

文章编号: 1000-7032(2015)04-0459-07

基于 $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ 透明阳极的 顶发射 OLED 的模拟计算与制备

李源浩^{1,2}, 武聪伶^{1,2}, 杨君礼^{1,2}, 李菀丽^{1,2}, 刘慧慧^{1,2},
贾虎生^{1,3*}, 王 华^{1,2}, 刘旭光^{1,4}, 伍永安⁵

(1. 太原理工大学 新材料界面科学与工程教育部重点实验室, 山西 太原 030024;
2. 太原理工大学 新材料工程技术研究中心, 山西 太原 030024; 3. 太原理工大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024;
4. 太原理工大学 化学化工学院, 山西 太原 030024; 5. 山西国光半导体照明工程研究有限公司, 山西 太原 030006)

摘要: 运用传输矩阵法和正交分析法模拟计算出 $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ 透明电极的最佳厚度, 采用镀膜实验验证模拟计算的准确性, 制备了一系列不同 MoO_3 膜厚度和 Ag 膜厚度的透明电极。然后, 制备了一系列顶发射有机电致发光器件: 铝/氟化锂(LiF)/三(8-羟基喹啉)铝(Alq_3)/N,N'-二苯基-N,N'-(1-萘基)-1,1'-联苯-4,4'-二胺/三氧化钼(MoO_3)/银(Ag)/三氧化钼(MoO_3), 来进一步验证模拟计算运用在器件制备中的准确性。 MoO_3 (10 nm)/Ag(10 nm)/ MoO_3 (25 nm)在 532 nm 处的透射率达到最大值 88.256%, 以该透明电极制备的器件与参考器件相比, 性能有了明显提高, 最大亮度和最大效率分别为 20 076 cd/m^2 和 4.03 cd/A , 提高了 18.5% 和 56%。器件性能的提高归因于顶发射 OLED 器件透射率的提高和 MoO_3 对空穴注入能力的提升。

关键词: 顶发射有机电致发光器件; 模拟计算; 三氧化钼; 透射率

中图分类号: TN383+.1

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20153604.0459

Simulation Calculation and Preparation of Top Emitting OLEDs with Transparent Anode of $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$

LI Yuan-hao^{1,2}, WU Cong-ling^{1,2}, YANG Jun-li^{1,2}, LI Wan-li^{1,2}, LIU Hui-hui^{1,2},
JIA Hu-sheng^{1,3*}, WANG Hua^{1,2}, LIU Xu-guang^{1,4}, WU Yong-an⁵

(1. Key Laboratory of Interface Science and Engineering in Advanced Materials, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
2. Research Center of Advanced Materials Science and Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
3. Material Science and Engineering Institute, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
4. Chemistry and Chemical Engineering Institute, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
5. Shanxi Guoguang Semiconductor Lighting Engineering Co., Ltd., Taiyuan 030006, China.)

* Corresponding Author, E-mail: jiahusheng@126.com

Abstract: The transfer matrix method and the orthogonal analysis method were used to calculate the optimum film thickness of $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ as a transparent anode. In order to validate the accuracy of simulation calculation, $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ transparent anodes with different thickness of MoO_3 and Ag films were fabricated. Then, the top emitting OLEDs with structure of Al/LiF/tris(8-hydroxyquinolino)aluminum(Alq_3)/N,N'-bis-(1-naphthyl)-N,N'-biphenyl-1,1'-biphenyl-4,4'-diamine(NPB)/ $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ were fabricated to further verify the accuracy of the simulation

收稿日期: 2014-12-25; 修订日期: 2015-01-14

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-13-0927); 国家国际科技合作项目(2012DFR50460); 国家自然科学基金(61274056,61205179,61307030,5072105); 山西省科技创新团队项目(2012041011)资助

calculation used in device fabrication. When the electrode thickness is MoO_3 (10 nm)/Ag (10 nm)/ MoO_3 (25 nm), the device reaches the most optimal performance. The maximum transmittance is 88.256% at 532 nm. And the maximum luminance and luminous efficiency are 20 076 cd/m^2 and 4.03 cd/A , which are improved by 18.5% and 56% compared with the reference device, respectively. The results demonstrate a practical way to fabricate highly efficient top emitting OLEDs.

