文章编号:1000-7032(2021)05-0691-09

调控空穴传输层的分子取向提高有机发光二极管性能

崔东岳^{1,2},王 帅^{1,2},李淑红^{1,2}*,刘云龙^{1,2},王文军^{1,2}*

(1. 聊城大学 物理科学与信息工程学院,山东 聊城 252059; 2. 山东省光通信科学与技术重点实验室,山东 聊城 252059)

摘要:有机发光二极管(OLED)器件性能的提高一直是有机电致发光领域备受关注的研究课题之一,通过优化 OLED 器件中的载流子平衡是提高 OLED 器件性能的一个非常重要的手段。但是,调控空穴传输层或电子传输层中的分子取向,从而优化器件中的载流子平衡未被关注。本文通过对空穴传输层进行不同温度的退火处理来改变空穴传输层中的分子取向,研究分子取向对其空穴迁移率和 OLED 器件性能的影响。研究发现,退火温度的升高使得空穴传输层中具有垂直取向的分子的比例增加,促进了空穴迁移率的提高。当把具有不同分子取向的空穴传输层应用于 OLED 器件时,可以清楚地观察到载流子平衡因子对器件性能的影响。

关 键 词:有机发光二极管;载流子平衡;单空穴器件;分子取向 中图分类号: TN312.8 **文献标识码:** A **DOI**: 10. 37188/CJL. 20210046

Improving Performance of Organic Light-emitting Diodes by Tuning Molecular Orientation in Hole Transport Layer

CUI Dong-yue^{1,2}, WANG Shuai^{1,2}, LI Shu-hong^{1,2*}, LIU Yun-long^{1,2}, WANG Wen-jun^{1,2*}

(1. School of Physical Science and Information Technology, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China;

Shandong Provincial Key Laboratory of Optical Communication Science and Technology, Liaocheng 252059, China)
 * Corresponding Authors, E-mail: lishuhong@lcu.edu.cn; phywang@163.com

Abstract: The performance improvement of organic light-emitting diodes (OLED) devices has always been one of the research topics in the field of organic electroluminescence. Optimization of carrier balance in OLED devices is a critical method to improve the performance of OLED devices. However, it is often neglected to optimize the carrier balance in the OLEDs by tuning the molecular orientation in the hole transport layer or electron transport layer. In this paper, the molecular orientation in the hole transport layer was altered by heat annealing at different temperatures to study the influence of molecular orientation on the hole mobility and the performance of OLED device. It showed that the proportion of molecules with vertical orientation in the hole transport layer was increased with the rise of annealing temperature, which promoted the increase of the hole mobility. When the hole transport layers with different molecular orientations were applied to OLED devices, the effect of the carrier balance factor on the device performance can be clearly observed.

Key words: organic light-emitting diodes(OLED); charge carrier balance; hole-only device; molecular orientation

收稿日期: 2021-01-30; 修订日期: 2021-02-14

基金项目:国家自然科学基金(61775089);山东省自然科学基金(ZR2017BF009);聊城大学项目(318011904,318051650)资助 Supported by National Natural Science Foundation of China(61775089); Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2017BF009); Project of Liaocheng University(318011904,318051650)

1引言

自邓青云博士在 1987 年报道了世界上首例 有机发光二极管(OLED)以来,由于 OLED 器件 具有低功耗、高亮度、宽光谱以及卓越的色彩显 示和高效环保等特征,如今在显示和照明领域 获得了广泛的应用^[14]。外量子效率(EQE) η_{EQE} 是表征 OLED 器件性能的一个非常重要的参数: $\eta_{EQE} = \eta_{IQE} \times \eta_{out} = \gamma \times \eta_{S/T} \times q_{eff} \times \eta_{out}$ ^[5-6], η_{EQE} 可 以表示为内量子效率(IQE) η_{IQE} 和光耦合效率 η_{out} 的乘积, η_{IQE} 可以由载流子平衡因子 γ 、单重 态-三重态因子 $\eta_{S/T}$ 和有效量子产率 q_{eff} 相乘得到。 对于发光层中的磷光材料和热延迟荧光材料,它 们可以充分利用三重态激子跃迁,使得 $\eta_{S/T}$ 和 q_{eff} 几乎达到 100%。高 EQE 意味着低能量损耗。从 节能的角度,有必要进一步提高 OLED 器件 的 EQE^[5-7]。

