

引用格式: ZHANG Wen-wen, CHEN Zhuo, LI Ge, *et al.* Study on Stability of Thermally Activated Delayed Fluorescent OLED[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(1): 0123001

张稳稳, 陈卓, 李格, 等. 热激活延迟荧光 OLED 稳定性研究[J]. 光子学报, 2020, 49(1): 0123001

热激活延迟荧光 OLED 稳定性研究

张稳稳^{1,2}, 陈卓¹, 李格¹, 严学文¹, 焦博², 吴朝新²

(1 西安邮电大学 电子工程学院, 西安 710121)

(2 西安交通大学 陕西省信息光子技术重点实验室, 西安 710049)

摘 要:以双极性材料 4,4'-bis(carbazol-9-yl)biphenyl (CBP) 为主体,绿色热激活延迟荧光材料(4s,6s)-2,4,5,6-tetra(9H-carbazol-9-yl)isophthalonitrile (4CzIPN) 为客体,制备了一种多层有机发光二极管.通过改变 4CzIPN 的掺杂浓度,研究了掺杂浓度对器件光电性能及稳定性的影响,发现 4CzIPN 掺杂浓度为 12% 时器件性能最佳.通过设计正向恒流反向恒压的交流驱动电路并对交流驱动电路参数进行优化,研究了驱动方式对延迟荧光有机发光二极管寿命的影响,揭示了交流驱动参数对延迟荧光器件寿命的影响规律.研究表明,基于热激活延迟荧光的有机发光二极管在使用频率为 50 Hz,反向偏压为 0 mV,50% 占空比的交流驱动时,可获得更高的器件寿命.通过比较直流驱动和交流驱动下相同器件的寿命曲线,发现使用交流驱动时器件寿命是直流驱动时的 1.5 倍左右.

关键词:有机半导体;有机发光二极管;热激活延迟荧光;稳定性;掺杂浓度;交流驱动

中图分类号:TN383+.1; TN312+.8 文献标识码:A doi:10.3788/gzxb20204901.0123001

Study on Stability of Thermally Activated Delayed Fluorescent OLED

ZHANG Wen-wen^{1,2}, CHEN Zhuo¹, LI Ge¹, YAN Xue-wen¹, JIAO Bo², WU Zhao-xin²

(1 School of Electronic Engineering, Xi'an University of Post & Telecommunication, Xi'an 710121, China)

(2 Technology for Information of Shaanxi Province, School of Electronic and Information Engineering, Xi'an 710049, China)

Abstract: The Thermally Activated Delayed Fluorescence Organic Light-Emitting Diodes (TADF-OLEDs) was fabricated, using bipolar material 4,4'-bis(carbazol-9-yl)biphenyl (CBP) as host, green fluorescent material (4s,6s)-2,4,5,6-tetra(9H-carbazol-9-yl)isophthalonitrile (4CzIPN) as dopant. The device structure was optimized by adjusting concentration of 4CzIPN doped into CBP, then the photoelectric properties and lifetimes of device were studied. The performance of 12% 4CzIPN-doped device is the best. To study the influence of driving mode on device lifetime of the TADF-OLEDs, the AC driving circuit of positive constant current reverse constant voltage was designed, and the parameters of the AC driving circuit were optimized and adjusted. Research shows that the TADF-OLED achieved a longer device lifetime under AC driven of frequency of 50 Hz, reverse bias of 0 mV and duty cycle of 50%. By comparing the lifetime curves of the same device driven by DC and AC, it is found that the TADF-OLED lifetime under the AC driving scheme is about 1.5 times longer than that of under the DC driving scheme.

Key words: Organic semiconductor; Organic light-emitting diodes; Thermally activated delayed

基金项目:国家自然科学基金(No.61505161),陕西省自然科学基金基础研究计划(No.2017JM6064),陕西省教育厅专项科研计划(No.17JK0697)

第一作者:张稳稳(1977-),女,副教授,博士,主要研究方向为发光器件及显示技术、光电检测及嵌入式应用. Email: zhangwenwen@xupt.edu.cn

收稿日期:2019-06-24;录用日期:2019-08-30

<http://www.photon.ac.cn>

fluorescence; Stability study; Doping concentration; AC driving mode

OCIS Codes: 230.3670; 230.2090; 310.6870; 250.3680; 160.2540

0 引言

有机发光二极管(Organic Light Emitting Diodes, OLEDs)具有高电致发光效率,柔性和低制造成本等优点,在显示和节能照明技术方面引起越来越多的关注.发光材料是 OLED 器件发展的根本.OLED 材料的发展可以分为三个阶段:传统荧光材料、磷光材料和热活化荧光材料^[1].

