

〈材料与器件〉

覆盖层对顶发射白光微型 OLED 性能的影响研究

杨启鸣<sup>1</sup>, 钱福丽<sup>1</sup>, 苟国汝<sup>1</sup>, 王体炉<sup>1</sup>, 鲁朝宇<sup>1</sup>, 周允红<sup>1</sup>,  
段 谦<sup>1</sup>, 于晓辉<sup>1</sup>, 段 瑜<sup>1</sup>, 王光华<sup>1</sup>, 杨文运<sup>1,2</sup>

(1. 云南北方奥雷德光电科技股份有限公司 云南 昆明 650223; 2. 昆明物理研究所 云南 昆明 650223)

**摘要:** 采用两种覆盖层 CPL (Capping layer) 材料 Alq3 和 ZnSe 制备了顶发射白光有机电致发光器件 TE-OLEDs (Top emitting white organic light-emitting diodes), 器件结构为 ITO/NPB:LiQ (5%) (10 nm)/TCTA(20nm)/Flrpic+3.5%Ir(ppy)3+0.5%Ir(MDQ)2(acac)(25nm)/TPBI(10nm)/LiF(5nm)/Mg: Ag(10%) (12 nm)/CPL。实验结果表明, Alq3 和 ZnSe 作为 CPL 可以增强 TE-OLED 器件的出光和调制光谱特性, 并且 ZnSe 作为覆盖层制备的 TE-OLED 器件色坐标 (CIE<sub>x</sub>, CIE<sub>y</sub>) 随亮度变化更平稳, 表现出良好的色稳定性。进一步, 通过改变 ZnSe 厚度来优化器件, 当 ZnSe 为 45 nm 时, 器件获得了最佳的亮度和电流效率, 分别为 1461 cd/cm<sup>2</sup> 和 7.38 cd/A, 色坐标为 (0.30, 0.33)。

**关键词:** 顶发射白光微型 OLED; 覆盖层; 光电特性; 色坐标

中图分类号: TN383+.1      文献标识码: A      文章编号: 1001-8891(2023)03-0303-05

Research on Capping Layer for  
Top-emitting White OLED Micro-display Performance

YANG Qiming<sup>1</sup>, QIAN Fuli<sup>1</sup>, GOU Guoru<sup>1</sup>, WANG Tilu<sup>1</sup>, LU Chaoyu<sup>1</sup>,  
ZHOU Yunhong<sup>1</sup>, DUAN Qian<sup>1</sup>, YU Xiaohui<sup>1</sup>, DUAN Yu<sup>1</sup>, WANG Guanhua<sup>1</sup>, YANG Wenyun<sup>1,2</sup>

(1. Yunman North OLIGHTEK Opto-Electronic Technology Co., Ltd, Kunming 650223, China;  
2. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

**Abstract:** We prepared top-emitting white organic light-emitting diode (OLED) devices using Alq3 and ZnSe as capping layers (CPLs). The basic structure of the OLED was ITO/NPB:LiQ(5%)(10 nm)/TCTA(20 nm)/Flrpic+3.5%Ir(ppy)3+0.5%Ir (MDQ)2(acac)(25 nm)/TPBI(10 nm)/LiF(5 nm)/Mg:Ag(10%)(12 nm)/CPL. The brightness and current efficiency of OLED devices fabricated with Alq3 and ZnSe as CPLs are significantly better than those without capping layers. Moreover, the color coordinates (CIE<sub>x</sub>, CIE<sub>y</sub>) of the OLED devices prepared with ZnSe CPLs changed more smoothly with brightness, showing good color stability. Further, by changing the ZnSe thickness to optimize the device, when the CPL was 45 nm, the maximum current efficiency and maximum brightness of the device were 7.38 cd/A and 1410 cd/m<sup>2</sup>, respectively, and the color coordinates were (0.30, 0.33).