由于发光层中具有水平取向跃迁偶极矩的发 光分子有利于 OLED 器件的顶部发射,越来越多 的研究者开始通过提高发光层中具有水平取向的 分子跃迁偶极矩的分子比例来增加光耦合效率 η_{out} ,从而提高 OLED 器件的 EQE^[8-12]。研究人员 开发了很多种方法用来提高具有水平取向的分子 跃迁偶极矩的分子比例,包括研发新型结构的发 光材料,改变发光层的制备条件,如真空沉积时的 基板温度或选择不同的主体材料等等。在 OLED 器件中,载流子平衡因子 y 对 OLED 器件的性能 也起着决定性的作用,其中空穴传输层和电子传 输层中的分子取向可以明显地改变其电学性质, 从而影响 OLED 器件中的载流子平衡,但这方面 的报道相对较少。如 Lee 等对作为电子传输层的 Alq, 薄膜的电学性质进行了研究, 但是他们没有 考虑分子取向对其产生的影响^[13]; Yong 和 Walters 等采用控制基板温度的方法分别对 α-NPD、BCS、CBP 等杆状分子和 m-MTDATA、TC-TA、2TNATA 等圆盘状分子的分子取向进行了调 控,杆状分子和圆盘状分子的分子取向随着基板 温度的升高更加倾向于随机取向^[14-15]。Mikaeili 等通过控制沉积速率的方法改变了薄膜中杆状分 子 α-NPD 的分子取向,他们发现在高沉积速率 下,杆状分子 α-NPD 更倾向于水平排列,同时相 应的单空穴器件的电流密度和空穴迁移率也获得 了增加^[16]。这些工作虽然通过控制基板温度和

沉积速率的方法改变了薄膜中杆状分子的分子取向,但是并没有对分子取向与载流子迁移率的关系做出进一步的探究。

本文选取圆盘状的分子 TAPC 作为空穴传输 材料,通过对真空蒸镀制备的薄膜进行不同温度 热退火处理的方法对其分子取向进行调控,对不 同温度退火处理的薄膜的分子取向、表面形貌以 及相应的单空穴器件的性能进行了测试。结果发 现,单空穴器件的电流密度和载流子迁移率都很 大程度上依赖于其分子取向。为进一步研究分子 取向对 OLED 器件性能的影响,我们将不同退火 温度处理的空穴传输层和未经退火处理的电子传 输层制备成 OLED 器件,以验证分子取向对空穴 迁移率及器件性能的影响。

2 实 验

空穴传输材料 TAPC 和电子传输材料 B3PYMPM的分子结构如图1所示。单空穴器件 (Hole-only device)和单电子器件(Electron-only device)的结构分别为:ITO(70 nm)/HAT-CN(10 nm)/TAPC(65 nm)/TCTA(10 nm)/Al(50 nm)和 ITO(70 nm)/B3PYMPM(45 nm)/LiF(0.7 nm)/Al (50 nm)。

有机材料购买于西安宝莱特公司,所有有机 薄膜都在小于 5×10⁻⁴ Pa 的真空下沉积。使用 M-2000VI 型椭偏仪测试了 TAPC 薄膜的双折射, 使用布鲁克公司生产的原子力显微镜对薄膜的表 面形貌进行了测试。单载流子器件的电流密度和 OLED 器件性能使用 Keithley 2400 和 Spectra Scan PR655 进行测试。

对于圆盘状的分子 TAPC,用有序参数 S 来 评估分子取向,有序参数 S 定义为:

$$S = \frac{3 < \cos^2 \theta > -1}{2} = \frac{k_e - k_o}{k_e + 2k_o}, \qquad (1)$$