对于传统荧光材料而言,受限于自旋统计规律,只能利用 25% 的单重态激子发光.即便器件具有接近 30% 的光取出效率,但其外量子效率最高值只能达到约 7.5%^[2].1998 年,Forrest 研究小组通过引入重金属原子与配体之间产生旋轨耦合发现磷光电致发光现象,由于强自旋轨道耦合的存在,增强了从最低单重激发态到最低三重激发态的系间穿越,25% 的单线态激子和 75% 的三线态激子都可用于发光,使得其内量子效率接近 100%^[3].由于重金属资源有限、价格昂贵且对环境有潜在危害,因而限制了磷光材料的发展及应用.2009 年,Adachi 课题组通过使用新的途径合成热激活延迟荧光(Thermally Activated Delayed Fluorescence, TADF)来产生高效 OLED, TADF 的激发态通过捕获三重激发态激子,从而实现接近 100% 的内量子效率及 20% 的外量子效率^[4],与磷光 OLED 相当.

TADF 材料因其良好的性能受到了广泛的关注,目前 TADF-OLEDs 的效率已得到大幅提升,但是其寿命比较短.诸如 1,2,3,5-tetrakis(carbazol-9-yl)-4,6-dicyanobenzene(4CzIPN)的二氰基苯衍生物是用于高效 TADF-OLED 的有前景的发光材料,与其他 TADF-OLED 器件相比,具有更高的外量子效率和更长的寿命^[5-6].然而,文献[7]中描述的基于 4CzIPN 的 OLED 在恒定直流电流下显示出亮度的快速降低,导致半衰期不到 10 h,因此提高 TADF-OLEDs 的稳定性是一个亟待解决的热点问题.

TADF-OLED 的衰减取决于很多因素,包括材料的电化学反应特征和热稳定性^[8],这些因素在使用掺杂体系的器件中尤为严重,其器件性能受主体材料的影响很大.因此,合成和选择合适的主体材料对于制备具有高稳定性的 OLED 至关重要^[9-10].以 TADF 材料作为辅助掺杂剂的荧光 OLED 器件寿命比 TADF-OLED 寿命长 1.5 倍^[11].Li_q 层的插入对热激活延迟荧光 OLED 稳定性有一定的影响.将超薄的 Li_q 层插入到空穴阻挡层和发光层以及空穴阻挡层和电子传输层之间,LT90 增加了八倍,LT95 是参考器件的 16 倍^[12].掺杂浓度也会对热激活延迟荧光的稳定性产生影响^[13].

本文中,为了研究具有高工作稳定性的基于 TADF 的 OLED,同时最大化 TADF-OLED 的效率,采用双极性材料 4,4'-bis(carbazol-9-yl)biphenyl (CBP) 为主体,绿色荧光材料 4CzIPN 为客体,制备了一种热激活延迟荧光器件,这种避免浓度猝灭的主体-客体系统,类似于传统的荧光和磷光 OLED.首先优化了 4CzIPN 的掺杂浓度,同时设计了一种正向恒流反向恒压的交流驱动电路,对电路参数进行优化,并比较同一器件在直流驱动和交流驱动下的寿命曲线.研究发现交流驱动能够明显提高 TADF-OLED 的稳定性.

1 实验部分

1.1 TADF-OLED 器件的制备

TADF-OLED 由氧化铟锡(ITO)层作为阳极;35 nm 厚的 N,N'-Bis(naphthalen-1-yl)-N,N'-bis(phenyl) benzidine(NPB)层作为空穴传输层;发光层是 CBP 掺杂不同浓度的 4CzIPN,厚度为 15 nm,通过不断改变掺杂浓度,找到稳定的高效率的掺杂浓度;电子传输层是 65 nm 厚的 1,3,5-tris(1-phenyl-1H-benzimidazol-2-yl)benzene(TPBi);0.8 nm 厚的氟化锂(LiF)层作为电子注入层,阴极为 150 nm 厚的铝(Al)层.器件制备采用真空蒸镀的方式,当气压在 6×10^{-7} Torr 以下时,开始蒸镀,制备过程中器件不暴露于大气环境中.膜的厚度由石英晶体振荡器测量,有机层的蒸镀速率为 0.1 nm/s, LiF 层的沉积速率为 0.02 nm/s, Al 层的沉积速率为 0.3 nm/s. OLED 的发光区面积为 9 mm².

器件结构:ITO/NPB(35 nm)/CBP:4CzIPN(15 nm)/TPBi(65 nm)/LiF(0.8 nm)/Al(150 nm).

1.2 交流驱动电路介绍

由于交流驱动方式预期可以得到更好的性能和更长的寿命^[14-16],科研工作者越来越关注用交流电驱动 OLED 器件.实际上,目前报道的文献中已经对恒定电压、恒定电流和交流电压下的 OLED 性能进行了测

试,发现当用反向电压偏置驱动时,OLED 的性能更好.这是因为反向偏置去除了捕获的电荷(增加了 OLED 的内阻),阻止了掺杂离子的永久漂移或离子从电极迁移,并在一定程度上逆转了不希望的电化学反应.目前对 TADF-OLED 稳定性研究的文献较少,鉴于交流电流驱动方式能够提升荧光 OLED 器件的稳定性,因此,我们设计交流脉冲驱动 TADF-OLED 以提高器件的稳定性.

