

Alq 基有机发光二极管中 Liq 的“n 型掺杂”机理研究

苏江森¹, 吴有智^{1*}, 邹文静¹, 张材荣²

(兰州理工大学 1. 材料科学与工程学院; 2. 理学院, 兰州 730050)

摘要: 通过将 Liq (8-hydroxyquinolinato-lithium) 掺入电子传输层 Alq (tris (8-hydroxyquinolinato)aluminum) 中, 制备了具有不同结构的仅传输电子的单载流子器件。实验结果表明, 掺杂器件的电性能劣于含 Liq/Al 复合阴极的非掺杂器件, 优于含 Al 阴极的非掺杂器件, 这表明掺入 Alq 的 Liq 没有产生明显的“n 型掺杂”效应, 其具有双重作用: 掺杂后分散在 Alq/Al 阴极界面上的 Liq 以电子注入层的形式出现, 通过增强电子注入来提高器件电流; 掺杂后存在于 Alq 体相中的 Liq 由于自身的导电性差, 对电子传输具有不利影响, 从而降低了器件的电流。在电致发光器件的测试中, Liq 的掺杂表现出类似的现象, 掺入 Liq 的器件性能介于非掺杂具有 Liq/Al 阴极和 Al 阴极结构器件之间, 三种器件的最大电流效率分别为 3.96, 4.27 和 2.27 cd/A, 并且在吸收光谱和光致发光光谱中观察不到电荷转移所带来的额外变化。

关键词: 有机半导体; Liq; Alq; 界面修饰; 电荷转移

中图分类号: TN383.1 **文章编号:** 1001-5868(2023)04-0556-06

Mechanism of Liq's "N-Type Doping" in Alq Based Organic Light-Emitting Diodes

SU Jiangsen¹, WU Youzhi¹, ZOU Wenjing¹, ZHANG Cairong²

(1. School of Materials Science & Engineering; 2. School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, CHN)

Abstract: Electron-only devices with different structures were prepared by doping Liq (8-hydroxyquinolinato-lithium) into the electron transport layer Alq (tris (8-hydroxyquinolinato)aluminum). The experimental results show that the electrical properties of doped devices are inferior to those of non-doped devices with Liq/Al composite cathodes and superior to those of non-doped devices with Al only cathodes. This indicates that Liq's doped with Alq does not show any significant "n-doping" effect. The effect exhibits dual roles: Liq molecules dispersed at the Alq/Al cathode interfaces after doping display as electron injection layers, which enhances the device currents by enhancing electron injection; those in the bulk of Alq after doping have a detrimental effect on electron transport due to their own poor conductivity, consequently decrease the device currents. In the tests of electroluminescent devices, the doping of Liq shows a similar behavior. The performance of Liq-doped device is between the non-doped devices with Liq/Al cathode and Al cathode structures, with maximum current efficiencies of 3.96, 4.27 and 2.27 cd/A for the three devices, respectively, and no additional changes caused by charge transfer are observed in the absorption and photoluminescent spectra.

Key words: organic semiconductor; Liq; Alq; interface modification; charge transfer

收稿日期: 2023-05-08.

* 通信作者: 吴有智 E-mail: youzhiwu@163.com

0 引言

自从1987年首次报道了高效有机电致发光二极管(Organic Light-Emitting Diode, OLED)以来^[1], OLED由于具有轻重量、高对比度以及响应快等优点成为目前平板显示技术的研究热点。尽管在改善OLED的性能方面已经取得了良好的进展,但低驱动电压和高发光效率OLED仍是主要研究目标^[2]。然而由于有机半导体较低的本征载流子浓度,以及有机材料与电极界面之间不匹配的能级排列^[3],使得OLED器件的驱动电压通常高于无机器件。作为双电荷载流子注入型器件,提高电子注入和传输的能力是改善以上问题的关键,这是因为有机半导体中电子的迁移率通常在 $10^{-4} \sim 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{S}^{-1}$,空穴的迁移率一般在 $10^{-2} \sim 10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{S}^{-1}$ 范围内,空穴迁移率比电子迁移率高2个数量级,这就导致发光层中空穴与电子数量的不平衡,多余的空穴会穿过器件直接进入阴极而限制了OLED发光效率的提高。与无机半导体的掺杂类似,有机半导体中的电掺杂也已被用作增强载流子传输和增强器件性能的一种方法^[4-8]。