**Key words:** top emitting white OLED, capping layer, photoelectric property, CIE<sub>x</sub>, CIE<sub>y</sub>

0 引言

有机电致发光器件 (Organic light-emitting device, OLED) 具有材料选择范围广、功耗低、发光视角宽、色彩丰富, 既可实现大面积柔性显示也可实现微型显

示等优势, 深受大众关注。随着数字化多媒体技术的普及, 人们对信息显示设备的要求不断提高, 因此, 新一代 OLED 器件在可靠性、色度、对比度和发光效率上仍然面临着解决重大问题的挑战<sup>[1-3]</sup>。

微型 OLED 显示是 OLED 技术的一个重要分支,

收稿日期: 2022-06-07; 修订日期: 2022-07-28。  
作者简介: 杨启鸣 (1992-), 男, 云南临沧人, 硕士, 工程师, 主要从事 OLED 器件开发。E-mail: yangqiming@oleid.com。  
通信作者: 段瑜 (1981-), 女, 云南曲靖人, 硕士, 研究员级高级工程师, 主要从事 OLED 器件开发。E-mail: duanyu@oleid.com。  
基金项目: 国家自然科学基金项目 (61604064); 云南省应用基础研究面上项目 (2016FB112); 云南省技术创新人才培养项目 (2017HB111)。

它指的是显示尺寸在1英寸以内的OLED显示器,具备OLED显示的一切优点之外,还具备超便携性与多功能的高集成度等特点,产品广泛应用于虚拟现实、近眼显示、红外探测、单兵装备等系统以及工业检测、医疗器械、AR/VR/MR、消费电子等领域。为了实现稳定的有源驱动,微型OLED需配置较大的晶体管像素驱动电路,这部分电路会对OLED发光有遮挡,造成开口率下降等不良影响,而顶发射OLED器件的开发很好的解决了这一问题。

顶发射微型OLED发展至今,如何提高它的出光效率一直是科研人员的研究热点。根据文献[4-5]报道,目前,提高OLED出光效率的方法包括:①在出光层表面形成褶皱;②在出光层表面形成光子晶体;③在出光层表面制备微透镜阵列;④添加表面覆盖层;褶皱和光子晶体会影响OLED的辐射光谱角度分布,而制备微透镜阵列的工艺较为复杂;添加表面覆盖层不仅工艺简单,且可有效提高OLED的出光效率,特别是以薄层金属作为阴极的顶发射OLED器件,覆盖层能有效地提高透明阴极的透过率,同时降低反射率<sup>[6]</sup>;并且,合成电介质/阴极/电介质的结构能有效地提取等离子体能量,提高器件的出光效率<sup>[7]</sup>。TPD<sup>[4]</sup>、ZnSe<sup>[8]</sup>、ITO<sup>[9]</sup>、Alq3<sup>[10]</sup>等材料可以被用作覆盖层材料。其中Alq3和ZnSe拥有良好的透射性能,同时具有光传输损耗小、折射率均匀、一致性好等特点,并且两种材料生产成本较低、易合成和对环境友好,在OLED器件大批量生产中具有广阔的应用前景。本文以Alq3和ZnSe作为顶发射白光微型OLED的覆盖层,研究其对器件性能的影响。然后通过改变ZnSe的厚度,尝试进一步提高器件的光效。

## 1 实验

### 1.1 器件制备

顶发射白光OLED微型显示器件采用Alq3和ZnSe作为覆盖层,Mg:Ag合金作为阴极层,TPBI和LiF为电子层,Flrpic+3.5% Ir(ppy)<sub>3</sub>+0.5% Ir(MDQ)<sub>2</sub>(acac)为发光层,NPB:5% LiQ/TCTA为空穴层。器件结构及其原理型器件发光图如图1所示。

### 1.2 性能表征

OLED微型显示器件的电压、亮度、色坐标和电致发光光谱(EL)通过电脑联控的Keithley 2400电源和Research PR655进行测量。测试时,所有器件均处于暗室条件下。