OLED 与二极管电学特性相似,当用电压源驱动时,其 I - V 曲线呈指数形式,很难获得恒定的正向电流强度.而当反向偏置提供恒定电流时,由于反向电阻非常大,会产生大的反向电压,从而破坏结点.文献[17]设计了一种简单的驱动有机发光器件的交流模块,该模块由一个高压混合电源组成,可以产生正向电压控制的电流脉冲,反向电压控制的电压脉冲;整个混合电源由任意波形发生器驱动,本文中选择的方波输出.模块的原理如图 1.

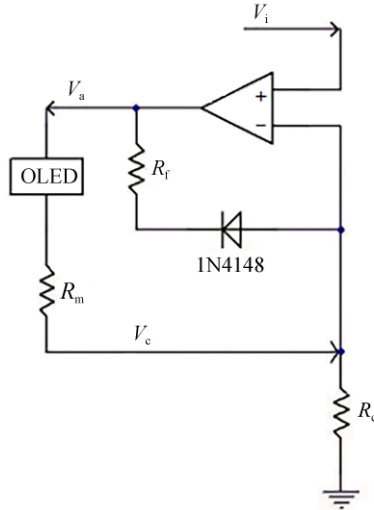


图 1 交流驱动模块原理

Fig.1 Principle of AC driving scheme

输入信号 V_i 来自任意波形发生器, R_f , R_m , R_c 是三个定值电阻,阻值分别为 $1\text{ k}\Omega$, $1\text{ k}\Omega$, $100\ \Omega$;放大器型号是 LM324, 1N4148 是一种高速开关二极管,开关比较迅速.输入信号 V_i 直接反馈到快速高压运算放大器的正输入端,可以完全控制信号的占空比、频率以及高低电平.当输入信号 V_i 为正时,高速二极管 1N4148 阻止电阻 R_f 的反馈效应,该电路是一个电压控制的电流源.运算放大器调整其输出 V_a ,使得 $V_c = V_i$.由于通过 R_f 的电流为零,通过 OLED 的电流可表示为

$$I_{\text{OLED}} = \frac{V_i}{R_c} \quad (1)$$

当输入信号 V_i 为负时,OLED 反向偏置并且其电阻比 R_f 高得多.高速反馈二极管 1N4148 正向偏置, R_f 和 R_c 是运算放大器增益的反馈电阻,该电路就像一个简单的电压放大器.如果忽略反馈二极管 1N4148 上的压降和通过 OLED 的反向电流,OLED 两端的电压可表示为

$$V_{\text{OLED}} = V_i \times \frac{R_f}{R_c} \quad (2)$$

2 实验结果与讨论

2.1 掺杂浓度对 TADF-OLED 稳定性的影响

4CzIPN 掺杂浓度分别为 3%, 6%, 9%, 12%, 15%, 17%, 20% 时,对应的亮度-电流效率-电流密度特性曲线如图 2(a)~(c).从图中可以看出,当掺杂浓度为 6% 时,器件亮度最高,为 $53\ 793\text{ cd/m}^2$;当掺杂浓度从 3% 到 12% 变化时,随着掺杂浓度的增加,器件效率增大;当掺杂浓度从 12% 到 20% 变化时,器件效率并未呈现一定的规律,但掺杂浓度为 15%, 17%, 20% 的器件效率低于 12% 的器件效率,所以当掺杂的浓度为 12% 时,器件效率最高,而且此时器件的电流密度居中,表明空穴和电子载流子注入的平衡随着掺杂剂浓度的变化而变化.图 2(d)是当初始亮度为 $2\ 000\text{ cd/m}^2$ 时,基于 4CzIPN 的 OLED 归一化亮度和时间的关系.观

察到 4CzIPN 掺杂浓度强烈影响器件工作稳定性,当掺杂浓度为 12% 时器件寿命最长.在低掺杂浓度下,3% 和 6% 掺杂浓度的器件的 LT50 (LT50 定义为器件亮度衰减到初始亮度的一半时对应的时间) 分别仅为 10 min 和 20 min.相反,对于 9% 和 12% 掺杂浓度的器件,对应的 LT50 值分别为 68 min 和 126 min.