在对电子传输层进行n型掺杂时,要求n型掺杂剂具有低的功函数和高的导带或者最高占据分子轨道能级,这就使得n型掺杂剂更不稳定并且符合条件的较少,n型掺杂在技术上难以实现^[9-10]。在早期的研究中,碱金属如锂(Li)^[11]和铯(Cs)^[12]由于较低的功函数满足了n型掺杂剂的要求,被用作在电子传输层中进行n型掺杂。但是仍存在问题:一方面,碱金属化学性质活泼,当环境中存在氧和水时是极不稳定的,会导致器件制造困难;另一方面,碱金属阳离子很容易扩散到临近的发光层中,造成激子的淬灭。而碱金属化合物因易于处理,化学稳定等特点被当做有效的n型掺杂剂,如氟化锂(LiF)、碳酸锂(Li_2CO_3)、氟化铯(CsF)和叠氮化铯(CsN_3)等^[13-18],但碱金属化合物等无机掺杂剂蒸发温度较高,会破坏下面的有机层,造成器件的不稳定,因此具有较低蒸发温度的有机n型掺杂剂进入了研究人员的视野。其中最典型是Liq(8-hydroxyquinolinatolithium),蒸发温度约在 200°C ^[19],并常用作OLED电子注入层,研究^[20]表明可以在Alq/Liq/Al界面上实现近欧姆接触。但Liq具有较好的热稳定性,能否像碱金属一样轻易给出电子并充当n型掺杂剂仍值得期待,另外Liq掺杂导致器件性能改变的机

理更值得研究。

在文中,以不同比例的Alq:Liq为电子传输层,设计了具有不同阴极结构(Al, Liq/Al)的只传输电子的单载流子器件。实验结果表明,采用Al阴极结构时,Alq:Liq掺杂器件电性能提升,而采用Liq/Al阴极结构时,Alq:Liq掺杂器件电性能降低。在电致发光(Electroluminescent, EL)器件测试中,掺杂Liq的器件的性能介于Liq/Al和Al阴极结构的非掺杂器件之间,三种结构器件的最大电流效率分别为3.96, 4.27和2.27 cd/A。

1 实验

在实验中, OLED器件是在方块电阻约为 $10 \Omega/\square$ 的ITO(Indium Tin Oxides)玻璃基底上制作的,器件的发光面积为 $1 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。在使用ITO基底前,需要使用洗涤剂溶液、丙酮和去离子水将其依次进行超声清洗,用红外灯烘干后迅速放入真空室内,在真空度约为 $6 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 的条件下,通过常规电阻加热,将所有功能层按照特定顺序蒸镀到ITO基底上,有机层和阴极层的厚度由石英晶体振荡厚度监控仪监测。Alq:Liq薄膜在两个独立的源中进行共蒸发得到,通过改变不同蒸发源的蒸发速率来控制掺杂浓度。首先,制备了只传输电子的单载流子器件,结构为ITO/Al(2 nm)/Alq:Liq(60 nm, $x \text{ wt}\%$)/cathode; $x=0, 5, 15, 25, 35$, 阴极为Al或者Liq(0.5 nm)/Al。靠近阳极ITO的Al(2 nm)被用来降低ITO的功函数,以防止空穴从阳极一侧注入。随后制备了电致发光器件,结构为ITO/ MoO_3 (0.5 nm)/TPD(50 nm)/Alq(30 nm)/Alq:Liq(25 wt%, 30 nm)/Al。为进行比较,还制备了类似结构的非掺杂器件:ITO/ MoO_3 (0.5 nm)/TPD(50 nm)/Alq(60 nm)/cathode(Liq/Al, Al)。实验中所用有机材料的化学结构式如图1所示。其中, MoO_3 , TPD分别被用作空穴注入层、空穴传输层, Alq被用作电子传输层和发光层, Liq作为掺杂剂掺杂进电子传输层Alq中。薄膜吸收光谱由紫外-可见-近红外分光光度计Lambda35测量,用Keithley 2400数字源表测量了器件的电学特性,器件的光学特性使用Libero PR650光谱扫描色度计测量。所有的测量都是在室温大气氛围下进行的,没有进行任何防护处理。