## 2 结果与讨论

保持其它结构不变,制备了无CPL,以及Alq3和

ZnSe作为CPL的3种顶发射白光微型OLED器件,Alq3和ZnSe厚度为35 nm。图2(a),(b)为3种器件的电流密度/电压( $J-V$ )特性和亮度/电压( $L-V$ )特性曲线。由图可知,在相同电流密度下,无CPL的器件电压与覆盖层为Alq3和ZnSe的器件相当。这是由于CPL位于阴极层的外部,不会影响器件内部的载流子注入、迁移和激子复合等过程,更多的是影响器件的光学特性<sup>[11-12]</sup>。相同电压下,器件亮度 $B(\text{ZnSe}) > B(\text{Alq3}) > B(\text{无CPL})$ ,驱动电压为7V时,覆盖层为ZnSe的器件亮度可达到6000 cd/cm<sup>2</sup>,尤其在高电压区域,明显看出有覆盖层的器件对光取出有提高作用。并且器件出光的改善也表现在OLED电流效率和功率效率上,如图2(c)和表1所示。

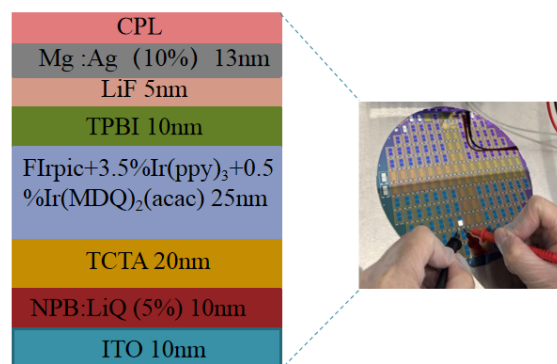


图1 顶发射白光OLED显示器件结构及其原理型器件发光图  
Fig.1 Configuration of the top emitting white OLED devices and luminescent pictures of principle devices

图2(d)为3种OLED器件的电致发光光谱,如图所示,无覆盖层的OLED器件蓝光峰强度很低,结合器件亮度低和色坐标偏高(表1),可以判断器件的蓝光出光不畅,导致器件发光效率低。加入覆盖层后,在器件阴极侧形成电介质层/金属层/电介质层结构,增强了耦合出光,对短波长的透过率增强,器件的蓝光峰得到凸显;且覆盖层为ZnSe的器件光谱与Alq3器件相比,蓝光峰强度较强,黄光峰强度较弱,峰位基本不变。图3(a),(b)为3种器件色坐标(CIE<sub>x</sub>, CIE<sub>y</sub>)随亮度变化的曲线,可以看出覆盖层为ZnSe的器件CIE<sub>x</sub>, CIE<sub>y</sub>随亮度变化更稳定,亮度范围在(0~8000 cd/m<sup>2</sup>)时,(CIE<sub>x</sub>, CIE<sub>y</sub>)漂移量最小,表现出良好的色稳定性;且 $\Delta\text{CIE}(Y-X)=0.02$ ,更接近标准白光范围。

图4(a)为不同ZnSe厚度的透过率曲线,图4(b)为三色光激发下不同ZnSe厚度的透过率变化曲线;由图可知,在可见光波长范围内,不同ZnSe厚度的光透过率不同,从整体看,随着ZnSe厚度的增加,其透过率先增后减,结果符合先前文献报道,光学覆盖层厚度的变化会导致器件顶部透过率呈现周期性

的变化<sup>[13-14]</sup>。35 nm 和 45 nm 的 ZnSe 在可见光范围内透过率增长趋势较为明显,而 55 nm 和 65 nm 的 ZnSe 透过率变化较小。波长在 500 nm 之前,60 nm 厚度的

ZnSe 透过率最高,波长大于 500 nm,45 nm 厚度的 ZnSe 透过率最高。由图 4(b)可知,随 ZnSe 厚度的增加,三色光的透过率逐渐接近,65 nm 时已基本相同。

