光器件(OLED)研究工作日益深入和广泛,在理论和实验上都取得了巨大的进展^[1~5]。有机电致发光器件以其独特的优点在平板信息显示领域占据越来越重要的地位。目前的研究工作主要集中在开发新的高效发光材料和高性能的载流子输运材料、完善有机材料的成膜技术、改进器件结构设计以及探索器件内部微观量子物理机理上。

在单层结构的基础上演化而来的双层和三层结构器件大都采用了加入空穴传输层的器件结构模式。用于空穴传输的有机小分子和聚合物材料层出不穷,这些材料对于提高空穴在器件阳极区的迁移率、平衡正负载流子的传输都起到了重要作用。研究发现,三苯胺衍生物作为空穴传输材料在很大程度上提高了器件的效率和稳定性^[6~8]。其中三苯基二胺(TPD)是实验中常采用的一种小分子材料,其空穴迁移率为 $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 量级^[9]。TPD 的玻璃化转变温度为 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,易于升华,所以许多情况下都是直接将 TPD 真空蒸镀成膜器件化。考虑到 TPD 所具有的高空穴迁移率以及真空蒸镀法对设备和环境的要求较高,本研究采用将 TPD 掺入聚合物基质聚苯乙烯(PS)中,利用工艺相对简单、制作成本较低的旋涂技术制备 PS-TPD 复合薄膜作为空穴传输层的绿光有机电致发光器件,并研究了其发光特性。由于 PS 是一种电绝缘介质,具有光学和电学惰性且具有良好的成膜特性,利用其充当基质会对 TPD 的空穴传输能力起到调节作用,改变

有机半导体薄膜的空穴迁移率,以使空穴传输与电子传输相匹配,达到提高器件内部载流子辐射性复合的概率、改善器件发光亮度和效率的目的。同时 PS 作为聚合物材料,具有一定的粘度,可以较容易地调节 PS-TPD 掺杂体系的黏度和流变特性,最终实现利用喷墨打印方式的器件化工艺。

2 实 验

选用 PS-TPD 掺杂复合膜做空穴传输层, Alq_3 兼做电子传输层和发光层。各材料的化学结构式如图 1 所示。选用方阻为 $15 \text{ } \Omega$ 的氧化铟锡(ITO)导电玻璃基片做器件阳极,依次使用丙酮、洗涤剂、无水乙醇、去离子水擦洗和超声清洗 15 min ,再用干燥 N_2 吹干。对 ITO 基片进行了等离子体处理(Plasma treatment, PT)操作^[10,11]。对 PS-TPD 器件,轰击后将基片置于 KW-4A 型台式匀胶机上进行不同浓度的 PS/TPD 薄膜旋涂,膜厚约 70 nm 。涂后将基片移入 OLED-V 型真空沉积设备蒸镀有机层和金属电极。对 TPD 器件,轰击后直接进行有机小分子(TPD 和 Alq_3)与阴极的蒸镀。在不破坏真空度的连续高真空条件下(有机腔和金属腔的真空度分别为 $1.0 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 和 $1.3 \times 10^{-3} \text{ Pa}$),利用石英晶体振荡器原位(in situ)监控成膜速率和厚度,将有机层 TPD(厚度约 70 nm)和 Alq_3 (厚度约 50 nm)及金属电极(厚度为 300 nm 、质量比为 $10:1$ 的 $\text{Mg}:\text{Ag}$ 合金)的蒸发速率分别控制在 $(0.1 \sim 0.2) \text{ nm/s}$ 和 $\sim 2 \text{ nm/s}$ 。器件有效发光面积均为 $0.5 \text{ cm} \times 0.6 \text{ cm}$ 。

