

文章编号: 1000-7032(2025)12-2316-09

基于Mg:Ag电极的透明倒置OLED器件

李佳坤¹, 朱冠成¹, 邹建华^{2*}, 彭俊彪¹

(1. 华南理工大学 发光材料与器件国家重点实验室, 广东 广州 510641;

2. 广州新视界光电科技有限公司, 广东 广州 510630)

摘要: 透明OLED具有双面出光特性,其在抬头显示和可穿戴设备等领域具有广阔应用前景。本文首先设计了Mg:Ag透明电极,通过降低薄膜厚度并调控Mg在Ag中的掺杂比例提高透光率,发现Mg:Ag膜厚为14 nm且掺杂比例1:1时,电极的透过率为60%,在正置OLED器件中也展现最优的综合性能。然后,结合优化的Mg:Ag透明电极,在倒置器件中,对空穴和电子传输层进行优化。最后,在倒置器件中,通过在Mg:Ag阴极外侧蒸镀BCP光取出层来进一步提高器件的性能。结果显示,采用60 nm厚度且Bphen:Cs₂CO₃掺杂比例为1:1的N型电子注入层和40 nm厚度的HAT-CN空穴注入层以及50 nm BCP光取出层时,OLED器件启亮电压降至2.4 V,器件最大电流效率43.1 cd·A⁻¹,在10 mA·cm⁻²的电流密度驱动下,OLED器件两侧出光亮度分别为2 237 cd·m⁻²和1 844 cd·m⁻²,两侧发光强度比例为45%:55%,器件在530 nm处透光率达到82.0%。

关键词: 透明OLED; 透明金属电极; 倒置发光器件

中图分类号: TN312.8 文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20250146

CSTR: 32170.14.CJL.20250146

Transparent Invented OLED Devices Based on Mg:Ag Electrodes

LI Jiakun¹, ZHU Guancheng¹, ZOU Jianhua^{2*}, PENG Junbiao¹

(1. State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Guangzhou Newvision Optoelectronic Technology Co. Ltd, Guangzhou 510630, China)

* Corresponding Author, E-mail: zjh@newvision-cn.com

Abstract: Transparent OLEDs have the characteristic of double-sided light emission and have broad application prospects in fields such as head-up displays and wearable devices. In this paper, a Mg:Ag transparent electrode is first designed. By reducing the thickness of the thin film and regulating the doping ratio of Mg in Ag, the light transmittance is improved. It is found that when the thickness of the Mg:Ag film is 14 nm and the doping ratio is 1:1, the transmittance of the electrode is 60%, and it also exhibits the best comprehensive performance in the forward OLED device. Subsequently, combined with the optimized Mg:Ag transparent electrode, the hole and electron transport layers are optimized in the inverted device. Finally, in the inverted device, the performance of the device is further improved by evaporating a BCP light extraction layer on the outer side of the Mg:Ag cathode. The results show that when an N-type electron injection layer with a thickness of 60 nm and a doping ratio of Bphen:Cs₂CO₃ of 1:1, a hole injection layer of HAT-CN with a thickness of 40 nm, and a BCP light extraction layer with a thickness of 50 nm are used, the turn-on voltage of the OLED device drops to 2.4 V, the maximum current efficiency of the device is 43.1 cd·A⁻¹. Under the driving of a current density of 10 mA·cm⁻², the light emission brightness on both sides of the OLED device is 2 237 cd·m⁻² and 1 844 cd·m⁻² respectively, the ratio of the luminous intensity on both sides is 45%:55%, and the light transmittance of the device at 530 nm may reach 82.0%.