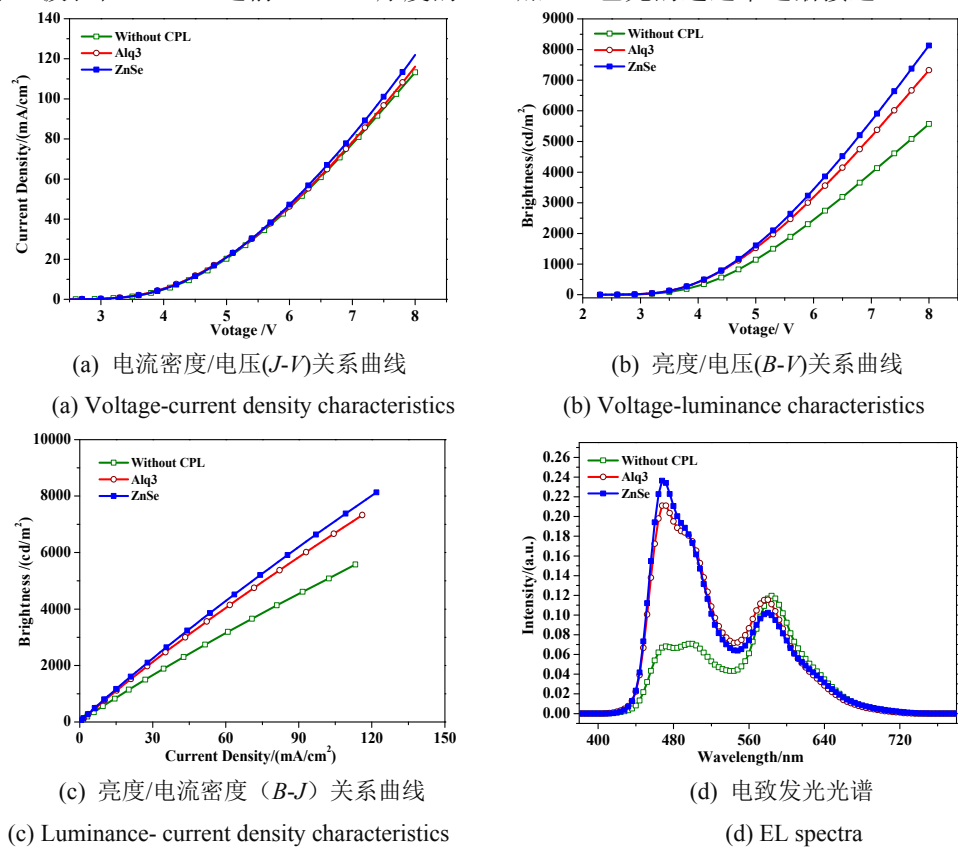


图 2 器件的光电特性

Fig.2 Photoelectric characteristics of devices

表 1 三种 OLED 器件的性能参数

Table 1 Performance parameters of the device

| Device      | Voltage/V | Luminance/(cd/m <sup>2</sup> ) | CIE <sub>X</sub> | CIE <sub>Y</sub> | Current efficiency/(cd/A) |
|-------------|-----------|--------------------------------|------------------|------------------|---------------------------|
| Without CPL | 4.96      | 1040                           | 0.35             | 0.40             | 5.40                      |
| Alq3        | 4.89      | 1261                           | 0.29             | 0.35             | 6.24                      |
| ZnSe        | 4.53      | 1410                           | 0.31             | 0.33             | 6.75                      |