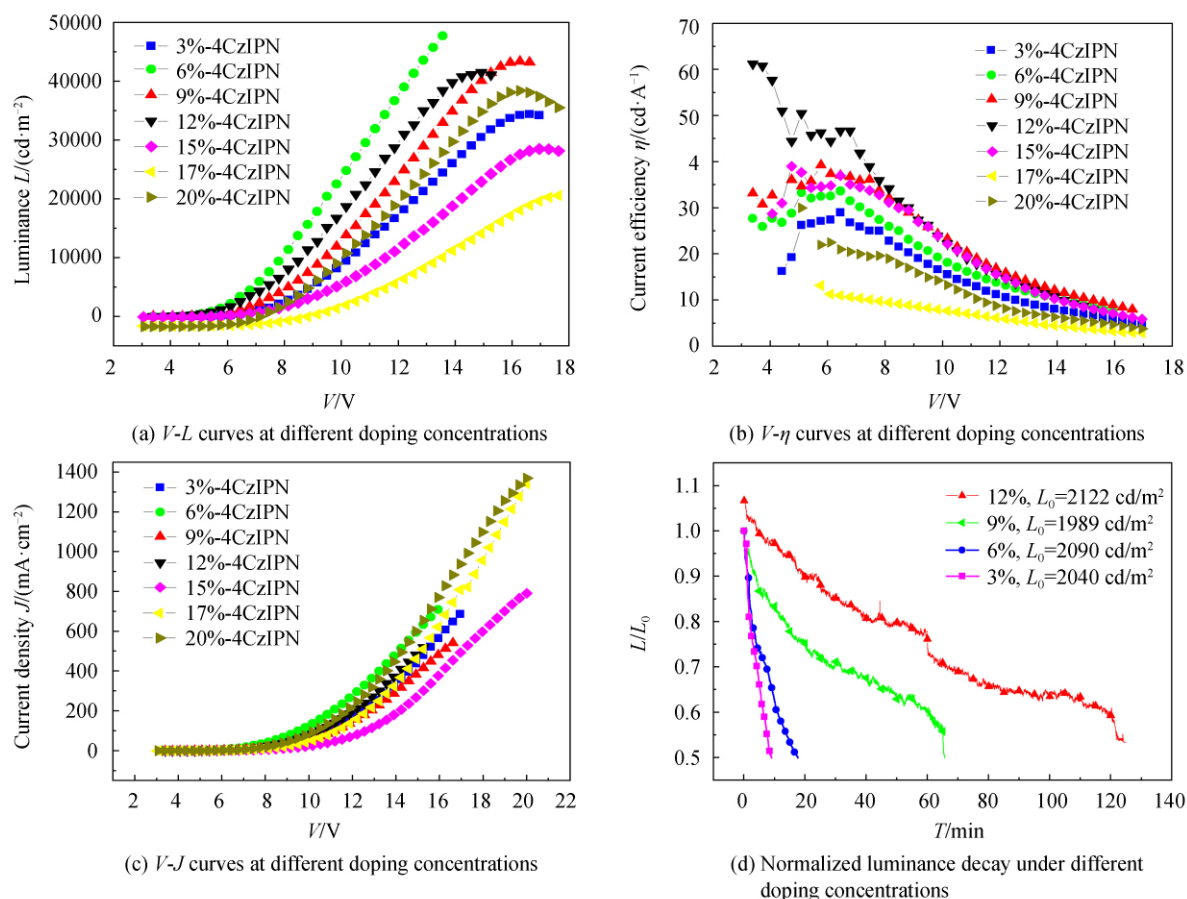


图 2 掺杂浓度对 TADF-OLED 性能的影响

Fig.2 Effect of doping concentration on performance of TADF-OLED

在掺杂发光体系中,一般激子首先在主体中形成,再通过 Forster 或者 Dexter 能量传递过程扩散到掺杂体上.如果激子形成位点在界面处,它向染料分子能量传递过程需要走的路径长,容易猝灭.主体 CBP 中掺杂剂分子 4CzIPN 充当强电子俘获剂,随着掺杂浓度的增加,电子的注入和传输效率会增强,激子形成位点从发光层和电子传输层界面处扩展到发光层中,从而产生高稳定性的 OLED^[18-19].

2.2 驱动方式对 TADF-OLED 稳定性的影响

为了研究驱动方式对 TADF-OLED 器件稳定性的影响,首先分别对低亮度下和高亮度下的交流驱动参数进行了优化,优化实验遵循单一变量原则,每次只改变一个变量,其他因素不变.其次比较了直流驱动和交流驱动下器件的寿命.

2.2.1 交流驱动参数优化

图 3 为低亮度下不同交流参数下的寿命曲线.可以看出器件在起始亮度为 2 000 cd/m² 左右时,在 50 ~ 250 Hz 的频率范围内(占空比 50%,反向偏压 -2.5 V),随着频率增大,器件寿命减少,当频率为 50 Hz 时,可以得到最优的衰减曲线,器件寿命为 176 min.OLED 只有在正向导通的状态下发光,因此频率越低,发光性能越好.有研究表明,当频率达到 20 kHz 的时候几乎已经看不到发光了,这是因为当频率提高到一定的程度的时候,空穴和电子在还没有到达发光层之前便在交流负半周期的反向偏压作用下向相反的方向运动了,大大减小了载流子复合的机率,使发光效率降低^[20].假如频率低于人眼的暂留频率 24 Hz,会造成显示屏的闪烁现象.本文选取了从 50~250 Hz 频率范围测试器件寿命,发现频率变化情况下,器件寿命和发光性能的变化是一致的,但是整体差别并不大,一是因为选取的频率区间不大,二是因为随着亮度的增加,器件流明效

率受频率的影响越低^[21].