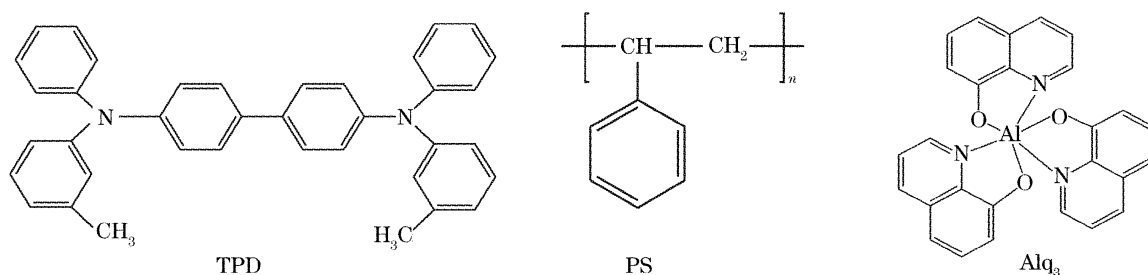


图 1 材料的分子结构式

Fig. 1 Molecular structure of materials used

3 结果与讨论

3.1 PS-TPD 薄膜空穴迁移率测量

利用飞行时间法^[12,13](Time-of-flight, TOF)测出了 TPD 膜和不同质量比的 PS-TPD 膜的空穴迁移率。为便于描述,把 PS 与 TPD 的质量比记为 $m(\text{PS}):m(\text{TPD})$,对 A~E 各器件分别标识如下:ITO-[PS:

TPD ($m(\text{PS}):m(\text{TPD})=0:100,10:90,20:80,30:70,50:50$)]/ Alq_3 /[$\text{Mg}:\text{Ag}$ ($m(\text{Mg}):m(\text{Ag})=10:1$)]. 图 2 是用飞行时间法测试数据的曲线。在 400 V 的偏置电压下(此时膜内的电场强度约为 $2 \times 10^5 \text{ V/cm}$,这相当于器件正常工作时的内部场强),对厚度为 $20 \text{ } \mu\text{m}$ 的 PS-TPD 薄膜进行了测定。根据

(1)式,求出了各种不同掺杂浓度下 PS-TPD 薄膜的空穴迁移率值:

$$\mu = d^2 / (Vt), \quad (1)$$

(1) 式中 μ 为电荷载流子迁移率, d 为膜厚度(单位: cm), V 为偏置电压, t 为飞行时间。计算所得 A~E 各器件薄膜的空穴迁移率分别为:

A: $1.25 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 / \text{Vs}$, B: $8.4 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 / \text{Vs}$,
C: $2.02 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 / \text{Vs}$, D: $2.32 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 / \text{Vs}$,

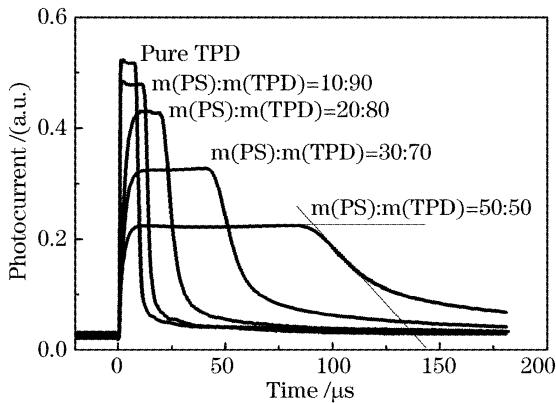


图 2 飞行时间法测定的空穴迁移率的曲线

Fig. 2 Transient curves of measured hole mobility by time-of-flight technique

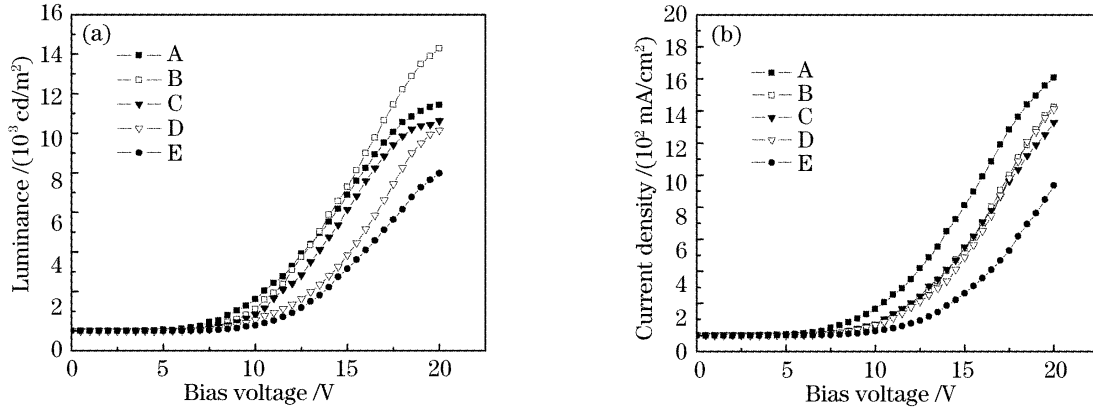


图 3 器件的 L-V 特性曲线(a)和 J-V 特性曲线(b)