Key words: transparent OLED; transparent metal electrode; inverted OLED

收稿日期: 2025-05-12; 修订日期: 2025-05-28

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3603103); 广东省高等学校能源与信息高分子材料基础研究卓越中心

Supported by National Key Research and Development Program of China(2022YFB3603103); Guangdong Basic Research Center of Excellence for Energy & Information Polymer Materials

1 引言

OLED 凭借其自发光、高对比度、柔性^[1-2]等优势,成为显示技术的主要方向之一^[3-7]。自 1987 年邓青云博士^[8]提出三明治薄膜结构以来,OLED 经历了从基础研究到商业化的跨越。透明 OLED (TOLED)通过双透明电极实现两面发光显示^[9-10],在橱窗、车载等领域应用潜力巨大,透明电极的透明度与电导率之间的平衡是研究的重点。倒置器件(IOLED)因阴极位于基板底侧,更易与 N 沟道 TFT 驱动电路集成^[11-12],可以显著提高显示像素的开口率与稳定性,成为大尺寸显示的关键技术,但其发光性能尚受到电子注入层与底电极之间的较大能级差的影响。将透明电极与倒置器件结构相结合得到的透明倒置 OLED(TIOLED),兼具高集成度与双面显示特性,是高性能显示、AR/VR 等新兴领域较为理想的方案之一。

透明金属电极是目前在商业和科研中都被广泛使用的阴极材料,相较于其他种类的电极,其制备工艺简单、功函数与电子传输层能级匹配较好、电子传输性能好,但在保证较好电子传输性能的前提下,大部分金属电极的透明度在可见光范围内低于 80%^[13-14]。通过与其他金属共同蒸镀形成合金能有效优化电极的性能。常见的合金体系为 Mg:Ag 合金,在金、银、铝、铜等常见的电极金属中,Ag 在可见光和近红外范围内在相同薄膜厚度情况下有着最高的透过率,通过引入少量 Mg 原子可以抑制 Ag 膜的岛状生长,理论上可以降低透明电极正常工作所需的最小膜厚,从而在理论上可以进一步提高电极的透明度^[15]。金属 Mg 的透明度在可见光范围内要远低于金属 Ag,所以尽管 Mg 的引入能有效提高薄膜的成膜质量,但 Mg 的加入也存在着降低薄膜透明度的可能性。Mg:Ag 电极已经作为顶发射器件常用的半透明半反射电极而得到广泛研究,与高反射底电极构成高效微腔来提升性能^[16-17]。但与顶发射器件中的要求不同,在透明 OLED 器件中更加注重 Mg:Ag 电极的透过率。本文通过调整 Mg:Ag 合金中各组分比例和薄膜的厚度,以期综合优化成膜质量和透明度,获得透明 OLED 最佳光电性能。

为解决倒置底发射 OLED 器件中阴极电子注入效率较低的问题,人们探索了很多不同的阴极

修饰层材料,其目的主要是提高电子注入效率、平衡电子与空穴载流子的注入能力。目前,常见的阴极功能层有金属和金属氧化物注入层^[18-19]、N 型掺杂电子注入层^[20]、有机聚合物电子注入层^[21]和多层复合结构注入层^[22]等。其中,N 型掺杂结构是目前研究最多且比较充分的结构,通过对电子传输材料进行 N 型掺杂增加传输层中阴离子自由基的数量,改变传输层与阴极接触界面处的能带结构,更有利于电子的注入与传输,掺杂体系中的载流子迁移率也会更高^[23]。常见的 N 型掺杂材料包括活泼金属,如锂、铯、或活泼金属的化合物如氧化铯、碳酸铯等^[24-25]。

近些年,研究者们通过将透明电极和电极修饰层的研究成果进行整合优化,研制了很多性能优异的透明倒置 OLED 器件。Zhao 等^[26]在 ITO 基板上旋涂 ZnO 量子点/PFN 作为器件的电子注入结构,阳极使用 MoO₃/Au/MoO₃ 叠层透明电极并配合 NPB 作为空穴传输层来匹配界面势垒,制备了透明倒置 OLED 器件,其开启电压约为 3.7 V,两侧发光亮度较为均一,顶部和底部出光量占比分别为 42% 和 58%。2018 年,Yeh 等^[27]制备了结构为 ITO/Bphen:15% Cs₂CO₃ (5 nm)/Bphen(40 nm)/CBP:8% Ir(ppy)₃ (20 nm)/TAPC(65 nm)/MoO₃ (5 nm)/Ag(12 nm)/WO₃ (40 nm) 的透明倒置器件,开启电压为 2.6 V,电流效率为 62.2 cd·A⁻¹,器件的双面发光对称性较好,整体透过率在 550 nm 波长处为 88%,但叠层结构的电极存在制备工艺复杂且良品率低等问题。