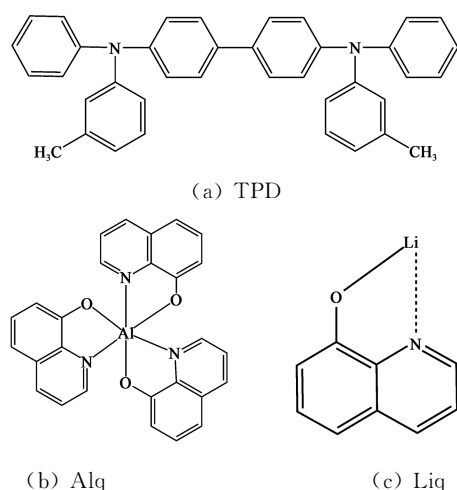
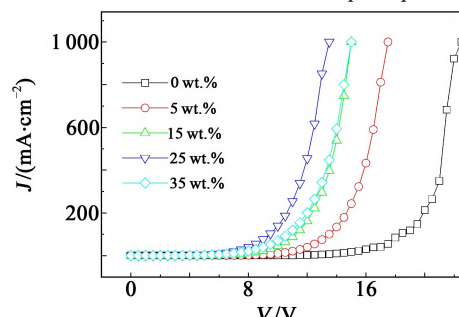


图1 所用有机材料的化学结构式

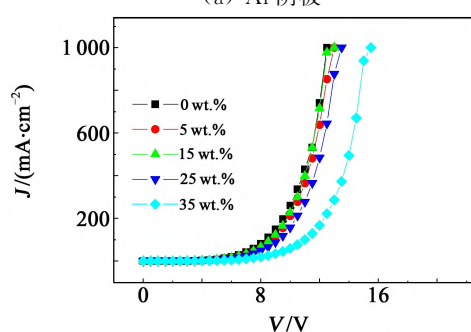
2 结果与讨论

当 Al 和 Liq/Al 作为阴极结构时,不同 Liq 掺杂比例的只传输电子的单载流子器件的电流密度-电压(J - V)曲线分别如图 2(a)和(b)所示。如图 2(a)所示,对于阴极为 Al 的器件,当掺杂浓度在(0~25) wt%范围内时,在相同电压下的电流密度随着 Liq 在 Alq 中掺杂浓度的增加而单调地提高;当掺杂浓度超过 25 wt%时,器件的电流密度开始下降,表明 25 wt%是最佳的掺杂浓度。例如,在驱动电压为 8 V 时,掺杂浓度 0 wt%,5 wt%,15 wt%,25 wt%,35 wt%所对应的电流密度分别为 0.14,1.77,10.3,39.2 和 21.2 mA/cm²,具有 Liq 掺杂层的器件相比于未掺杂器件,电流密度提高了 1~2 个数量级。在单载流子器件中,电流密度的提高归因于电子数量的增加,至于电子数量的增加得益于 Liq 的引入带来了额外的自由电子亦或是电子注入势垒的降低导致电子注入的增强还需要进一步讨论。然而,在 Liq/Al 复合阴极的情况下,在 0 wt%~35 wt%掺杂范围内,相比于未掺杂器件,相同电压下器件的电流密度均下降,且随着掺杂浓度的增加,器件的电学性能逐渐变差。上述结果表明,Liq 掺杂对 Alq 中电子传输的影响取决于对阴极电子注入的修饰。上述浓度的 Liq 掺杂对 Al-阴极器件电学性能的提高均有积极影响,但均对 Liq/Al-阴极器件性能提高表现出消极影响。事实上,在 Alq 中掺入 Liq 的目的是通过某些电荷转移(Charge Transfer,CT)机制来提高载流子或者电子的浓度,这已经在 p 型掺杂系统中被观察到并得到证明^[21-22]。如果 Liq 的掺杂确实增加了电子的数量,即提高了载流子的浓度,那