Fig. 3 Luminance-Voltage (L-V) (a) and current density-Voltage (J-V) (b) curves of devices

从图 3(a)中可以看出,随着驱动电压增加,器件的发光亮度相应增大。但各器件的亮度增幅有所不同。 $m(\text{PS}):m(\text{TPD})=10:90$ 的器件 B 具有最大的增幅,在 20 V 电压时其最大亮度为 14280 cd/m^2 ,而纯 TPD 器件的最大亮度为 11429 cd/m^2 。可见两种器件的发光亮度均较高,但纯 TPD 器件的最大亮度比 PS-TPD 器件 B 低了近 2850 cd/m^2 。其他质量比的 PS-TPD 器件的最大亮度基本随 PS 百分比的增大依次降低。器件 C~E 在 20 V 电压时的最大亮度分别为 10623 cd/m^2 , 10140 cd/m^2 和 7968 cd/m^2 。可见,各种器件在其他结构和测试条件完全相同的情况下,亮度性能上的差异主要来源于空穴传输层的不同

E: $9.2 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 / \text{Vs}$ 。

由图 2 曲线和计算的结果可以看出,掺杂薄膜的空穴迁移率比纯 TPD 膜的低 1~2 个数量级,且呈现出 PS 浓度越高,膜的空穴迁移率越低的趋势。可见,PS 的加入确实降低了 PS-TPD 掺杂膜的空穴迁移率。PS 作为基质在体系中起到类似于溶剂的分散作用,增加了 TPD 分子之间的距离,使空穴在 TPD 分子间的跳跃式迁移运动变得相对困难,因而使得空穴迁移率下降。但从理论上讲,PS 的浓度并非越高越好,因为太高的 PS 浓度会大大降低 TPD 膜的空穴迁移率,以致使复合区的空穴数量明显少于电子,无法实现载流子传输平衡和数目匹配。因此从器件性能方面考虑,选择合适的 PS-TPD 质量比,寻求最佳值,才能实现器件优化。

3.2 电致发光特性测量

采用美国 KEITHLEY-4200CSC 半导体特性测试仪和 ST-86LA 亮度计测试了未封装器件的电流密度-电压(J-V),亮度-电压(L-V)特性,驱动电压变化范围为 0~20 V。图 3 示出了器件该项性能参量的测试曲线。

同作用:对于 TPD 蒸镀器件,所形成的 TPD 薄膜具有很高的空穴迁移率(约在 $10^{-3} \text{ cm}^2 / \text{Vs}$ 量级),而 Alq_3 的电子迁移率在 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ cm}^2 / \text{Vs}$,远低于空穴的迁移率。根据器件能级结构^[4](如图 4 所示),TPD 的最低未占据分子轨道(LUMO 能级)为 2.5 eV,最高占据分子轨道(HOMO 能级)为 5.4 eV; Alq_3 的 LUMO 能级和 HOMO 能级分别为 2.9 eV 和 5.8 eV;ITO 阳极的功函数 Φ_{w1} 为 4.8 eV; Mg-Ag 阴极的功函数 Φ_{w2} 为 3.7 eV。可见,TPD 的加入大大降低了 ITO 阳极与 Alq_3 发光层之间的空穴注入势垒 Φ_i (从 1.0 eV 变为 0.6 eV),使得空穴很容易穿过 TPD 层进入到 Alq_3