本文分别对透明器件中的 Mg:Ag 透明金属电极的掺杂比例和厚度,以及倒置结构器件中的载流子传输层进行优化研究,制备了性能较为优异的透明倒置 OLED 器件。

2 实验

采用真空蒸镀法分别制备了结构为 ITO/NPB:F₄-TCNQ(150 nm,4%)/NPB(15 nm)/TCTA (5 nm)/Bepp₂: Ir(ppy)₃ (30 nm,5%)/Bepp₂: LiQ (30 nm,1:0.7)/Mg:Ag 的正置 OLED 器件和 ITO/N-doping/Bepp₂: Ir(ppy)₃ (30 nm,5%)/TCTA (5 nm)/NPB (15 nm)/HAT-CN(X nm)/Al 的倒置 OLED 器件,倒置器件中的 N 型掺杂电子传输材料分别为 Bphen:Cs₂CO₃、Bphen:KBH₄ 和 Bphen:LiQ。具体制备过程如下。

薄膜沉积前,先将玻璃基板依次放入四氢呋

喃、异丙醇和去离子水中进行超声清洗,清洗完毕后
后将基板放入烘箱烘干,之后通过真空阀将基板
从手套箱转移至蒸镀腔内。当蒸镀腔内真空度达
到 1.33×10^{-5} Pa (10^{-7} Torr) 时,开始器件制备。

空穴传输材料 NPB 和 F₄-TCNQ 的蒸镀速率和
蒸镀温度分别为 $0.1\text{ nm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $320\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.08\text{ nm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、
 $280\text{ }^{\circ}\text{C}$;TCTA 蒸镀速率控制在 0.05 nm/s ,蒸镀温
度为 $375\text{ }^{\circ}\text{C}$;发光层材料 Bepp₂ 和 Ir(ppy)₃ 的蒸镀参
数分别为 $0.005\text{ nm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $390\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.1\text{ nm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $330\text{ }^{\circ}\text{C}$;
HAT-CN 蒸镀速率为 $0.05\text{ nm}\cdot\text{s}^{-1}$,温度为 $430\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

最后,在手套箱中使用紫外光固化胶和玻璃
盖板对器件进行封装。

3 结果与讨论

3.1 Mg:Ag 金属电极的优化

为制备高性能双面发光的透明 OLED 器件,
需要对两侧发光亮度影响最大的 Mg:Ag 半透明
电极厚度进行优化。首先在洁净的透明玻璃上依
次蒸镀不同厚度且比例为 1:9 的 Mg:Ag 薄膜,然
后进行封装防止阴极在空气中氧化。其中,Mg 的
蒸镀速率恒定为 $0.009\text{ nm}\cdot\text{s}^{-1}$,蒸镀温度 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$;
Ag 的蒸镀速率为 $0.09\text{ nm}\cdot\text{s}^{-1}$,蒸镀温度 $1\text{ }150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。
透过率结果如图 1 所示。

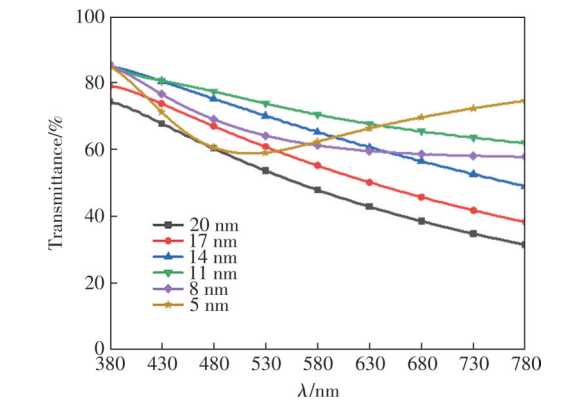


图 1 不同厚度 Mg:Ag (1:9)金属薄膜的透过率
Fig.1 Transmittance of Mg:Ag (1:9) metal films of different thickness