么阴极结构不论为 Al 或者 Liq/Al,Liq 掺杂后器件的电学性能应该均得到改善,然而实验结果却给出了相反的结论。基于以上的实验事实,认为由 CT 诱导的 n 型掺杂并没有发生在 Liq-Alq 体系中。



(a) Al 阴极



(b) Liq/Al 阴极

图2 Al 和 Liq(0.5 nm)/Al 阴极下不同掺杂比例 Alq : Liq 只传输电子的单载流子器件的 J - V 曲线

对 Liq 在 Alq 中的 n 型掺杂研究表明,Liq 在 Alq 中掺杂导致器件电流密度升高的原因有以下两种说法:一是 Liq 发生分解给出电子^[23];二是相较于 Alq,Liq 是一种更有序的有机半导体,在 Alq 中加入 Liq 后,体系的无序度下降。而由于载流子迁移率随能量的无序度下降而提高,因此 Liq 的掺杂使得器件的载流子迁移率得到提高^[24]。在第一种说法中,Juang 等^[23]也制备了只有电子传输的单载流子器件,并将在 Al 阴极情况下,Liq 掺杂 Alq 导致固定电压下电流密度的增加归因于 Liq 中 Li 与羟基喹啉配体的结合能较低,随后 Li 在蒸发过程中会得到释放,将电子转移到 Alq 上,从而增加了自由电子浓度并使得 Alq 的 E_F 向 LUMO 能级移动。在对空穴传输材料进行 p 型掺杂时,如 MoO₃ 掺杂 NPB 时,只传输空穴的单载流子器件在阳极附近的结构通常为 ITO/MoO₃/NPB: MoO₃,这时将器件电学性能的改善归因于 NPB 与掺杂剂 MoO₃ 之间 CT 复合物的生成。而在对电子传输层进行 n 型掺杂实验时,如 Liq,LiF,Na₂CO₃ 等 n 型掺杂剂掺杂 Alq 时,只传输电子的单载流子器件在阴极附近的

结构通常为 Alq : n dopant/Al, 也将器件电学性能的提高归因于 Alq 与所谓“n 型掺杂剂”间的电荷转移。相比于 p 型掺杂结构, 不难发现 n 型掺杂结构在掺杂后会丢掉电子注入层。但若 n 型掺杂剂真的给出了电子, 不应因为再在电子传输层和 Al 阴极界面上加入电子注入层而停止该过程。相反地, 通过加上电子注入层对阴极修饰后, 反而会降低电子的注入势垒, 使得器件的电学性能在有掺杂层的基础上进一步提高, 然而在报道的文献中未见此类设计。结合图 2(b) 的数据, Liq 不会真正的给出电子。在第二种说法中, Liq 掺杂后导致 Alq 薄膜无序度的下降而引起载流子迁移率的提高也应对电子注入层的存在与否没有选择性, 但在实验结果中不是这样。在图 2 中, Alq 中掺杂 Liq 后所观察到的电学特性的改善其实是由于界面效应: Al 阴极附近的 Liq 形成了一种特殊的界面结构, 从而改善了阴极的电子注入。因此对于 Al 阴极器件, 靠近阴极界面的 Liq 起到了电子注入层的作用, 降低了电子的注入势垒, 提高了器件性能; 而对于 Liq/Al 阴极器件, 阴极电子注入已经得到了很好地修饰, 电子注入势垒很低, 掺入 Alq 体相中的 Liq 因其导电性劣于 Alq^[25], 因此降低了器件性能。这被图 2(b) 所示的实验结果所证实。而在图 2(b) 中, Liq 掺杂浓度为 15 wt% 和 5 wt% 时, 器件的电流密度与非掺杂但具有 Liq/Al 阴极器件的电流密度接近。这是由于 Liq 作为一种有机半导体材料, LUMO 能级 (3.1 eV)^[26] 与 Alq 的 LUMO (3.0 eV)^[27] 能级接近, 且两者同为喹啉类有机化合物, 因此掺杂进 Alq 薄膜中的 Liq 在低浓度下不会对电子的输运造成明显的影响。并且当 Liq 作电子注入层时, 器件性能对注入层厚度表现出较低的敏感性^[20], 因此在较高 Liq 掺杂浓度下器件才会表现出明显的性能劣化。