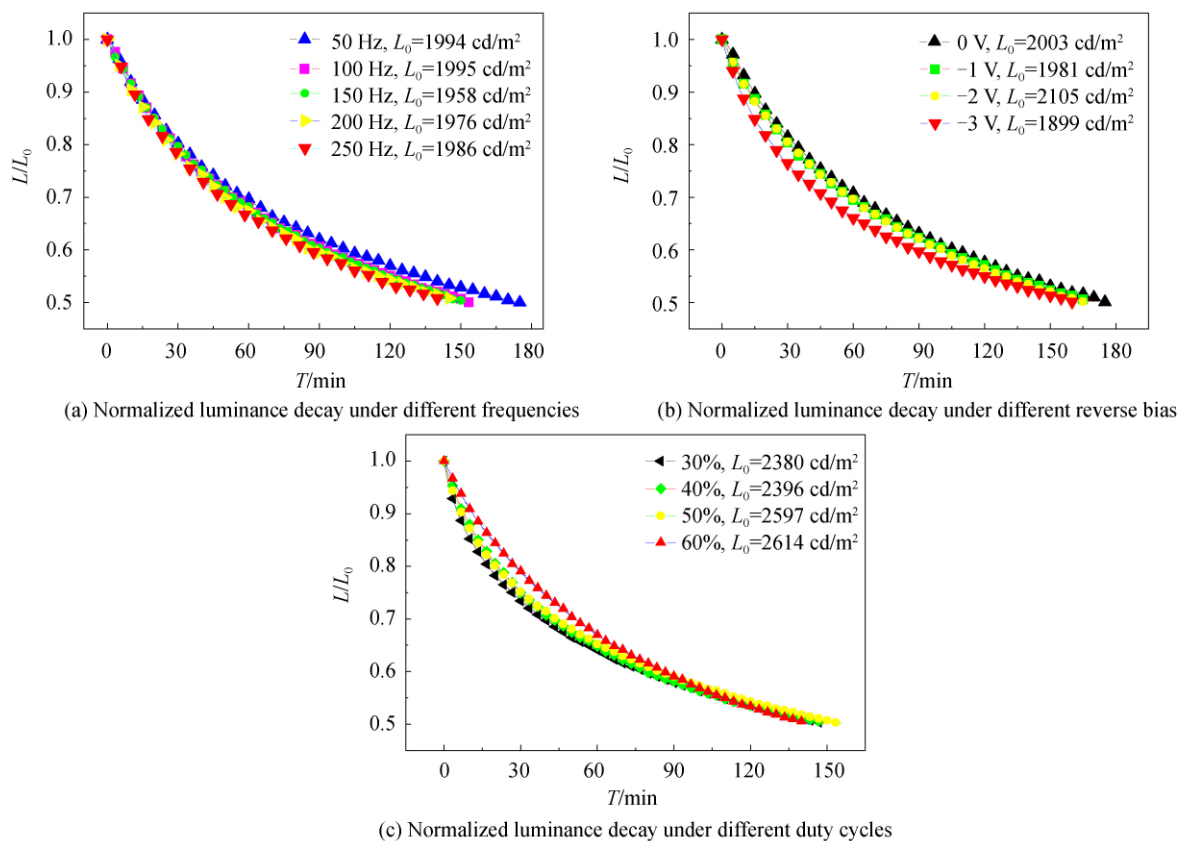


图 3 低亮度下交流驱动参数优化

Fig.3 AC drive parameter optimization at low brightness levels

OLED 器件中存在一些杂质离子和电偶极子,在正向电场下,会形成一个与外加电场相反的内建电场,从而使加载在 OLED 器件两端的有效电场减小,因此会削弱发光,而加反向电压,利用内建电场的削弱,使得有效电场增加,这是反向电压对稳定性的正面影响.但在反向电场的作用下,到达复合区域的电子和空穴也会减少,这对发光又是不利的.由图 3(b)可知,反向偏压从 0 ~ 3 V 变化时(占空比为 50%,频率为 50 Hz),器件寿命整体变化不大.因此,在本文制备的器件中,反向偏压大小对器件寿命的正面影响和负面影响相当.

OLED 器件在交流驱动中,只有正向发光,因此对于给定起始亮度,正向电流的大小和交流驱动的占空比直接相关,占空比越小,正向电流越大,高的正向电流不可避免地会带来焦耳热,占空比越大,越接近直流.因此,本文选择 30%~60% (频率为 50 Hz,反向偏压为 0 V)的占空比来观察器件寿命的变化,占空比从 30% ~ 50%的寿命曲线呈现递增的趋势,占空比为 50%时,器件寿命是 153 min;占空比为 60%时恶化较大,器件寿命为 143 min.所以当占空比为 50%时,器件寿命最长.