Key words: TOLED; simulation calculation; MoO_3 ; transmittance

1 引 言

有机电致发光器件(OLED)由于其稳定的效率提升、高亮度、优越的色平衡等优点在诸如显示、家用照明的应用中展现出很大的潜力^[1-7]。然而,传统的底发射有机电致发光器件(BOLEDs)却存在着一个严重的问题:由器件所产生的光只有一小部分可以发射出来,而剩余的光则由于光波导模式在器件内部完全反射与损失^[8]。根据射线光学理论,器件所产生的大约80%的光经过玻璃基底和钢锡氧化物(ITO)阳极/有机材料界面而损失,这就意味着大部分的光在玻璃基底和器件内损失或者从器件边缘发出^[9]。

顶发射电致发光器件(TOLEDs)中产生的光可以通过透明电极直接射出,从而在很大程度上改善了光的取出并且推动器件产生更高的效率^[10]。另一方面,这种器件还可以应用在诸如硅等不透明的基底上,与当前的有源矩阵显示相结合以获得更加细腻的图像^[11]。随着人们对有机发光器件结构研究的不断深入,许多新型结构器件因其不同的用途备受关注^[12-14]。其中倒置顶发射有机电致发光器件采用与传统顶发射器件相反的制作工艺,将阴极蒸镀在基底玻璃上,依次蒸镀电子注入层、电子传输层、发光层、空穴传输层、空穴注入层、透明阳极。近年来,国内外有许多关于倒置顶发射有机电致发光器件的报道^[15-18]。对于顶发射器件,电极的选择尤为重要,底端电极的反射率要高,这样光才会尽可能多地被反射,从而提高光取出效率。在顶端阳极材料选择上,ITO因其高透射率而得到广泛的应用,但ITO电极的沉积方式不同,在器件制备过程中不能达到一体化,同时磁控溅射ITO电极对有机层的损害很大^[19],因此,选择合适的电极就显得至关重要。

近年来,使用由薄金属层夹在氧化物层中组成的多层电极已经被广泛地应用^[20]。这类电极

的制备过程与传统的热蒸镀过程相同,因此很大程度上减少了对其他有机层的破坏。典型的金属层常采用金属Ag^[21]、Au^[22]等,氧化物层的采用涉及到ITO、 WO_3 ^[23]、 ZnO ^[24]。从理论上讲,金属层应选择折射率(n_{Metal})为0的材料,这是因为光子的能量吸收与 nkd/λ 成比例,其中 λ 是入射光的波长, k 是消光系数, d 为金属层厚度^[1]。所以我们选取折射率较低的金Ag($n_{\text{Ag}}=0.05-i2.90$)作为金属层。在氧化物层的选择上,考虑到多层电极的反射以及干扰,选用高折射率的材料中间夹金属Ag层可以有效地提高透射率,因此我们选用 MoO_3 ($n>2.0$)作为氧化物层^[25],同时作为顶发射器件阳极 MoO_3 能有效地提高空穴注入能力,从而提高器件性能。

国内外有许多选取 $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ 作为电极的实验:2011年,Tian Baolin等^[25]采用 MoO_3 (40 nm)/Ag(16 nm)/ MoO_3 (40 nm)作为透明阴极,所制备器件的最大亮度达到1 300 cd/m^2 ,在可见波长范围内透射率超过65%。2011年,Ji Wenyu等^[5]采用 MoO_3 (40 nm)/Ag(17 nm)/ MoO_3 (40 nm)作为白光器件的透明阳极,器件在可见波长范围内平均透射率达到84%。2013年,Wing Hong Choi等^[6]采用ITO(80 nm)/Ag(10 nm)/ MoO_3 (2.5 nm)作为白光器件的透明阳极,器件在可见波长范围内透射率超过50%。通过对相关报道的研究,我们发现在选取电极厚度时一般都是根据实验经验直接确定,然而电极厚度是影响顶发射器件性能的关键因素,因此选取合适的方法确定电极厚度就显得尤为重要。

本文选取 $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ 作为顶发射器件透明阳极,结合正交实验和模拟计算,计算出电极最佳厚度,之后制备一系列器件,以验证模拟计算的准确性。器件结构为Al(150 nm)/LiF(1 nm)/Alq₃(40 nm)/NPB(30 nm)/ MoO_3 (10 nm)/Ag(x nm)/ MoO_3 (25 nm), $x=6,8,10,12,14$ nm。最后