如图 2(a) 所示, θ 是分子平面的法向量(垂直于 分子取向)和基板平面法向量(z 轴)的夹角, < ~ > 为总体平均值, k_a 和 k_a 分别是有机薄膜在特定波 长吸收下的正常消光系数和非常消光系数。

如图 2(b) ~ (d) 所示, S = 1 时, 分子取向完 全平行于基板平面; S = -0.5 时, 薄膜中分子的 取向完全垂直于基板平面; S = 0 时, 分子的取向 是随机的^[15]。

TAPC 薄膜的退火过程是在高真空的有机蒸



- 图 1 (a) TAPC 分子结构;(b) B3PYMPM 分子结构;(c)
 单空穴器件结构;(d)单电子器件结构。
- Fig. 1 (a) Chemical formula of TAPC. (b) Chemical formula la of B3PYMPM. (c) Structure of hole-only device. (d) Structure of electron-only device.

镀腔室中进行的,以避免薄膜受到外界环境的 影响。通过调控基板温度的方式,完成对薄膜 的退火处理。由于 TAPC 的玻璃化转变温度约为 82 ℃^[17],我们分别对 TAPC 薄膜在 30,40,60, 70,80 ℃下进行1h的退火处理。其中 30 ℃为基 板未加温时的腔室温度,薄膜在蒸镀完成之后,在 高真空的腔室中静置1h,即薄膜在该温度下等同 于未经过退火处理。我们考虑到 TCTA 薄膜的厚 度为 10 nm,厚度远低于 65 nm 的 TAPC 薄膜, TCTA薄膜中分子取向的改变可能对 OLED 器件 的性能改变很小,同时也为了保证实验中变量的 单一性,因而没有对 TCTA 薄膜进行退火处理来 改变其分子取向。



- 图 2 (a) 圆盘状分子的分子取向;(b) S = 1, 分子完全平 行于基板;(c) S = -0.5, 分子完全垂直于基板; (d) S = 0, 分子取向完全随机。
- Fig. 2 (a) Schematic diagram of disk-shaped molecular orientation. (b) S = 1, molecular orientation is completely horizontal. (c) S = -0.5, molecular orientation is completely vertical. (d) S = 0, molecular orientation is random.

为了获得薄膜准确的光学常数,对薄膜表面的6个不同位置进行测量,然后计算出有序参数 *S*,得到其平均值。

发光材料 Ir(ppy)₂acac 的分子结构如图3(a) 所示。图 3(b)为 OLED 器件的结构:ITO(70 nm)/ HAT-CN(10 nm)/TAPC(65 nm)/TCTA(10 nm)/ TCTA: B3PYMPM: Ir(ppy)₂acac(30 nm,10%)/



图 3 (a)发光材料 Ir(ppy)₂acac 的分子结构;(b) OLED 器件的结构及其能级。

Fig. 3 (a) Chemical formula of Ir(ppy)₂acac. (b) Structure and energy levels of OLED device. B3PYMPM(45 nm)/LiF(0.7 nm)/Al(50 nm)。 其中 HAT-CN 作为空穴注入层,TAPC 和 TCTA 作 为空穴传输层,发光层中 lr(ppy)₂acac 为发光材 料以 10% 的浓度掺杂在 TCTA 和 B3PYMPM 为 1:1 的共主体材料中,B3PYMPM 作为电子传输层。

3 结果与讨论

3.1 不同退火温度下 TAPC 薄膜的分子取向

不同退火温度下 TAPC 薄膜的双折射和有序 参数 S 如图 4 和图 5 所示。有序参数 S 由 TAPC 薄膜在 371 nm 波长下的寻常光和非常光的消光 系数计算得到。由图 4 可以看出, TAPC 薄膜在 不同温度下退火, 都表现出明显的双折射。通过 TAPC 薄膜的双折射拟合出寻常光和非常光的消 光系数、然后计算出的有序参数 S 可知(如图 5 所 示), 在低退火温度下, TAPC 薄膜中的分子取向 倾向于随机取向; 但是随着退火温度的升高, 有序 参数 S 逐渐减小, 说明具有垂直取向的分子的比 例在逐渐增加。