在低亮度的情况下对交流驱动参数进行优化之后,由于高亮度和低亮度下器件的衰减机制可能会有变化,因此需要对高亮度下交流驱动参数进行优化.图 4 为高亮度下不同交流参数下的寿命曲线,从图中可以发现和低亮度相似的结果,而且由于器件高亮度下衰减比较快,低亮度下表现出来的频率和占空比的趋势变化变小.在起始亮度为 $10\ 000 \text{ cd/m}^2$ 左右时,频率为 50 Hz (占空比为 50%,反向偏压为 -2.5 V)时器件寿命最长,为 70 min;反向偏压为 0 mV (占空比为 50%,频率为 50 Hz)对应的器件寿命最长,为 84 min;占空比为 30%,40%,50% (频率为 50 Hz,反向偏压为 0 V)时器件寿命比较接近,均为 68 min.

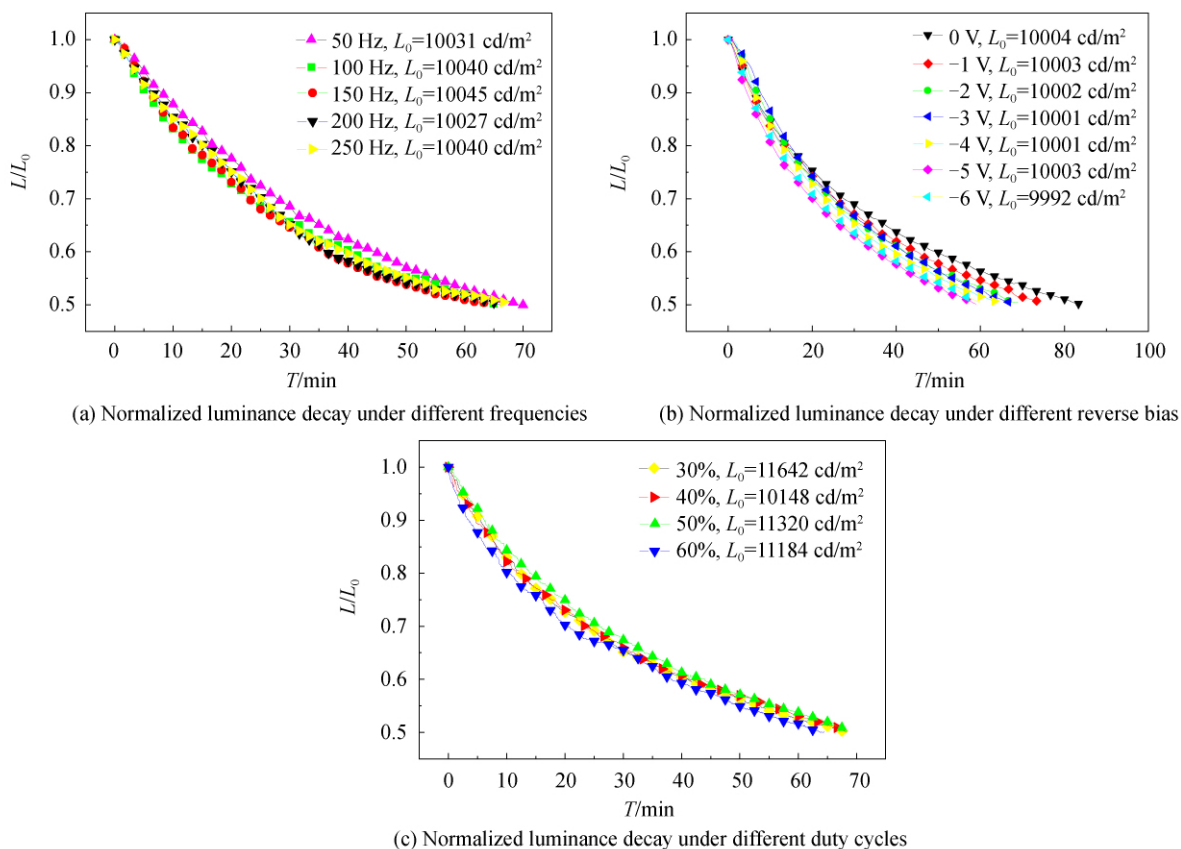


图 4 高亮度下交流驱动参数优化

Fig.4 AC drive parameter optimization at high brightness levels

2.2.2 交流-直流驱动下 TADF-OLED 寿命对比

通过对高亮度、低亮度下频率、占空比、反向偏压的优化,最终交流驱动参数选择频率为 50 Hz,占空比为 50%,反向偏压为 0 V.图 5 为高亮度、低亮度下交流驱动和直流驱动下器件的寿命测试曲线.对于初始亮度较低的情况,直流驱动下对应的初始亮度为 2 314 cd/m^2 ,交流驱动下对应的初始亮度为 2 210 cd/m^2 ,交流驱动下的半衰期为 207 min,是直流驱动(132 min)的 1.56 倍.对于初始亮度较高的情况,直流驱动下对应的初始亮度为 9 683 cd/m^2 ,交流驱动下对应的初始亮度为 10 003 cd/m^2 ,交流驱动下的半衰期为 66 min,是直流驱动(47 min)的 1.4 倍.可以看出,交流驱动可以提高基于 4CzIPN 的 TADF-OLED 器件的稳定性.一方面是因为,NPB中空穴迁移率远大于TPBi中电子迁移率^[22-23],复合区域内空穴数量远大于电子数量,导致