结合图 2(a) 和 (b) 中的数据得到图 3, 可以清晰地看出当 Liq 掺杂在 Alq 中时, 在同一电压下, 不同阴极结构 (Al, Liq/Al) 的掺杂器件的电流密度大小处在未掺杂的 Al 阴极器件和 Liq/Al 复合阴极器件之间, 图中空心符号分别对应于具有 Al 阴极和 Liq/Al 阴极器件。在阴极结构为 Al 时, 在相同电压下, 35 wt% 掺杂浓度器件的电流密度相比于 25 wt% 掺杂器件的电流密度开始下降, 但仍是远远优于非掺杂器件。尽管 Liq 的导电性不如 Alq, 在阴极上无电子注入层时, Liq 掺杂后却仍会导致器件性能的提高, 这足以说明阴极界面修饰对于

OLED 器件电子注入的重要性。

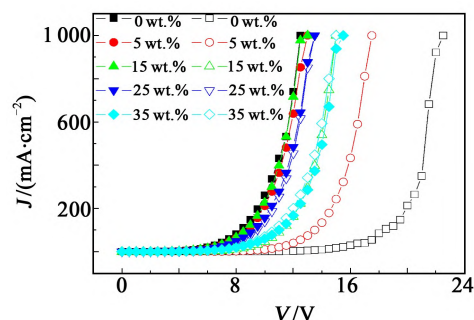
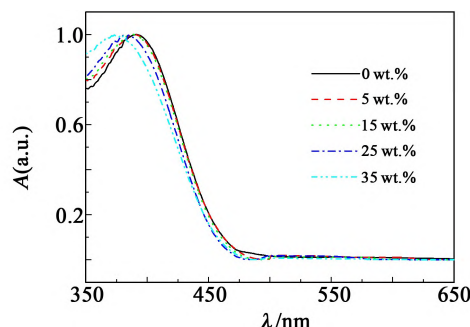
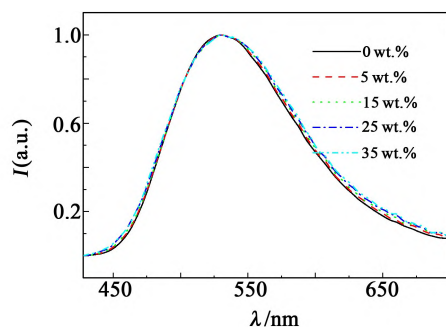


图 3 单载流子器件的 J - V 曲线



(a) 吸收光谱



(b) 光致发光光谱

图 4 不同比例 Alq : Liq 薄膜的吸收光谱和光致发光光谱

在空穴传输材料的 NPB : MoO₃ 掺杂体系中, 可以观察到非常好的 p 型掺杂效应, p 型掺杂效应起因于 CT 过程, 且伴随着与 CT 过程相对应的额外吸收峰。为确定该过程是否也发生在 Alq : Liq 掺杂体系中, 对 Liq 掺杂与非掺杂的 Alq 薄膜进行了吸收测试, 另外还进行了光致发光 (Photoluminescence, PL) 测试, 结果如图 4 所示。从图 4(a) 中可以发现, 纯 Alq 薄膜的吸收光谱在约 390 nm 处达到峰值^[28], 而掺入 Liq 薄膜的吸收光谱略微向短波区域发生转移, 随着 Liq 掺杂浓度越高, 吸收光谱的蓝移越明显。但在 Alq : Liq 系统中并没有观察到如 NPB : MoO₃ 系统所产生的额外吸收峰, 结合图 2 的结果, 这意味着发生 CT 过程的可能性很小。事实上, 蓝移现象可以归因于 Liq 对