将最佳结构器件与传统器件进行对比,进一步验证透射率的提高会对器件性能产生影响。

2 实 验

2.1 理论模拟及计算

我们采用正交实验和传输矩阵法(TMM)找到 MoO₃/Ag/MoO₃ 透明阳极的最佳厚度。顶发射器件的结构为 Al(150 nm)/LiF(1 nm)/Alq₃(40 nm)/NPB(30 nm)/MoO₃/Ag/MoO₃。

传输矩阵法多用于多层周期性交替排列介质, $M(z)$ 为传输矩阵,其实质为每层薄膜特征矩阵的乘积。在多层膜系中, n_j 和 d_j 分别表示第 j 层的折射率系数和薄膜厚度, θ_j 为光的入射角。若用 M_j 表示第 j 层的特征矩阵,则有:

$$M(z) = \prod_{j=1}^N M_j = \begin{bmatrix} A & C \\ B & D \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\text{其中 } M_j = \begin{bmatrix} \cos\beta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin\beta_j \\ i\eta_j \sin\beta_j & \cos\beta_j \end{bmatrix}, \quad (2)$$

β_j 为相位厚度,公式为:

$$\beta_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \cos\theta_j, \quad (3)$$

令 $\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix}$ 作为膜系的特征方程,可得出:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = M(z) \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{N+1} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

由导纳定义得出组合导纳:

$$Y = \frac{C}{B}, \quad (5)$$

薄膜透射系数为:

$$t = \frac{2\eta_0}{\eta_0 + Y}, \quad (6)$$

薄膜透射率为:

$$T = |t|^2. \quad (7)$$

根据正交性,我们从全面的实验中选出部分有代表性的点进行试验,并通过实验各部分因素进行分析,科学地绘制了“三因素五水平”正交表。在选取 Ag 因素水平时,考虑到过薄的 Ag 金属层会出现镀膜不均匀以及导电性低的问题^[26],而过厚的 Ag 金属层会影响透射率,所以我们选取 6, 8, 10, 12, 14 nm 5 种厚度。在选取 MoO₃ 厚度时,综合考虑器件透射率、对电极的保护能力、提高空穴注入能力等各方面因素,选取 10, 15,

20, 25, 30 nm 5 种厚度。表 1 是根据 25 组实验数据绘制的“三因素五水平”正交表,具备了“均匀分散、齐整可比”的特点。

表 1 正交实验的结果和分析

Table 1 Results and analysis of orthogonally designed tests

试验号	因素			透射率/%
	MoO ₃ /nm	Ag/nm	MoO ₃ /nm	
1	10	6	10	84.301 2
2	10	8	15	83.621 1
3	10	10	20	84.782 2
4	10	12	25	86.162 3
5	10	14	30	78.041 8
6	15	6	15	83.241 5
7	15	8	20	83.200 3
8	15	10	25	80.581 9
9	15	12	30	83.680 4
10	15	14	10	71.223 4
11	20	6	20	81.301 4
12	20	8	25	82.851 2
13	20	10	30	82.391 5
14	20	12	10	79.142 3
15	20	14	15	75.782 2
16	25	6	25	83.622 1
17	25	8	30	80.569 2
18	25	10	10	82.491 7
19	25	12	15	81.520 6
20	25	14	20	78.651 3
21	30	6	30	78.772 9
22	30	8	10	78.714 4
23	30	10	15	85.201 3
24	30	12	20	82.887 3
25	30	14	25	82.152 1
K_1	416.91	411.24	395.875	
K_2	401.93	408.955	409.365	
K_3	401.47	415.45	410.82	
K_4	406.855	413.395	415.37	
K_5	407.73	385.85	403.455	
k_1	83.382	82.248	79.175	
k_2	80.386	81.791	81.873	
k_3	80.294	83.09	82.164	
k_4	81.371	82.679	83.074	
k_5	81.546	77.17	80.691	
D	3.088	5.92	3.899	