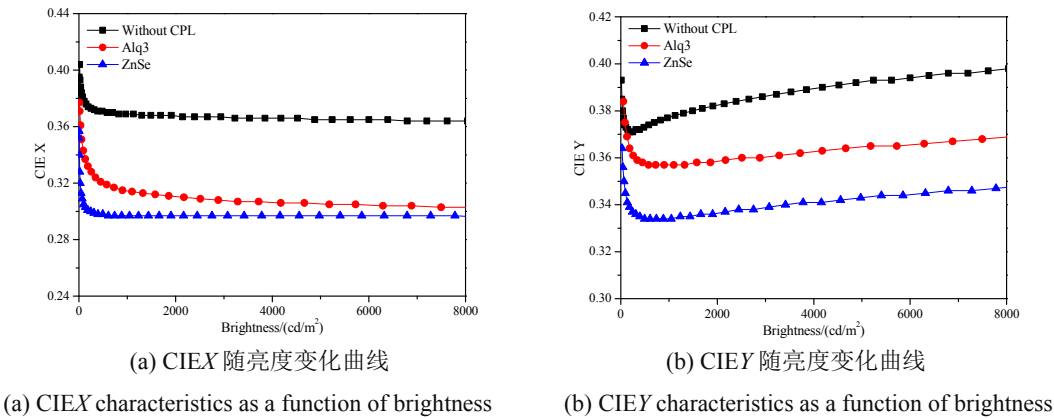


图 3 器件色坐标随亮度变化曲线

Fig.3 The CIE characteristics as a function of brightness

进一步，我们将不同厚度的 ZnSe 作为覆盖层合成到顶发射白光 OLED 上，探究其对顶发射 OLED 发光效率和光谱的影响。如表 2 所示，随着 ZnSe 厚度的增加，器件电压基本保持不变。图 5(a)为不同厚度 ZnSe 器件的发光光谱，随着 CPL 厚度由 0 增加到 45 nm，蓝光峰强度逐渐升高，而将 ZnSe 厚度进一步提高，器件的蓝光峰强度又逐渐下降。蓝光的强度也影响了整个器件的亮度和发光效率，结合三色光激发下不同 ZnSe 厚度的透过率变化曲线（图 4(b)）分析，ZnSe 厚度从 35 nm 增加到 45 nm，器件的透过率逐渐提高，蓝光峰强度逐渐增强，进而导致微腔效应减弱，ZnSe 厚度从 45 nm 增加到 65 nm，器件的透过率又逐

渐下降，微腔效应增强<sup>[15-16]</sup>。这也验证了覆盖层的厚度与 OLED 器件出光效率关系存在周期性<sup>[17]</sup>，与图 4 结果相符。如图 5(b)所示，器件亮度、电流效率随 ZnSe 厚度的增加先增大后减小，在 45 nm 时取得最大。无 CPL 的器件电流效率为 5.4 cd/m<sup>2</sup>，45 nm ZnSe 作为 CPL 的器件电流效率达到 7.38 cd/m<sup>2</sup>，电流效率提升约 37%。如图 5(c)所示 CIE<sub>x</sub>，CIE<sub>y</sub> 随 ZnSe 厚度的增加先减小后增大，ZnSe 厚度为 45 nm 时，器件色坐标接近标准白光 0.30，0.33，且 CIE<sub>x</sub> 与 CIE<sub>y</sub> 差值也相对较小，表明此时微腔光谱与发光材料电致发光光谱重合最好，颜色偏移最小<sup>[18-19]</sup>。