根据薄膜的表面平衡(Surface equilibration) 机制^[15],薄膜中分子的表面迁移率远高于薄膜内 部分子的迁移率。与控制基板温度改变分子取向 相似,对薄膜进行退火处理,也使得薄膜中分子的 表面迁移率和具有高迁移率的分子数量发生变 化。如图6所示,分子在沉积的过程中,由于高表 面迁移率,更倾向于以平行于基板的方式排列。





Fig. 4 Birefringence of TAPC films depend on different annealing temperatures



- 图 5 不同退火温度下 TAPC 薄膜中有序参数 S 的变化
- Fig. 5 Order parameters *S* of TAPC films depend on different annealing temperatures

随着沉积的持续,由于被后续的分子所掩埋,薄 膜的厚度增加,之前处于薄膜表面的分子逐渐 成为薄膜内部的分子,它们很难再次改变其排 列方式,这使得薄膜内部分子的迁移率远低于 薄膜表面分子的迁移率。当对薄膜进行退火处 理时,温度升高使得薄膜中分子的动能增加,表 面的分子受束缚较小,可以自由"旋转"来改变 其方向,同时可以"旋转"的分子的薄膜厚度也 会随着退火温度的升高而增加(图中的绿色区 域)。分子取向在平行于基板方向上的分量减 少而在垂直于基板方向上的分量增加,这导致 了退火温度升高使得薄膜中具有垂直取向的分 子的比例增大^[12]。



- 图 6 不同退火温度下 TAPC 薄膜中分子取向的变化示意图
- Fig. 6 Changed process of TAPC films depend on different temperatures

3.2 不同退火温度下 TAPC 薄膜的表面形貌

不同的退火温度会对薄膜的表面形貌造成影响,我们对不同退火温度下的薄膜进行了 AFM 测试,测得的 AFM 图像如图 7 所示。均方根粗糙度



Fig. 7 AFM images of TAPC films depend on different annealing temperatures

R_q 是表征薄膜表面粗糙程度的一个非常重要的 因素,从图中可以看出,在不同的退火温度下,薄 膜表面的粗糙度都极低,退火温度的变化几乎没 有改变薄膜的表面形貌,不同温度退火不会改变 TAPC 空穴传输层与其他功能层之间的界面,进 而不会阻碍载流子的传输。因此,对 TAPC 空穴 传输层进行不同温度下的退火处理,不会由于表 面形貌的改变而对相应的单空穴器件的电流密度 和载流子迁移率产生影响。

3.3 不同退火温度下单空穴器件的电学特性

为了探究薄膜中分子取向对其电学特性的影 响,我们制备了单空穴器件,测试了电流密度-电 压曲线,并计算了在不同电场强度下的空穴迁移 率。如图 8 所示,随着退火温度的升高,具有垂直 取向的分子的比例增加,在相同电压下,电流密度 获得了提高。在电压为 13 V时,退火温度为 30, 40,60,70,80 ℃时对应的单空穴器件的电流密度 分别为 298.71,352.61,360.19,563.28,905.17 mA/ cm²。插图为未经退火处理的电子传输层对应的 单电子器件的电流密度曲线。根据空间电荷限制 电流(SCLC)理论^[18-19]:

$$J_{\rm SCLC} = \frac{9}{8} \varepsilon_{\rm v} \varepsilon_{\rm s} \mu \frac{E^2}{L}, \qquad (2)$$

计算了单空穴器件和单电子器件的载流子迁移率,J是电流密度, ε_v 是真空介电常数, ε_r 是相对介电常数, μ 是载流子迁移率,E是电场强度,L是薄膜厚度。



- 图 8 不同退火温度下单空穴器件和未经退火处理的单 电子器件的电流密度-电压曲线
- Fig. 8 Current density-voltage curves of hole-only devices depend on different annealing temperatures and electron-only device which not underwent annealing process