最后,通过对模拟出的透射率进行正交计算,找出最佳透射率所对应的膜厚。计算过程如下:表 1 中 K_i 为第 i 列“1”水平所对应的试验指标的数值之和, k_i 为第 i 列“1”水平所对应的试验指标的平均值, D_j 为第 j 列的极差,其值为第 j 列各水平所对应的试验指标平均值中最大值减去最小值,即:

$$D_j = \max\{k_i\} - \min\{k_i\}, \quad (8)$$

表 1 中给出了 532 nm 波长下不同厚度透明阳极的透射率。

2.2 实验

本实验所用药品均购于 Nichem Fine Technology Co. Ltd., 衬底采用方块电阻为 $15 \Omega/\square$ 的 ITO 玻璃。在蒸镀有机层前, 使用洗洁精、丙酮、去离子水依次对玻璃衬底进行清洗, 之后置于盛有去离子水、丙酮的烧杯中进行超声清洗。最后放入紫外灯下进行臭氧处理以提高 ITO 表面的功函数。

将处理好的玻璃衬底放入真空蒸镀腔, 在真空度降至 5×10^{-4} Pa 以下时, 分别以 0.01, 0.1, 0.3 nm/s 的速率蒸镀 LiF、有机层和金属电极。

使用美国 Keithley 2400 数字源表和 PR-655 光谱仪测试器件的 EL 性能, 使用紫外可见光谱仪 (HITACHI U-3900) 测试薄膜的透射率。所有测试均在室温、大气下的暗室中进行。

首先进行透明电极的镀膜实验, 以验证模拟透射率的准确性。之后为了验证电极对器件性能的影响同样符合模拟计算结果, 我们设计了顶发射器件, 结构为 Al(150 nm)/LiF(1 nm)/Alq₃(40 nm)/NPB(30 nm)/MoO₃(10 nm)/Ag(x nm)/MoO₃(25 nm), x = 6, 8, 10, 12, 14 nm。最后, 采用传统 ITO 底发射器件作为参考器件来比较顶发射器件各项性能的提升情况, 结构为 ITO/NPB(30 nm)/Alq₃(40 nm)/LiF(1 nm)/Al(150 nm)。图 1 为顶发射器件和参考器件的结构图。

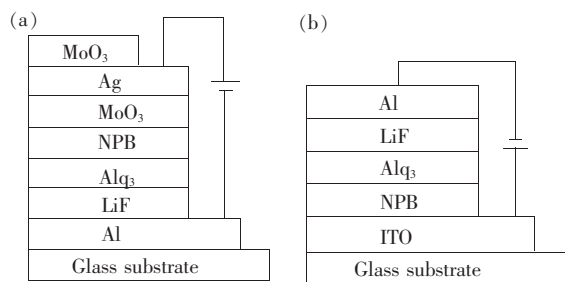


图 1 顶发射器件(a)和参考器件(b)的结构示意图

Fig. 1 Devices structure diagram of top emitting OLED (a) and reference OLED (b)

3 结果与讨论

3.1 正交实验结果分析

通过表 1 的正交计算结果分析可得, 在厚度为 MoO₃(10 nm)/Ag(10 nm)/MoO₃(25 nm) 时,

透明电极的透射率达到理论最高值。金属 Ag 层对透射率影响最大, 按照 Ag 层厚度为 10, 12, 8, 6, 14 nm 的顺序, 电极透射率依次减小。

3.2 顶发射电极透射率

为了验证正交实验的结果分析, 我们真空蒸镀了不同膜厚的电极并对其透射率进行了测试。图 2 为 MoO₃(10 nm)/Ag(x nm)/MoO₃(25 nm), x = 6, 8, 10, 12, 14 nm 结构在不同波长下透射率的比较。由图可知, 不同厚度 Ag 层电极的透射率基本符合模拟计算以及正交实验结果, 按照 Ag 层厚度为 10, 12, 8, 6, 14 nm 的顺序, 电极透射率依次减小。在 Ag 层厚度为 10 nm 时, 532 nm 波长下的电极透射率达到 88.234%, 高于传统 ITO 电极 83.723% 的透射率。该结果进一步证明当光通过 ITO 和玻璃基底时会产生损失, 而采用 MoO₃/Ag/MoO₃ 电极可以减少这种界面间的损失, 从而提高了透射率。