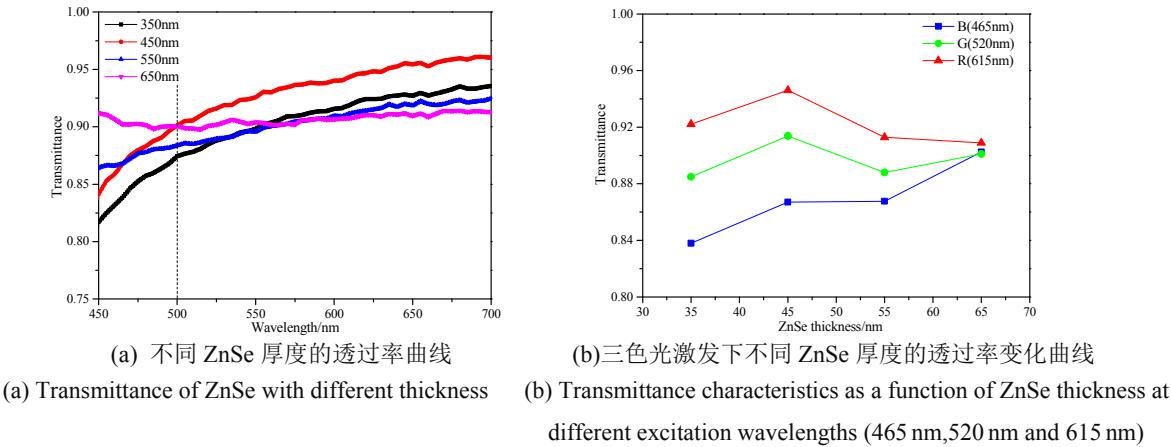


图 4 ZnSe 的透过率特性

Fig.4 Transmittance characteristics of ZnSe

表 2 不同 CPL 厚度的 OLED 器件性能参数

| Table 2 Performance parameters of the device at various thickness of CPL |           |                                |                  |                  |                           |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------------------|------------------|------------------|---------------------------|
| CPL thickness/nm                                                         | Voltage/V | Luminance/(cd/m <sup>2</sup> ) | CIE <sub>x</sub> | CIE <sub>y</sub> | Current efficiency/(cd/A) |
| 0                                                                        | 4.96      | 1040                           | 0.38             | 0.41             | 5.4                       |
| 25                                                                       | 4.55      | 1339                           | 0.34             | 0.35             | 6.58                      |
| 35                                                                       | 4.53      | 1410                           | 0.31             | 0.33             | 6.75                      |
| 45                                                                       | 4.52      | 1461                           | 0.30             | 0.33             | 7.38                      |
| 55                                                                       | 4.54      | 1460                           | 0.31             | 0.35             | 6.96                      |
| 65                                                                       | 4.52      | 1447                           | 0.31             | 0.38             | 6.9                       |

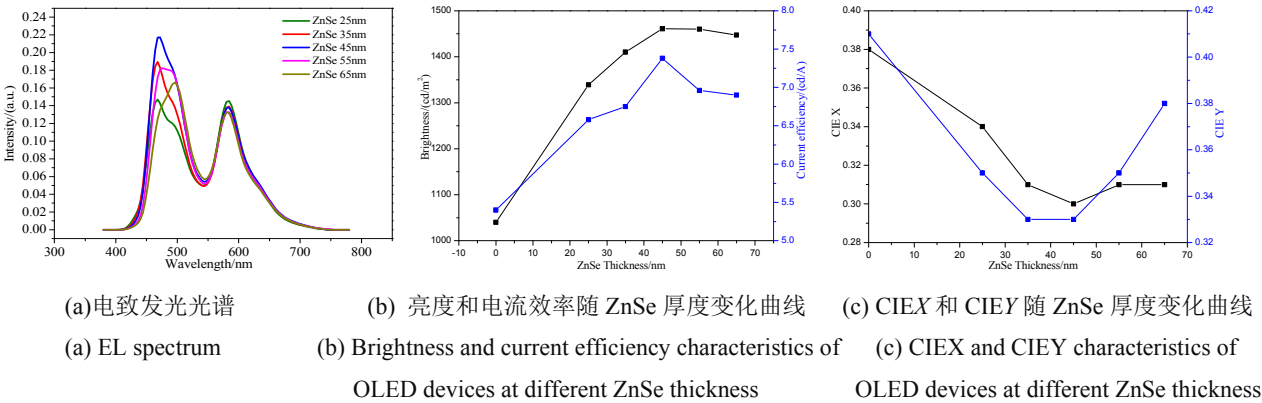


图 5 ZnSn 作为覆盖层制备的 OLED 器件的光电特性

Fig.5 Photoelectric characteristics of devices fabricated by ZnSn as CPL

### 3 结论

Alq3 和 ZnSe 作为 CPL 制备的顶发射白光 OLED 器件亮度和电流效率明显优于无 CPL 的 OLED 器件,并且 ZnSe 作为 CPL 制备的 OLED 器件色坐标(CIE<sub>x</sub>, CIE<sub>y</sub>)随亮度变化更平稳,亮度范围在(0~8000 cd/m<sup>2</sup>)时,(CIE<sub>x</sub>, CIE<sub>y</sub>)漂移量最小,表现出良好的色稳定性;通过优化 ZnSe 厚度,发现当厚度为 45 nm 时,器件获得的最大电流效率和最大亮度分别为 7.38 cd/A 和 1461 cd/m<sup>2</sup>,色坐标为(0.30, 0.33)。