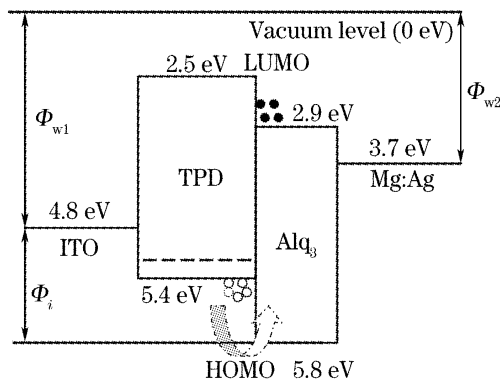


图 4 器件的能级结构图

Fig. 4 Energy level diagram of the devices

层中,而 Alq_3 本身的电子传输能力使得电子在该层中亦易于传输,在 TPD- Alq_3 的界面处,正负载流子相遇而发生辐射性复合,表现出较高的发光亮度。但由于复合区位于 Alq_3 层,与金属电极的距离较小,一部分电子容易在阴极附近发生淬灭,导致 TPD- Alq_3 界面处空穴浓度远大于电子,从而使激子在发生辐射跃迁时发射光子的浓度减小。PS 本身的介电性降低了空穴在 TPD 分子间的跳跃迁移运动,使 PS-TPD 层的空穴迁移率有所降低。表现在能级图上相当于空穴势垒的升高,如图 4 中虚线所示(这只是一种简化的分析模型,由于 PS 与 TPD 分子内部之间存在复杂的微观相互作用,其实际的物理机理有待进一步深入研究)。这在一定程度上调节了从 PS-TPD 膜注入到 Alq_3 层中的空穴数量,使得内界面处正负载流子的数目更趋于平衡,能够产生更有效的辐射性复合,故具有适当 PS-TPD 质量比的器件 B 的亮度高于纯 TPD 蒸镀器件。虽然 PS 的加入有助于调节 TPD 薄膜的空穴迁移率,但是 PS 的掺杂质量比也不能太高,太高的 PS 浓度会大大降低薄膜的空穴传导性能,导致空穴迁移率可能反而低于电子迁移率而造成正负载流子数目不匹

配,影响器件的发光性能。因此,PS-TPD 的质量比存在最佳值。从亮度指标看,最佳的 PS-TPD 质量比应为 $m(\text{PS}):m(\text{TPD})=10:90$ 。

从图 3(b)中看到,随驱动电压的增加,各器件的电流密度值均增大。并且在高电场强度下(大于 10 V),电流密度与正向偏置电压呈指数关系,具有典型的二极管整流特性,表明各器件有机功能薄膜的成膜特性和半导体特性均较好。器件 A~D 的最大电流密度值相近,但 TPD 器件的电流密度稍大于 PS-TPD 器件的电流密度。这一现象也源自 PS 本身良好的掺杂特性。一方面,高分子 PS 介质的加入会引入串联电阻而降低 PS-TPD 有机薄膜的导电能力,使其载流子传输能力相对下降,器件的电流密度也相应降低;另一方面,PS 与 TPD 的掺杂体系改变了 TPD- Alq_3 界面的界面态,增加了异质界面的接触电阻,从而使电流密度降低。此外,旋涂与蒸镀会形成不同形态的薄膜,工艺上的差别也会对异质界面的电学特性产生一定的影响。对于器件 E,其电流密度远远低于其他器件。这主要是因为太高的 PS 浓度显著地降低了薄膜的空穴迁移率,使得薄膜的等效电阻也大大增加。图 5 是利用原子力显微镜(AFM)手段对器件 A,B 和 E 的薄膜的表面形貌进行表征的结果,探针扫描区域的面积为 $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ 。从图中可以看到,由于大量 TPD 分子在真空沉积过程中分布的不均匀性,蒸镀薄膜的表面可能存在针孔或间隙,其最大峰谷值(R_{p-v})为 10 nm,降低了成膜质量而影响薄膜的光电性能。而不同组分质量比的旋涂膜其成膜质量也会产生差异。虽然器件 B 和 E 的薄膜的最大峰谷值都仅为 3 nm,但前者的薄膜平滑度和规整性要优于后者,这跟小分子-聚合物掺杂体系在不同质量比例条件下本身的杂质分布状况和成膜特性有关。

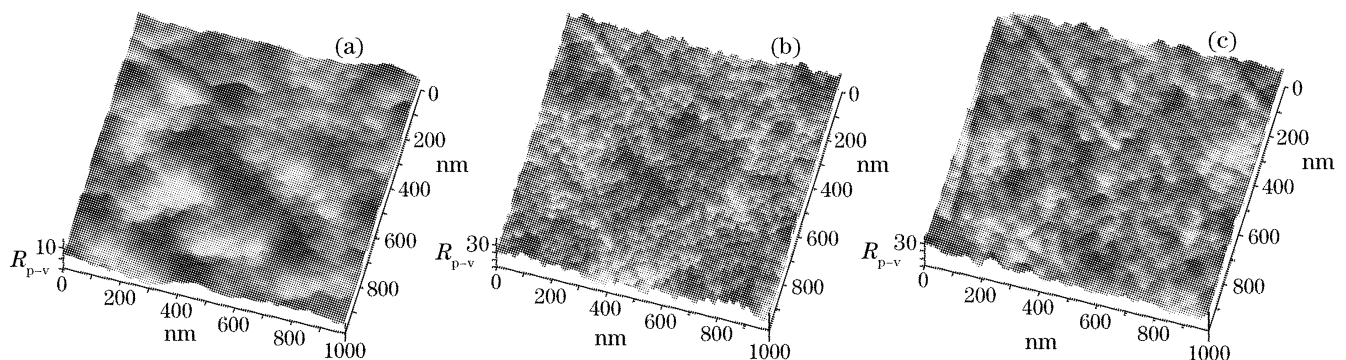


图 5 器件 A (a), B (b), E (c) 的空穴传输薄膜原子力显微镜表面形貌

Fig. 5 Atomic force microscope images of hole-transporting thin films of device A (a), B (b) and E (c)