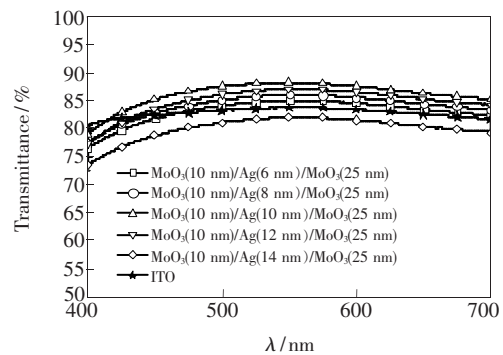


图 2 不同 Ag 厚度的电极透射率($\lambda = 532$ nm)

Fig. 2 Transmittance of the anode with different thickness of Ag ($\lambda = 532$ nm)

3.3 顶发射电极对器件性能的影响

为了验证电极透射率的提高是否能影响器件性能, 我们制备了结构为 Al(150 nm)/LiF(1 nm)/Alq₃(40 nm)/NPB(30 nm)/MoO₃(10 nm)/Ag(x nm)/MoO₃(25 nm), x = 6 (A), 8 (B), 10 (C), 12 (D), 14 (E) 的 5 种顶发射 OLED 器件, 如图 1(a) 所示。电源的阳极直接接在 Ag 层上, 最外层的 MoO₃ 并没有接入电路。这样的设计在不影响透射率的前提下, 既保证了电流的有效传递又对电极做了很好的保护。

图 3(a) 为 5 种器件的电压-亮度特性曲线。从图中可以看出, 在同一电压下, 器件的亮度按 C、D、B、A、E 的顺序依次减小。Ag 厚度为 10 nm 的器件 C 的亮度在 8.4 V 时达到最大的 20 076

cd/m^2 。我们知道,光是以不同的角度穿过电极从器件中射出的,当光斜射入电极时,传播方向一般会发生变化。随着电极厚度的改变,一部分光在通过电极界面时会由于折射而造成损失或者从器件边缘射出。不同厚度的电极具有不同的透射率,所制备器件的发光亮度也体现出了同一趋势。图 3(b)为 5 种器件的归一化 EL 光谱。由于没有受到微腔效应的影响,器件的发光峰均在 532 nm

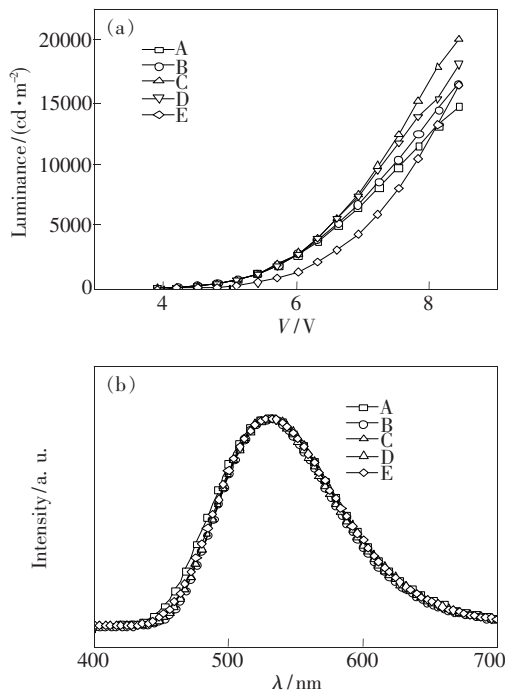


图 3 不同电极厚度的器件的亮度-电压特性曲线(a)和归一化光谱(b)

Fig. 3 Luminance-voltage characteristics (a) and normalized EL spectra (b) of the top emitting OLED with different anode thickness

处,光谱基本重合,说明电极厚度的改变并没有影响器件的发光颜色。

图 4 为 5 种器件的电流密度-电流效率-功率效率特性曲线。从图中可以看出,在相同的电流密度下,电流效率和功率效率按 C、D、B、A、E 的顺序依次减小。Ag 厚度为 10 nm 的器件 C 的最大电流效率达到 $4.03 \text{ cd}/\text{A}$,最大功率效率达到 $2.98 \text{ lm}/\text{W}$ 。由此可知透射率的提高也能有效地提高器件的效率。