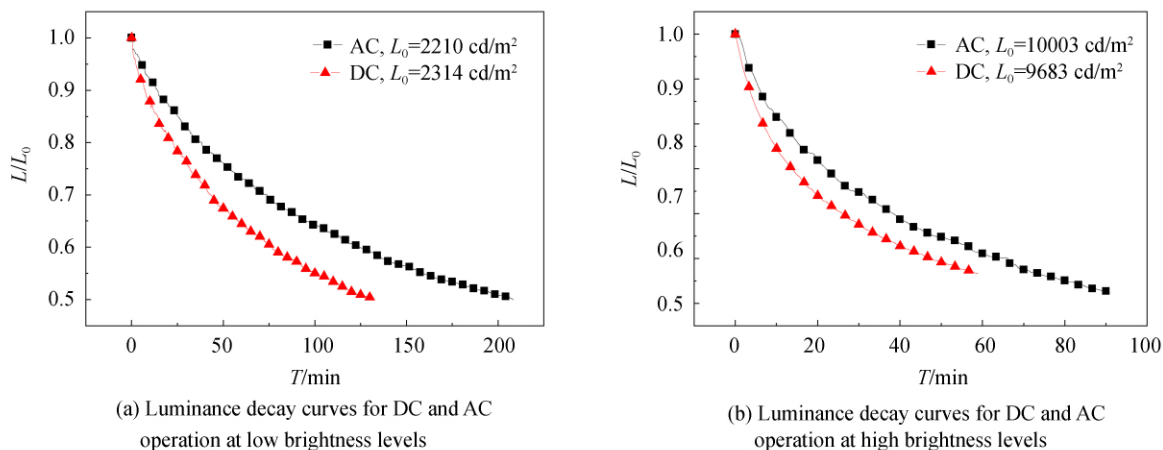


图 5 交流-直流驱动下 TADF-OLED 寿命对比

Fig.5 Lifetime comparison of TADF-OLED for DC and AC driving scheme

电子/空穴的不平衡,会造成激子浓度猝灭^[24],而交流驱动模式的反向偏置周期(本文中反向偏压为零),一些空穴会漂移回空穴传输层,改善了复合域内电子、空穴的不平衡,提高了器件稳定性.另一方面,交流驱动削弱了由正半周的多余载流子、杂质离子及电偶极子在 OLED 内部形成的具有反作用的内建电场,并在一定程度上逆转了不希望的电化学反应^[24-25].所以,交流驱动表现出比直流驱动更高的稳定性.

3 结论

本文针对 TADF-OLED 寿命短的问题,以基于热激活延迟荧光材料 4CzIPN 的 TADF-OLED 为例,研究了掺杂浓度和驱动方式对 TADF-OLED 的稳定性影响.研究发现,改变掺杂浓度能提高电子载流子注入效率并显著影响器件的工作稳定性,这是因为主体 CBP 中掺杂剂分子 4CzIPN 充当强电子俘获剂,随着掺杂浓度的增加,电子的注入和传输效率会增强,激子形成位点从发光层和电子传输层界面处扩展到发光层,从而产生高稳定性的 OLED.相比直流驱动,交流驱动下 TADF-OLED 表现出了更高的器件稳定性,原因是交流驱动方式减少了复合区域内电子/空穴的不平衡,削弱了由正半周的多余载流子、杂质离子及电偶极子在 OLED 内部形成的具有反作用的内建电场等.研究结果为提高 TADF-OLED 的稳定性提供了参考.