随着 Mg:Ag 金属薄膜厚度逐渐减小,其透
过率明显提高。厚度为 20 nm 的 Mg:Ag 薄膜在可
见光范围内的平均透过率为 49.8%,绿光波段
(530 nm) 的透过率为 53.7%,但与透过率超过
90% 的 ITO 薄膜相比,尚存在较大差距。

当 Mg:Ag 薄膜的厚度减小至 12 nm 时,其可
见光平均透过率达到了最高值,为 71.5%,绿光透
过率为 73.8%,透过率得到显著的提升。当 Mg:

Ag 薄膜厚度进一步降低时,其中 5 nm 的 Mg:Ag
金属薄膜透过率曲线具有很明显的波谷,这与 Ag
纳米颗粒因局域表面等离子体共振 (Localized
surface plasmon resonance, LSPR) 而在某一波长产
生强吸收现象相吻合^[28],同时这一厚度下薄膜完
全不导电,我们认为该厚度下的 Mg:Ag 依然呈现
岛状。

进一步地,制备了结构为 ITO/NPB:F₄-TCNQ
(150 nm,4%)/NPB (15 nm)/TCTA (5 nm)/Bepp₂:
Ir(ppy)₃ (30 nm,5%)/Bepp₂:LiQ (30 nm,1:0.7)/
Mg:Ag 的透明绿光 OLED 器件,其 J-V-L 曲线如图
2 所示,主要数据列于表 1 中。

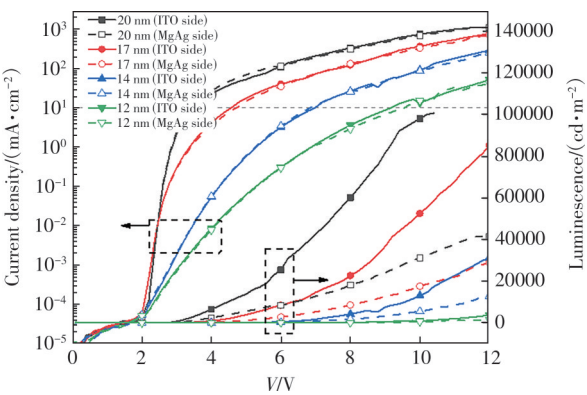


图 2 不同 Mg:Ag (1:9)电极厚度的绿光 OLED 器件的
电流密度-电压-亮度(J-V-L)曲线

Fig.2 Current density-voltage-luminescence (J-V-L) curve
of transparent green devices with different thickness
of Mg:Ag (1:9) electrode

表 1 不同厚度 Mg:Ag 电极透明绿光器件两侧亮度对比
(@10 mA·cm⁻²)

Tab. 1 Brightness comparison between two sides of transpar-
ent green devices with Mg:Ag electrode of different
thickness (@10 mA·cm⁻²)

厚度/ nm	$L_{ITO}/$ ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$)	$L_{\text{Mg:Ag}}/$ ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$)	$L_{\text{All}}/$ ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$)	$L_{\text{Mg:Ag}}/$ $L_{\text{All}}/\%$	$V_D/$ V
20	2 921	922	3 843	24	3.5
17	2 163.5	771.5	2 935	26	4.6
14	1 523	677.5	2 200.5	31	6.7
12	591.5	306.5	898	34	9

从图 2 和表 1 可以看出,在 Mg:Ag 原子比例
为 1:9 的情况下,当 Mg:Ag 阴极的厚度进一步
降低时,器件 ITO 阳极侧和透明金属阴极侧的出
光量都会随之下降,同时驱动电压也会升高。例
如,当阴极厚度从 20 nm 降至 12 nm 时,驱动电压
便从 3.5 V 上升到了 9.0 V。主要原因是随着 Mg:
Ag 薄膜厚度的进一步减小,阴极的导电能力和电