3.3 流明效率测量

流明效率的计算公式如下^[14]:

$$\eta_L = \frac{\Phi}{P_{in}} = \frac{\pi BS}{IV_{bias}} = \frac{\pi B}{JV_{bias}}, \quad (2)$$

式中 P_{in} 为输入电功率(W), η_L 为发光的流明效率(lm/W), B 为发光亮度(cd/m²), S 为发光面积(m²), I 为器件电流值(A), V_{bias} 为测量所加的偏置电压(V), J 为相应的电流密度(A/m²)。根据(2)式计算得到了各器件在启亮后的最大流明效率分别为 0.8 lm/W、1.2 lm/W、0.46 lm/W、0.382 lm/W、0.345 lm/W。从效率指标衡量, $m(\text{PS}):m(\text{TPD})=10:90$ 仍是最佳的。图 6 为 A、B 两器件的流明效率随电压变化的曲线(为清晰起见, 只给出两具有代表性的器件的效率-电压特性)。从图中可见, PS-TPD 掺杂器件的效率平均更高。高效率来自更高的发光亮度和相对较低的电流密度值。亮度和电流密度的差异都源于 PS 对 TPD 有机膜的空穴传输能力的调节作用。从微观上讲, 引入 PS 使得掺杂器件内部空穴、电子注入数目更加平衡, 激子无辐射衰减数目减少, 辐射性复合的概率提高, 因此器件具有更高的效率。而在 TPD 器件内部, 激子没有完全以光辐射的形式释放能量, 可能以热能或者其他方式猝灭, 影响了器件的流明效率。同时从图中可以看到, OLED 器件的流明效率-电压曲线出现了峰值以及震荡。可以认为, 器件启亮后随外加偏压的增加, 注入载流子数目急剧增加, 进而显著提高了复合概率, 形成激子的数目以及辐射性衰减的概率也大大增加, 但在低电压时器件电流较小, 所以输入的电功率也较小。根据(2)式可知, 这时的器件效率也相对较大并有可能达到最大值; 随着电压进一步的增加, 器件内部电场强度也急剧增高, 此时一方面因电场强度的增大使两种载流子的相向迁移速率增加很

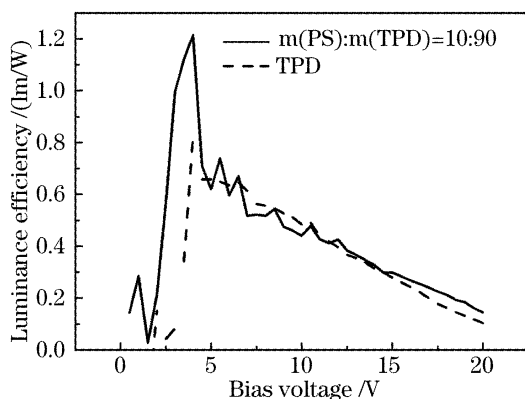


图 6 器件 A 和 B 的流明效率随电压的变化曲线
Fig. 6 Luminance efficiency versus bias voltage of two devices A and B

快, 反而会降低了它们相遇复合的概率, 而载流子被有机层内的陷阱俘获的概率却增加很快。这又进一步降低了载流子发生复合的概率; 另一方面, 电场强度的急剧增高也加大了激子解离还原成电子-空穴对的概率^[15,16]。这两个因素抵消了引起效率增加因素的作用, 从而使得器件效率在电压较高时出现震荡并呈现逐步下降的趋势。