参考文献

- [1] ZHANG Dong-dong, ZHAO Yan, DUAN Lian, *et al.* Recent developments of lightings based on organic semiconductors (organic lighting) [J]. *Materials China*, 2014, **33**(12): 703-711.
张东东, 赵炎, 段炼, 等. 有机半导体照明(有机照明)研究进展[J]. *中国材料进展*, 2014, **33**(12): 703-711.
- [2] CAI Xin-yi, SU Shi-jian. Marching toward highly efficient, pure-blue, and stable thermally activated delayed fluorescent organic light-emitting diodes[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, **43**(28): 1802558.
- [3] BALDO M A, O'BRIEN D F, YOU Y, *et al.* Highly efficient phosphorescent emission from organic electroluminescent devices[J]. *Nature*, 1998, **395**(6698): 151-154.
- [4] ENDOA, OGASAWARA M, TAKAHASHI A, *et al.* Thermally activated delayed fluorescence from Sn(4+)-porphyrin complexes and their application to organic light emitting diodes—a novel mechanism for electroluminescence[J]. *Advanced Materials*, 2009, **21**(47): 4802-4806.
- [5] SUZUKI Y, ZHANG Q, ADACHI C. A solution-processable host material of 1, 3-bis {3-[3-(9-carbazolyl) phenyl]-9-carbazolyl} benzene and its application in organic light-emitting diodes employing thermally activated delayed fluorescence [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2015, **3**(8): 1700-1706.
- [6] MASUI K, NAKANOTANI H, ADACHI C. Analysis of exciton annihilation in high-efficiency sky-blue organic light-emitting diodes with thermally activated delayed fluorescence[J]. *Organic Electronics*, 2013, **14**(11): 2721-2726.
- [7] GOUSHI K, YOSHIDA K, SATO K, *et al.* Organic light-emitting diodes employing efficient reverse intersystem crossing for triplet-to-singlet state conversion[J]. *Nature Photonics*, 2012, **6**(4): 253-258.
- [8] SANDANDANAYAKA A SD, MATSUSHIMA T, ADACHI C. Degradation mechanisms of organic light-emitting diodes based on thermally activated delayed fluorescence molecules[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2015, **119**(42): 23845-23851.
- [9] JEON S O, LEE J Y. Phosphine oxide derivatives for organic light emitting diodes[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, **22**(10): 4233-4243.
- [10] SASABE H, SEINO Y, KIMURA M, *et al.* A m-terphenyl-modified sulfone derivative as a host material for high-efficiency blue and green phosphorescent OLEDs[J]. *Chemistry of Materials*, 2012, **24**(8): 1404-1406.
- [11] FURUKAWA T, NAKANOTANI H, INOUE M, *et al.* Dual enhancement of electroluminescence efficiency and operational stability by rapid upconversion of triplet excitons in OLEDs[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 8429.
- [12] TSANG D P K, MATSUSHIMA T, ADACHI C. Operational stability enhancement in organic light-emitting diodes with ultrathin Liq interlayers[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 22463.
- [13] NAKANOTANI H, MASUI K, NISHIDE J, *et al.* Promising operational stability of high-efficiency organic light-emitting diodes based on thermally activated delayed fluorescence[J]. *Scientific Reports*, 2013, **3**: 2127.
- [14] HUANG Jin-zhao, SHAO Ming-hui, XU Xi-jin. Transient and stable electroluminescence properties of alternating-current biased organic light-emitting diodes[J]. *Frontiers of Optoelectronics in China*, 2012, **5**(3): 279-283.
- [15] ZHANG Wen-wen, WU Zhao-xin, ZHANG Xin-wen, *et al.* Dependence of the stability of organic light-emitting diodes on driving mode[J]. *Science Bulletin*, 2011, **56**(21): 2210-2214.
- [16] ROCHA P R F, GOMES H L, ASADI K, *et al.* Sudden death of organic light-emitting diodes [J]. *Organic Electronics*, 2015, **20**(2): 89-96.
- [17] ZHANG Wen-wen, WU Zhao-xin, ZHU Ren-long, *et al.* Development of testing system for the stability of organic light emitting devices[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2011, **45**(2): 64-67.

- 张稳稳, 吴朝新, 朱仁龙, 等. 机电致发光器件稳定性测试系统的设计与实现[J]. 西安交通大学学报, 2011, **45**(2): 64-67.
- [18] ZHEN Chang-gua, DAI Yan-feng, ZENG Wen-jin, *et al.* Achieving highly efficient fluorescent blue organic light emitting diodes through optimizing molecular structures and device configuration[J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, **21**(4): 699-707.
- [19] KIM S, BAE H J, PARK S, *et al.* Degradation of blue-phosphorescent organic light-emitting devices involves exciton-induced generation of polaron pair within emitting layers[J]. *Nature Communications*, 2018, **9**(1): 1211.
- [20] SHARMA R K, KATIYAR M, RAO I V K, *et al.* Effect of the electric field during annealing of organic light emitting diodes for improving its on/off ratio[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2016, **18**(4): 2747-2755
- [21] SUKPASRI P, PARNKLANG J. Appropriate pulse signal driving frequency for white lighting LED[C]. *International Conference on Computer & Automation Engineering*, 2017: 189-192.
- [22] LÜ Z, DENG Z, CHEN Z, *et al.* Improved performance of organic light-emitting diodes with cesium chloride inside tris (8-hydroxyquinoline) aluminum[J]. *Current Applied Physics*, 2011, **11**(3): 573-577.
- [23] LIU L, LI S, ZHOU Y M, *et al.* High-current stressing of organic light-emitting diodes with different electron-transport materials[J]. *Microelectronics Reliability*, 2017, **71**: 106-110.
- [24] XU J, CARROLL D L, SMITH G M, *et al.* Achieving high performance in ac-field driven organic light sources[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 24116.
- [25] TURAK A. Interfacial degradation in organic optoelectronics[J]. *RSC Advances*, 2013, **3**(18): 6188-6255.