在表1中,*T*_a为退火温度,载流子平衡因子γ 为空穴迁移率与电子迁移率的比值^[20]。

从表1可以看出,随着退火温度升高和具有 垂直取向的分子比例的提高,空穴迁移率在逐渐 提高。在30~60℃的退火温度范围内,空穴迁移 率逐渐接近电子迁移率,最终在60℃时,载流子 平衡达到了最优的状态。当退火温度高于60℃ 时,空穴迁移率越来越偏离于电子迁移率,载流子 迁移率又逐渐失衡。由于 TAPC 薄膜的表面形貌 在不同温度退火后没有发生明显的变化,这表明 空穴迁移率的改变应该是来源于薄膜内分子取向 的改变,较高水平的垂直分子取向有利于空穴传 输层中空穴的传输。

表 1 不同退火温度下单空穴器件和未经退火处理的单电子器件的迁移率以及载流子平衡因子 γ(T_a为退火温度,γ为 空穴迁移率与电子迁移率的比值)

Tab. 1 Carrier charge mobility of hole-only devices depend on different annealing temperatures and electron-only device without annealing process and charge balance factor $\gamma(T_a)$ is annealing temperature, γ is calculated from hole mobility divide by electron mobility)

$T_{\rm a}$ /°C	Hole mobility/($cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$)	Electron mobility/($cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$)	γ
30	8.25×10^{-4}	10.6×10^{-4}	0.778
40	9. 58 × 10 $^{-4}$	10.6×10^{-4}	0.903
60	1.02×10^{-3}	10.6×10^{-4}	0.963
70	1.29×10^{-3}	10.6 × 10 $^{-4}$	1.22
80	1.34×10^{-3}	10. 6 × 10 $^{-4}$	1.26

4 OLED 器件

为了进一步探究空穴传输层中分子取向的

改变对 OLED 器件性能的影响。以未经退火处 理的 B3PYMPM 薄膜作为电子传输层、以不同温 度退火处理的 TAPC 薄膜作为空穴传输层制备 了 OLED 器件,进一步测试 TAPC 薄膜中分子取 向的改变对 OLED 器件性能的影响。如图 9(a) 所示,在相同的电压下,当退火温度由 30 ℃提 高到 60 ℃时,器件的亮度逐渐增大,在 60 ℃时 亮度达到了最大值;而当退火温度进一步由 60 ℃提高到 80 ℃时,器件的亮度逐渐降低。例 如,当器件的驱动电压为 19 V时,退火温度 30 ℃对应的器件亮度是 16 630 cd/m²,40 ℃对应 的器件亮度是 19 610 cd/m²,60 ℃对应的器件 亮度是 43 390 cd/m²,70 ℃对应的器件亮度是 33 520 cd/m²,80 ℃对应的器件亮度是 27 480 cd/m²。



图 9 电子传输层未经过退火处理、空穴传输层分别经过 30,40,60,70,80 ℃退火处理的器件亮度随电压变化(a)和电流 密度随电压变化(b)曲线,插图为不同器件的电致发光谱。

Fig. 9 Luminance-voltage(a) and current density-voltage(b) curves of OLED devices consist of electron transport layer and hole transport layers depend on different annealing temperature 30, 40, 60, 70, 80 °C. The inserted picture is electroluminescent spectra.