4 结 论

将聚苯乙烯(PS)掺入 TPD 中, 利用旋涂法制备了具有不同 PS-TPD 质量比的复合有机功能薄膜。并直接蒸镀了小分子 TPD 与其对比, 测试了空穴传输薄膜的载流子迁移率和器件的电致发光特性。实验结果表明, 电绝缘介质聚合物 PS 的引入对 TPD 的空穴传输能力起到了调节作用, 从而改变了薄膜的空穴迁移率, 使得器件内部复合区域内的空穴数目与电子数目相匹配。因此提高了正负载流子发生辐射性复合的概率, 改善了器件的发光亮度和流明效率。同时, PS-TPD 掺杂薄膜存在一个最佳的质量比值, 具有该比值的器件的发光性能优于其他质量比的器件。该工作的研究结果, 对于优化有机电致发光器件结构, 调节器件的载流子传输速率, 增强器件的发光性能, 大幅度降低生产成本都具有一定的指导意义。

致谢 感谢美国佐治亚理工大学(Georgia Institute of Technology, USA) 电子工程学院的 Bernard Kippelen 教授提供 TOF 的测试条件。

参 考 文 献

- 1 C. W. Tang, S. A. Vanslyke. Organic electroluminescent diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**(12): 913~915
- 2 Junsheng Yu, Zhijian Chen, Masato Sone *et al.*. Red-light-emitting organic electroluminescent devices with bisanil dye as emitter[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, **40**(5A): 3201~3205
- 3 Ma Fengying, Jin Changqing, Qin Li *et al.*. Double mode emitting from a novel organic microcavity diode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 75~78 (in Chinese)
马凤英, 金长清, 秦莉等. 一种新型有机电致微腔结构的双模发射[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 75~78
- 4 Junsheng Yu, Weizhi Li, Yadong Jiang *et al.*. Bright-yellow organic light-emitting device using silole derivative as emitter[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2007, **46**(2): L31~L33
- 5 Zheng Xinyou, Zhu Wenqing, Wu Youzhi *et al.*. A white organic light emitting diode based on blue emitting material DPVBi[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 70~74 (in Chinese)
郑新友, 朱文清, 吴有智等. 以蓝色发光材料 DPVBi 为基质的白色发光器件[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 70~74
- 6 Shizuo Tokito, Hiromitsu Tanaka, Koji Noda *et al.*. Thermal stability in oligomeric triphenylamine/tris(8-quinolinolato)

- aluminum electroluminescent devices[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(15): 1929~1931
- 7 Y. J. Shi, C. H. Chen, S. A. van Slyke. Organic EL devices with high thermal stability[P]. U. S. Patent, 1996, 5, 554,450
- 8 Yasuhiko Shirota, Yoshiyuki Kuwabara, Hiroshi Inada. Multilayered organic electroluminescent device using a novel starburst molecule 4, 4', 4'-tris (3-methylphenylphenylamino) triphenylamine as a hole transport material[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **65**(7): 807~809
- 9 Junji Kido, Masafumi Kohda, Katsuro Okuyama *et al.*. Organic electroluminescent devices with polymeric materials[C]. *Proc. SPIE*, 1993, **1910**: 31~37
- 10 J. S. Kim, F. Cacialli, A. Cola *et al.*. Hall measurements of treated indium tin oxide surfaces[J]. *Synthetic Metals*, 2000, **111~112**: 363~367
- 11 T. P. Nguyen, P. Le Rendu, N. N. Dinh *et al.*. Thermal and chemical treatment of ITO substrates for improvement of OLED performance[J]. *Synthetic Metals*, 2003, **138**: 229~232
- 12 José-Luis Maldonado, Maximilienne Bishop, Canek Fuentes-Hernandez *et al.*. Effect of substitution on the hole mobility of bis (diarylamino) biphenyl derivative doped in poly (styrene)[J]. *Chem. Mater.*, 2003, **15**(4): 994~999
- 13 Baijun Chen, Shiyoun Liu. Measurement of electron/hole mobility in organic/polymeric thin films using modified time-of-flight apparatus[J]. *Synthetic Metals*, 1997, **91**: 169~171
- 14 Zhong Jian, Cheng Jianbo, Chen Wenbin *et al.*. Study on optoelectronic performance of highly bright red doping organic light emitting devices[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1392~1396 (in Chinese)
- 钟 建, 成建波, 陈文彬 等. 高亮度掺杂红色有机电致发光器件的制备与光电性能研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(9): 1392~1396
- 15 W. Stampor, J. Kalinowski, P. Di Marco *et al.*. Electric field effect on luminescence efficiency in 8-hydroxyquinoline aluminum (Alq₃) thin films [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(15): 1935~1937
- 16 J. Szymtkowski, W. Stampor, J. Kalinowski *et al.*. Electric field-assisted dissociation of singlet excitons in tris-(8-hydroxyquinolino) aluminum (III) [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(8): 1465~1467