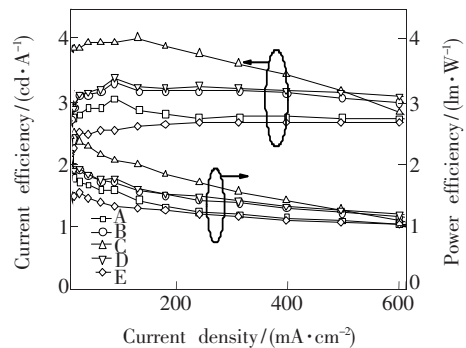


图 4 不同电极厚度的器件的电流效率-功率效率-电流密度特性曲线

Fig. 4 Current efficiency-power efficiency-current density characteristics of the top emitting OLED with different anode thickness

表 2 为 5 种器件的电致发光性能参数对比。从表中可以看出,器件 C 的最大亮度、最大电流效率和最大功率效率均为最佳,器件的发光性能按 C、D、B、A、E 的顺序依次下降。这与模拟计算所得的结论基本吻合,验证了传输矩阵法(TMM)和正交实验法的准确性和实用性。

表 2 器件的电致发光性能参数

Table 2 EL characteristics of the devices

器件	启亮电压/V	最大亮度/ $(\text{cd} \cdot \text{m}^{-2})$	最大电流效率/ $(\text{cd} \cdot \text{A}^{-1})$	最大功率效率/ $(\text{lm} \cdot \text{W}^{-1})$
A	3	14 701(8.5 V)	3.05	2.07
B	3	16 514(8.5 V)	3.31	1.91
C	3	20 076(8.5 V)	4.03	2.52
D	3	18 069(8.5 V)	3.39	2.2
E	3	16 336(8.5 V)	2.68	1.57

3.4 顶发射器件与同结构底发射器件的对比

为进一步验证 $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ 作电极对器件性能的影响,制备了结构如图 1(b)所示以 ITO 为电极的传统底发射器件 F 与 C 器件进行对比。

图 5(a)为器件的亮度-电压特性曲线。从图

中可以看出,与器件 F 相比,器件 C 的亮度有了很大的提高。器件 C 在 8.5 V 时达到的最大亮度为 $20\,076 \text{ cd}/\text{m}^2$,而器件 F 在 8.7 V 时达到的最大亮度只有 $16\,935 \text{ cd}/\text{m}^2$,器件 C 的提高幅度达到了 18.5%。图 5(b)为器件的归一化 EL 光谱,

两种器件的发光峰均在 532 nm 处,说明器件结构的改变并未对发光颜色造成影响。

图 6 为两种器件的电流效率-功率效率-电流密度特性曲线,从图中可以看出,与器件 F 相比,器件 C 的电流效率由 2.58 cd/A 提高到 4.03 cd/A,上升幅度为 57%;功率效率由 1.91 lm/W 提高到 2.98 lm/W,上升幅度为 56%。可见 $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ 作为电极不仅提高了光的透过率,而且能够提高器件的发光性能。其主要原因是 $\text{MoO}_3/$

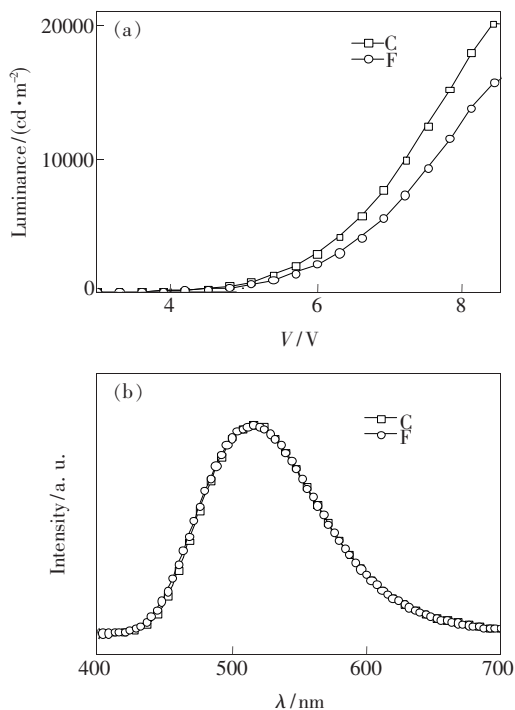


图 5 器件 C 和器件 F 的亮度-电压特性曲线(a)和归一化光谱(b)

Fig. 5 Luminance-voltage characteristics (a) and normalized EL spectra (b) of device C and F, respectively.