Alq 分子进行一定程度的分离所产生的固态溶剂化效应^[29]。在不同比例 Alq : Liq 样品的 PL 光谱中, 光谱几乎没有变化, 如图 4(b) 所示。从这些实验结果中得不到 CT 过程发生的直接证据。

最后, 比较了实验部分中 EL 结构器件的光电性能, 器件分别记为 Alq : Liq/Al 和 Alq/Liq/Al 和 Alq/Al。器件的 EL 光谱 (@ 20 mA/cm²) 和 J - V 特性以及电流效率-亮度-电流密度 (η - L - J) 特性分别如图 5(a)、(b) 所示。由图 5(a) 的插图可以看出, 三个器件的 EL 光谱几乎是相同的, 发光峰约在 520 nm, 是典型的 Alq 发射^[30]。而在 J - V 曲线中, Liq 掺杂后导致 EL 器件性能优劣的变化同样取决于阴极上电子注入修饰的情况。由图 5(a) 可知, 在固定电压下, 具有 Alq : Liq 结构的器件的电流密度明显高于 Alq/Al 结构的器件, 但低于 Alq/Liq/Al 结构的器件, 与 Liq 掺杂在单载流子器件中的效果基本一致。这是由于在 EL 器件中, 空穴的数量多于电子, 导致两者的比例失衡, 器件的性能仍取决于少子, 即电子的注入与传输情况。此外, 三种结构下器件的电流效率和亮度也表现出类似的变化趋势。如图 5(b) 所示, 在电流密度为 100 mA/cm² 时, 三种器件的最大电流效率 (和对应的亮度) 分别为 3.96 (3 959 cd/m²), 4.27 (4 267 cd/m²) 和 2.27 cd/A (2 271 cd/m²), 具有 Alq/Liq/Al 结构的器件拥有

最大的电流效率为 4.27 cd/A。这表明在 Alq 中掺入 Liq 不会对器件性能产生积极的影响。

在只传输电子的单载流子器件和 EL 器件的测试结果中, 可以发现 Alq 中引入 Liq 并不能形成 n 型掺杂, 掺杂后分散在 Alq/Al 阴极界面附近的 Liq 起到电子注入层的作用。而 Liq 作电子注入层时的具体作用, 与之前报道的文献类似^[20,31], 我们同样认为是偶极层的形成, 即由于 Liq 为极性很强的分子, 因此存在于 Alq/Al 阴极界面上的 Liq 会产生一定程度的极性有序排列, 使得 Alq 和 Al 之间生成偶极层, 降低电子从 Al 注入到 Alq 的有效势垒。

3 结论

本文研究发现, Liq 在 Alq 中的掺杂不能引起“n 型掺杂”效应, 靠近 Al 阴极附近的 Liq 会起到电子注入层的作用, 通过形成特殊的界面结构, 降低了电子的注入势垒, 提高了器件电流; 而分散在 Alq 体相中的 Liq 与 Alq 虽然化学性质相近, 但由于 Liq 导电性劣于 Alq, 在高浓度下降低了器件电流。在传统的双层 EL 器件中, 采用 Liq 掺杂方案中的器件最大电流效率 (3.96 cd/A) 大于采用 Al 阴极的非掺杂器件的最大电流效率 (2.27 cd/A), 但小于采用 Liq/Al 阴极的非掺杂器件的最大电流效率 (4.27 cd/A)。这些发现为理解通过使用掺杂形式或薄层形式的 Liq 来改善有机器件中的电子注入提供了一个不同的视角。

参考文献:

- [1] Tang C W, Vanslyke S A. Organic electroluminescent diodes [J]. Appl. Phys. Lett., 1987, 51(12): 913-915.
- [2] Hong G, Gan X, Leonhardt C, et al. A brief history of OLEDs-emitter development and industry milestones [J]. Adv. Mater., 2021, 33(9): 2005630.
- [3] Lüssem B, Keum C M, Kasemann D, et al. Doped organic transistors [J]. Chem. Rev., 2016, 116(22): 13714-13751.
- [4] Huang J, Pfeiffer M, Werner A, et al. Low-voltage organic electroluminescent devices using pin structures [J]. Appl. Phys. Lett., 2002, 80(1): 139-141.
- [5] Oyamada T, Sasabe H, Adachi C, et al. Extremely low-voltage driving of organic light-emitting diodes with a Cs-doped phenyldipyrnylphosphine oxide layer as an electron-injection layer [J]. Appl. Phys. Lett., 2005, 86(3): 033503.
- [6] Lee J H, Kim J J. Interfacial doping for efficient charge injection in organic semiconductors [J]. Phys. Status Solidi A, 2012, 209(8): 1399-1413.
- [7] Lüssem B, Riede M, Leo K. Doping of organic

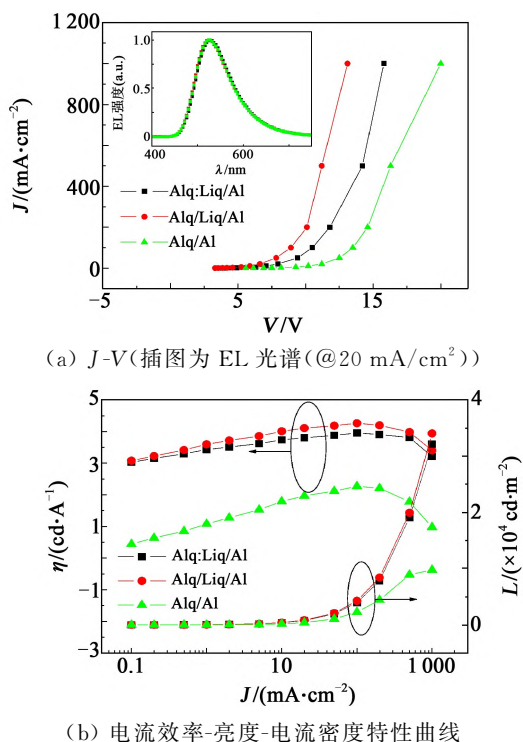


图 5 J - V 特性以及电流效率-亮度-电流密度特性曲线

- semiconductors[J]. Phys. Status Solidi A, 2013, 210(1): 9-43.
- [8] Bin Z Y, Duan L, Qiu Y. Air stable organic salt as an n-type dopant for efficient and stable organic light-emitting diodes [J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2015, 7(12): 6444-6450.
- [9] Salzmann I, Heimel G, Oehzelt M, et al. Molecular electrical doping of organic semiconductors; fundamental mechanisms and emerging dopant design rules[J]. ACC. Chem. Res., 2016, 49(3): 370-378.
- [10] Bin Z Y, Liu Z Y, Qiu Y, et al. Efficient n-dopants and their roles in organic electronics[J]. Adv. Opt. Mater., 2018, 6(18): 1800536.
- [11] Parthasarathy G, Shen C, Kahn A, et al. Lithium doping of semiconducting organic charge transport materials [J]. J. Appl. Phys., 2001, 89(9): 4986-4992.
- [12] Lee J H, Wu M H, Chao C C, et al. High efficiency and long lifetime OLED based on a metal-doped electron transport layer[J]. Chem. Phys. Lett., 2005, 416(4/6): 234-237.
- [13] Choudhury K R, Yoon J, So F. LiF as an n-dopant in tris(8-hydroxyquinoline) aluminum thin films[J]. Adv. Mater., 2008, 20(8): 1456-1461.
- [14] Kao P C, Lin J H, Wang J Y, et al. Li₂CO₃ as an n-type dopant on Alq₃-based organic light emitting devices[J]. J. Appl. Phys., 2011, 109(9): 094505.
- [15] Wei H X, Ou Q D, Zhang Z, et al. The role of cesium fluoride as an n-type dopant on electron transport layer in organic light-emitting diodes[J]. Org. Electron., 2013, 14(3): 839-844.
- [16] Deng Y H, Li Y Q, Ou Q D, et al. The doping effect of cesium-based compounds on carrier transport and operational stability in organic light-emitting diodes[J]. Org. Electron., 2014, 15(6): 1215-1221.
- [17] Chu X B, Guan M, Niu L T, et al. The utilization of low-temperature evaporable CsN₃-doped NBphen as an alternative and efficient electron-injection layer in OLED [J]. Phys. Status Solidi A, 2014, 211(7): 1605-1609.