从相同电压下器件的亮度变化可以看出载流 子平衡因子γ的变化起了决定性作用。当退火温 度升高时,TAPC薄膜中垂直取向的分子所占比 例增加,从而提高了空穴迁移能力。由前面的计 算结果可知,在30~60℃的退火温度范围内,空 穴迁移率逐渐趋近于电子迁移率;载流子在60℃ 时达到最优的平衡状态,在最大程度上提高了发 光层中的激子产生率,空穴和电子在发光层充分 复合发光,使得器件的亮度获得了提高;在60~ 80℃的退火温度范围内,继续增长的空穴迁移率 逐渐大于电子的迁移率,载流子失去了平衡,又导 致了器件亮度下降。

如图 9(b),在相同电压下,高退火温度和高 比例的垂直取向的分子同样使 OLED 器件获得了 大电流密度,这可以归因于垂直取向分子的增加 提高了空穴的迁移率。插图是五种 OLED 器件的 电致发光谱(Electroluminescent spectra,EL),它们 的发光波长都在 520 nm,这说明空穴传输层中具 有垂直取向的分子的增加虽然提高了空穴迁移 率,但是没有改变空穴和电子在发光层中复合的 位置。

5 结 论

本文对圆盘状分子 TAPC 薄膜在不同温度 下进行退火处理,研究了其表面形貌及分子取 向的变化情况,以及 TAPC 薄膜作为空穴传输层 时单空穴器件及 OLED 器件的性能。研究发现, 在不同的退火温度下, TAPC 薄膜的表面形貌并 没有发生明显的改变,但是薄膜中的分子随着 退火温度的升高更容易获得高比例的垂直取 向,相应的单空穴器件的空穴迁移率从30℃时 的 8.25×10⁻⁴ cm² · V⁻¹ · s⁻¹提高到了 80 ℃时 的1.34×10⁻³ cm² · V⁻¹ · s⁻¹。以不同温度退 火处理的 TAPC 薄膜作为空穴传输层的 OLED 器件,在最佳退火温度60℃时,在驱动电压为 19 V 的条件下,器件亮度从 30 ℃ 时的 16 630 cd/m² 提高到了 60 ℃时的 43 390 cd/m²。这可 以归因于不同温度退火对 TAPC 薄膜中分子取 向及空穴迁移率的影响,在60℃时器件有较好 的载流子平衡。

参考文献:

- [1] KO I J, LEE H, PARK J H, et al. An accurate measurement of the dipole orientation in various organic semiconductor films using photoluminescence exciton decay analysis [J]. Phys. Chem. Chem. Phys., 2019,21(13):7083-7089.
- [2] LIU M, KOMATSU R, CAI X Y, et al. Horizontally orientated sticklike emitters: enhancement of intrinsic out-coupling factor and electroluminescence performance [J]. Chem. Mater., 2017,29(20):8630-8636.
- [3] 杨桢林, 费纯纯, 成程, 等. 柔性有机发光二极管柔性电极薄膜的研究进展 [J]. 发光学报, 2019,40(2):238-256. YANG Z L, FEI C C, CHENG C, *et al.*. Review of flexible electrode film for flexible organic light-emitting diodes [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2019,40(2):238-256. (in Chinese)
- [4]朱筱珂,梁依倩,刘琳琳,等. 发光薄膜沉积技术中薄膜晶体管的优化设计 [J]. 发光学报, 2020,41(1):86-94. ZHU X K,LIANG Y Q,LIU L L, et al. Optimal design of thin film transistor in luminescent film deposition technology [J]. Chin. J. Lumin., 2020,41(1):86-94. (in Chinese)
- [5] KIM K H, KIM J J. Origin and control of orientation of phosphorescent and TADF dyes for high-efficiency OLEDs [J]. Adv. Mater., 2018,30(42):1705600-1-19.
- [6] KIM S Y, JEONG W I, MAYR C, et al. Organic light-emitting diodes with 30% external quantum efficiency based on a horizontally oriented emitter [J]. Adv. Funct. Mater., 2013,23(31):3896-3900.
- [7] FRISCHEISEN J, YOKOYAMA D, ENDO A, et al. Increased light outcoupling efficiency in dye-doped small molecule organic light-emitting diodes with horizontally oriented emitters [J]. Org. Electron., 2011,12(5):809-817.
- [8] HUT P, HAN G C, TU Z Y, et al. Origin of high efficiencies for thermally activated delayed fluorescence organic lightemitting diodes: atomistic insight into molecular orientation and torsional disorder [J]. J. Phys. Chem. C, 2018, 122 (48):27191-27197.
- [9] KIM S Y, KIM J J. Outcoupling efficiency of organic light emitting diodes and the effect of ITO thickness [J]. Org. Electron., 2010,11(6):1010-1015.
- [10] TANEDA M, YASUDA T, ADACHI C. Horizontal orientation of a linear-shaped platinum(II) complex in organic lightemitting diodes with a high light out-coupling efficiency [J]. Appl. Phys. Express, 2011,4(7):071602.
- [11] BYEON S Y, KIM J, LEE D R, et al. Nearly 100% horizontal dipole orientation and upconversion efficiency in blue thermally activated delayed fluorescent emitters [J]. Adv. Opt. Mater., 2018,6(15):1701340-1-6.
- [12] SENES A, MESKERS S C J, GREINER H, et al. Increasing the horizontal orientation of transition dipole moments in solution processed small molecular emitters [J]. J. Mater. Chem. C, 2017,5(26):6555-6562.
- [13] LEE P T, CHANG T Y, CHEN S Y. Tuning of the electrical characteristics of organic bistable devices by varying the deposition rate of Alq₃ thin film [J]. Org. Electron., 2008,9(5):916-920.
- [14] YOUN Y, YOO D, SONG H, et al. All-atom simulation of molecular orientation in vapor-deposited organic light-emitting diodes [J]. J. Mater. Chem. C, 2018,6(5):1015-1022.
- [15] WALTERS D M, ANTONY L, DE PABLO J J, et al. Influence of molecular shape on the thermal stability and molecular orientation of vapor-deposited organic semiconductors [J]. J. Phys. Chem. Lett., 2017,8(14):3380-3386.
- [16] MIKAEILI A, MATSUSHIMA T, ESAKI Y, et al. . The origin of changes in electrical properties of organic films fabricated at various vacuum-deposition rates [J]. Opt. Mater., 2019,91:93-100.
- [17] GRIGALEVICIUS S, TAVGENIENE D, KRUCAITE G, et al. 9,9'-bis(2,2-diphenylvinyl) [3,3'] bicarbazole as low cost efficient hole transporting material for application in red PhOLEDs [J]. Dyes Pigm., 2018,152:100-104.
- [18] LIM H, SHIN H, KIM K H, et al. An exciplex host for deep-blue phosphorescent organic light-emitting diodes [J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2017,9(43):37883-37887.
- [19] 袁树青,朱媛莉,王振国,等. 基于空间电荷限制电流模型的 FeCl₃ 掺杂 CBP 的空穴迁移率研究 [J]. 光电子・激光, 2014,25(7):1288-1293.
 YUAN S Q,ZHU Y L, WANG Z G, et al. Investigation on hole mobility of FeCl₃-doped 4,4'-bis(carbazol-9-yl)-biphenyl by using space-charge-limited current model [J]. J. Optoelectron Laser, 2014,25(7):1288-1293. (in Chinese)
- [20] KIM J M, LEE C H, KIM J J. Mobility balance in the light-emitting layer governs the polaron accumulation and operational stability of organic light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2017,111(20):203301-1-5.



崔东岳(1993 -),男,河北唐山人, 硕士研究生,2017 年于河北科技大 学获得学士学位,主要从事光电子 器件方面的研究。 E-mail: c3096815938@163.com



王文军(1962-),男,山东烟台人,博 士,教授,博士研究生导师,2001年于 复旦大学获得博士学位,主要从事有 机光电子材料与器件/激光技术及非 线性光学等方面的研究。 E-mail: phywwang@163.com



李淑红(1974-),女,山东聊城人, 博士,副教授,硕士研究生导师, 2011年于中国科学院上海光学精 密机械研究所获得博士学位,主要 从事光学薄膜、有机光电子材料与 器件等方面的研究。

E-mail: lishuhong@lcu.edu.cn