参 考 文 献:

- [1] Hong K H, Kim K S, Kim S J, *et al.* Optical properties of $\text{WO}_3/\text{Ag}/\text{WO}_3$ multilayer as transparent cathode in top-emitting organic light emitting diodes [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2011, 115(8):3453-3459.
- [2] Kido J, Kimura M, Nagai K. Multilayer white light-emitting organic electroluminescent device [J]. *Science*, 1995, 267(5202):1332-1334.
- [3] Du X G, Wang H, Liu H H, *et al.* Investigation on the direct charge-recombination mechanism of $\text{Ir}(\text{ppy})_3$ in OLED [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2014, 35(4):481-485 (in Chinese).
- [4] Guo S, Du X G, Liu X Y, *et al.* Graphene oxide as doping material for assembling OLEDs via thermal co-evaporation with NPB and Alq_3 [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2013, 34(5):595-560 (in Chinese).
- [5] Ji W Y, Zhao J L, Sun Z C, *et al.* High-color-rendering flexible top-emitting warm-white organic light emitting diode with a transparent multilayer cathode [J]. *Org. Electron.*, 2011, 12(7):1137-1141.
- [6] Wing H C, Hoi L T, Zhu F R, *et al.* High performance semitransparent phosphorescent white organic light emitting diodes

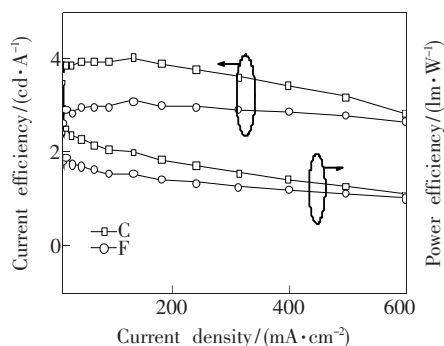


图 6 器件 C 和器件 F 的电流效率-功率效率-电流密度特性曲线

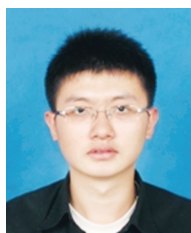
Fig. 6 Current efficiency-power efficiency-current density characteristics of device C and F, respectively.

Ag/MoO_3 降低了界面势垒,提高了电极的空穴注入能力,降低了器件的驱动电压,从而提高了器件的发光性能。

4 结 论

利用传输矩阵法(TMM)和正交实验法找到了顶发射电极的最佳厚度为 MoO_3 (10 nm)/ Ag (10 nm)/ MoO_3 (25 nm),并且通过电极镀膜和器件制备进一步验证了传输矩阵法(TMM)和正交实验法的可行性和准确性。通过与传统标准 ITO 器件的对比,发现器件性能得到了明显的改善:最高亮度提升了 18.5%,达到 $20\,076\text{ cd}/\text{m}^2$;最大电流效率和功率效率分别提升了 57% 和 56%,达到 4.03 cd/A 和 2.98 lm/W。因此,我们认为 $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ 这种电极设计不仅能够提高电极的透射率,还能提高电极的空穴注入能力进而提高器件的发光性能,具有较高的实用价值。