- [18] Tsai C T, Liu Y H, Kao P C, et al. 2-Methyl-9, 10-bis (naphthalen-2-yl) anthracene doped lithium carbonate as an effective electron injecting layer for both inverted and conventional organic light-emitting diode structures[J]. ECS J. Solid State Sci. Technol., 2020, 9(5): 056001.
- [19] Cho K, Cho S W, Jeon P E, et al. Energy level alignments at tris (8-hydroquinoline) aluminum/8-hydroquinolatolithium/aluminum interfaces[J]. Appl. Phys. Lett., 2008, 92(9): 093304.
- [20] 吴有智, 郑新友, 朱文清, 等. 锂喹啉配合物作为电子注入层对有机电致发光器件性能的影响[J]. 光学学报, 2004, 24(4): 553-557.
- Wu Youzhi, Zheng Xinyou, Zhu Wenqing, et al. Effect of Liq as an electron injection layer on organic electroluminescent devices[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(4): 553-557.
- [21] Gao C H, Zhu X Z, Zhang L, et al. Comparative studies on the inorganic and organic p-type dopants in organic light emitting diodes with enhanced hole injection[J]. Appl. Phys. Lett., 2013, 102(15): 153301.
- [22] Lee S H, Huseynova G, Choi H K, et al. Analysis of charge transfer complex at the interface between organic and inorganic semiconductors [J]. Org. Electron., 2021, 88: 106001.
- [23] Juang F S, Chittawanij A, Hong L A, et al. The study of n-type doping and stamping transfer processes of electron transport layer for organic light-emitting diodes[J]. IEICE Trans. Electron., 2015, 98(2): 66-72.
- [24] Kumar A, Srivastava R, Tyagi P, et al. Effect of doping of 8-hydroxyquinolinolithium on electron transport in tris(8-hydroxyquinolino) aluminum[J]. J. Appl. Phys., 2011, 109(11): 114511.
- [25] Tyagi P, Srivastava R, Kumar A, et al. Low voltage organic light emitting diode using p-i-n structure[J]. Synth. Met., 2010, 160(9/10): 1126-1129.
- [26] Kim H M, Seo J H, Han W K, et al. Improvement of mixed electron transport structure red phosphorescent organic light-emitting diodes[J]. Mo. Cryst. Liq. Cryst., 2011, 538(1): 53-60.
- [27] Soman A, Unni K N N. Enhancement in electron transport and exciton confinement in OLEDs; role of n-type doping and electron blocking layers[J]. Eur. Phys. J.-Appl. Phys., 2019, 86(1): 10201.
- [28] Yuan Y, Grozea D, Han S, et al. Interaction between organic semiconductors and LiF dopant [J]. Appl. Phys. Lett., 2004, 85(21): 4959-4961.
- [29] Bulovic V, Shoustikov A, Baldo M A, et al. Bright, saturated, red-to-yellow organic light-emitting devices based on polarization-induced spectral shifts [J]. Chem. Phys. Lett., 1998, 287(3/4): 455-460.
- [30] Mahdiyar R, Fadavieslam M R. The effects of chemical treatment on ITO properties and performance of OLED devices[J]. Opt. Quant. Electron., 2020, 52(5): 262.
- [31] 刘 丹, 朱 洁, 龚千寻, 等. 利用 8-羟基喹啉锂作为电子注入层以提高有机发光器件的发光效率[J]. 光散射学报, 2018, 30(4): 388-394.
- Liu Dan, Zhu Jie, Gong Qianxun, et al. Improve luminance efficiency of organic light emitting diodes with 8-hydroxyquinolinolato-lithium as an electron injection layer[J]. The J. of Light Scattering, 2018, 30(4): 388-394.

作者简介:

吴有智(1965—),男,甘肃省靖远市人,博士,教授,主要研究方向包括有机电致发光材料与器件物理等。