### 参考文献:

- [1] Adamovich V I, Cordero S R, Djurovich P I, et al. New charge-carrier blocking materials for high efficiency OLEDs[J]. *Organic Electronics*, 2003, **4**(2-3): 77-87.
- [2] DO Y R, KIM Y C, SONG Y W, et al. Enhanced light extraction from organic light-emitting diodes with 2D SiO<sub>2</sub>/SiN<sub>x</sub> photonic crystals[J]. *Advanced Materials*, 2010, **15**(14):1214-1218.
- [3] Sekitani T, Nakajima H, Maeda H, et al. Stretchable active-matrix organic light-emitting diode display using printable elastic conductors[J]. *Nature Materials*, 2009, **8**(6): 494-499.
- [4] QIANG H, Walzer K, Pfeiffer M, et al. Highly efficient top emitting organic light-emitting diodes with organic outcoupling enhancement layers[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **88**(11):113515.
- [5] HAN S, HUANG C, LU Z H. Color tunable metal-cavity organic light-emitting diodes with fullerene layer[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, **97**(9): 66.
- [6] Riel H, Karg S, Beierlein T, et al. Phosphorescent top-emitting organic light-emitting devices with improved light outcoupling[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **82**(3): 466-468.
- [7] CHEN S, LI X, HUANG W. Blue top-emitting organic light-emitting devices using a 2,9-dimethyl-4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline outcoupling layer[J]. *Organic Electronics*, 2008, **9**(6): 1112-1117.
- [8] HAM H K, Oh Y T, Choi S E, et al. Out-coupling efficiency enhancement of organic light emitting diode device by SiO<sub>2</sub>-UV hardener composite layer[J]. *Journal of Nanoscience & Nanotechnology*, 2011, **11**(2): 1766.
- [9] Smith L H, Wasey J, Barnes W L. Light outcoupling efficiency of top-emitting organic light-emitting diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **84**(16): 2986-2988.
- [10] CHEN S, JIE Z, ZHAO Z, et al. Improved light outcoupling for top-emitting organic light-emitting devices[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(4): 913.
- [11] Koh T W, Choi J M, Lee S, et al. Optical outcoupling enhancement in organic light-emitting diodes: highly conductive polymer as a low-index layer on microstructured ITO electrodes[J]. *Advanced Materials*, 2010, **22**(16): 1849-1853.
- [12] Jongchan K, Yue Q, Caleb C, et al. Efficient outcoupling of organic light emitting devices using a light scattering dielectric layer[J]. *ACS Photonics*, 2018, **5**(8): 3315-3321.
- [13] Riedel B, Kaiser I, Hauss J, et al. Improving the outcoupling efficiency of indium-tin-oxide-free organic light-emitting diodes via rough internal interfaces[J]. *Optics Express*, 2010, **18**: A631-A639.
- [14] 陈淑芬, 邵茗, 郭旭, 等. 基于 ZnS 增透膜的顶发射白光有机发光二极管[J]. *物理学报*, 2012, **61**(8): 87801.  
CHENG Shufen, SHAO Ming, GUO Xu, et al. Top-emitting white organic light-emitting diodes based on a ZnS light outcoupling layer[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2012, **61**(8): 087801.
- [15] CUI Y, YANG D K, McGraw G, et al. Combined internal and external extraction layers for enhanced light outcoupling for organic light emitting device[J]. *Optics Express*, 2012, **20**: A932-A940.
- [16] SHIN S J, Park T H, JIN H C, et al. Improvement of light out-coupling in organic light-emitting diodes by printed nanosized random texture layer[J]. *Organic Electronics*, 2013, **14**(1): 187-192.
- [17] KONG B K, Kim D H, Kim T W. Significant enhancement of out-coupling efficiency for yarn-based organic light-emitting devices with an organic scattering layer[J]. *Nano Energy*, 2020, **70**: 104503.
- [18] WANG Z, CHEN Z, XIAO L, et al. Enhancement of top emission for organic light-emitting diode via scattering surface plasmons by nano-aggregated outcoupling layer[J]. *Organic Electronics*, 2009, **10**(2): 341-345.
- [19] CHANG Y T, LIU S W, YUAN C H, et al. Comparison of light out-coupling enhancements in single-layer blue-phosphorescent organic light emitting diodes using small-molecule or polymer hosts[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, **114**(17): A295.