- with bi-directional and symmetrical illumination [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 102(15):153308-1-4.
- [7] Su S J, Gonmori E, Sasabe H, *et al.* Highly efficient organic blue- and white-light-emitting devices having a carrier- and exciton-confining structure for reduced efficiency roll-off [J]. *Adv. Mater.*, 2008, 20(21):4189-4194.
- [8] Fan Y, Chen J S, Ma D G. Enhancement of light extraction of green top-emitting organic light-emitting diodes with refractive index gradually changed coupling layers [J]. *Org. Electron.*, 2013, 14(12):3234-3239.
- [9] Wong K M C, Chan M M Y, Yam V W W. Supramolecular assembly of metal-ligand chromophores for sensing and phosphorescent OLED applications [J]. *Adv. Mater.*, 2014, 26(31):5558-5568.
- [10] Reineke S, Lindner F, Schwartz G, *et al.* White organic light-emitting diodes with fluorescent tube efficiency [J]. *Nature*, 2009, 459(14):234-238.
- [11] Lee C J, Pode R B, Moon D G, *et al.* On the problem of microcavity effects on the top emitting OLED with semitransparent metal cathode [J]. *Phys. Stat. Sol.*, 2004, 201(5):1022-1028.
- [12] Huh J W, Moon J H, Lee J W, *et al.* Directed emissive high efficient white transparent organic light emitting diodes with double layered capping layers [J]. *Org. Electron.*, 2012, 13(8):1386-1391.
- [13] Atwater H A, Polman A. Plasmonics for improved photovoltaic devices [J]. *Nat. Mater.*, 2010, 9:205-213.
- [14] Hou J, Wu J, Xie Z, *et al.* Efficient inverted top-emitting organic light-emitting diodes using ultrathin $\text{MoO}_3/\text{C}_{60}$ bilayer structure to enhance hole injection [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 95(20):203508-1-3.
- [15] Zhang X W, Xu J W, Wang H, *et al.* Optimizing structure for constructing a highly efficient inverted top-emitting organic light-emitting diode with stable electroluminescent spectra [J]. *J. Semicond.*, 2014, 35(2):023002-1-4.
- [16] Najafabadi E, Knauer K A, Haske W, *et al.* High-performance inverted top-emitting green electrophosphorescent organic light-emitting diodes with a modified top Ag anode [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 14(5):1271-1275.
- [17] Wang Q, Deng Z, Chen J, *et al.* Realization of blue, green, and white inverted microcavity top-emitting organic light-emitting devices based on the same emitting layer [J]. *Opt. Lett.*, 2010, 35(4):462-464.
- [18] Dobbertin T, Kroeger M, Heithecker D, *et al.* Inverted top-emitting organic light-emitting diodes using sputter-deposited anodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 82(2):284-286.
- [19] Tao S, Zhou Y C, Lee C S, *et al.* Highly efficient nondoped blue organic light-emitting diodes based on anthracene-triphenylamine derivatives [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2008, 112(37):14603-14606.
- [20] Su S H, Wu C M, Tsai H L, *et al.* Transparent organic thin film transistors using an oxide/metal/oxide trilayer as low-resistance transparent source/drain electrodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 52(4S):04CK09-1-4.
- [21] Zadsar M, Fallah H R, Mahmoodzadeh M H, *et al.* The effect of Ag layer thickness on the properties of $\text{WO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ multilayer films as anode in organic light emitting diodes [J]. *J. Lumin.*, 2012, 132(4):992-997.
- [22] Maniruzzamane M, Rahman M A, Jeong K H, *et al.* ITO free $\text{MoO}_3/\text{Au}/\text{MoO}_3$ structures using Al_2O_3 as protective barrier between MoO_3 and PEDOT:PSS in organic solar cells [J]. *Renewable Energy*, 2014, 71:193-199.
- [23] Jeon K M, Youn H S, Kim S B, *et al.* Fabrication and characterization of $\text{WO}_3/\text{Ag}/\text{WO}_3$ multilayer transparent anode with solution-processed WO_3 for polymer light-emitting diodes [J]. *Nanoscale Res. Lett.*, 2012, 7(1):253-256.
- [24] Sahu D R, Lin S Y, Huang J L. $\text{ZnO}/\text{Ag}/\text{ZnO}$ multilayer films for the application of a very low resistance transparent electrode [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2006, 252(20):7509-7514.
- [25] Tian B L, Williams G, Ban D Y, *et al.* Transparent organic light-emitting devices using a $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ cathode [J]. *J. Appl. Phys.*, 2011, 110(10):104507-1-6.
- [26] Makha M, Cattin L, Lare Y, *et al.* $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ anode in organic photovoltaic cells; Influence of the presence of a CuI buffer layer between the anode and the electron donor [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101(23):233307-1-3.



李源浩(1990 -),男,山西太原人,硕士研究生,2012年于陕西科技大学获得学士学位,主要从事有机电致发光器件的制备方面的研究。

E-mail: 332125466@qq.com



贾虎生(1964 -),男,山西原平人,教授,1996年于西北工业大学获得博士学位,主要从事光电功能材料的制备与应用方面的研究。

E-mail: jiahusheng@126.com