入性能会显著下降。因此,综合考虑透过性和电导率,14 nm 厚度的 Mg:Ag 电极是最优选择。然而,较少比例的 Mg 原子难以有效抑制 Ag 的岛状生长,所以考虑优化 14 nm 厚度的 Mg:Ag 合金中 Mg 的比例,以此抑制薄膜中 Ag 的岛状生长,进而提高成膜质量。

在玻璃衬底上蒸镀不同比例的 Mg:Ag 薄膜,在保证膜层厚度为 14 nm 的前提下,通过调节蒸镀温度来改变各组分的蒸镀速率,制备出了 Mg:Ag 掺杂比例分别为 9:1、4:1、2.5:1、1:1、1:1.5、1:2.5、1:4、1:9 的多种透明金属薄膜。这些薄膜的透过率与掺杂比例关系如图 3 所示。当 Mg 含量从 10%(1:9)提升至约 30%(1:2.5)时,14 nm 厚度的 Mg:Ag 薄膜在可见光区的平均透过率有一定程度的提高,从 69.9% 提高到了 75.9%。透过率升高的主要原因是,通过热蒸发制备的 Mg:Ag 金属薄膜依照 Volmer-Weber 成核机制生长,会受到表面能失配的限制,薄膜呈现出连续或颗粒状的金属岛形貌。这些不连续的形貌缺陷会引发电子和光子的散射,致使透明度和电导率性能降低。随着 Mg 含量的增加,在沉积过程中 Mg 的加入能够更有效地抑制 Ag 的岛状生长,从而使薄膜的透过率得到一定的提升。但进一步提高 Mg 的比例时,由于 Mg 自身透光率较低,薄膜的整体透光率会急剧下降。在可见光范围内,Mg:Ag 比例为 1:2.5 时薄膜的透过率最高,平均透过率可达 75.9%。

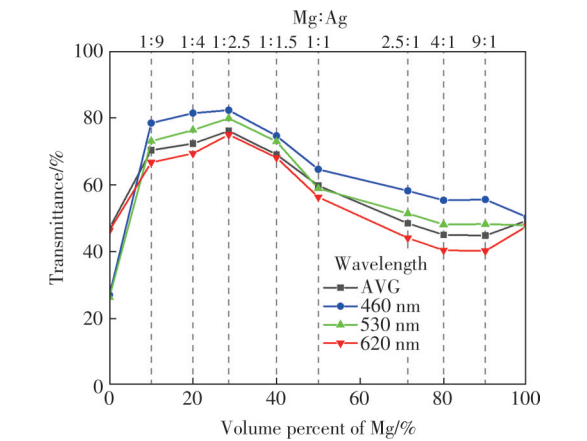


图 3 14 nm 膜厚的 Mg:Ag 薄膜在不同掺杂比例下的透过率
Fig.3 Transmittance of 14 nm film thickness Mg:Ag films at different doping ratios

在保持薄膜厚度为 14 nm 的情况下,选取了 1:9、1:2.5、1:1、2.5:1、9:1 五个不同的 Mg:Ag 比例,通过蒸镀工艺来制备器件的阴极。相关 OLED 器件的性能如表 2 和图 4 所示。

表 2 不同掺杂比例 Mg:Ag 阴极的透明绿光器件两侧亮度的对比 (@10 mA·cm⁻²)

Tab. 2 Brightness comparison of two sides of the transparent green optical device with Mg:Ag electrode under different doping ratios (@10 mA·cm⁻²)

Mg:Ag	$L_{ITO}/$ (cd·m ⁻²)	$L_{Mg:Ag}/$ (cd·m ⁻²)	$L_{All}/$ (cd·m ⁻²)	$L_{Mg:Ag}/$ $L_{All}/\%$	$V_D/$ V
9:1	2 795	1 016.5	3 811.5	27	3.8
2.5:1	2 511	1 040	3 551	29	3.8
1:1	2 475	1 406	3 881.5	36	3.5
1:2.5	1 897	1 088.5	2 985.5	36	4.7
1:9	1 523	677.5	2 200.5	31	6.7

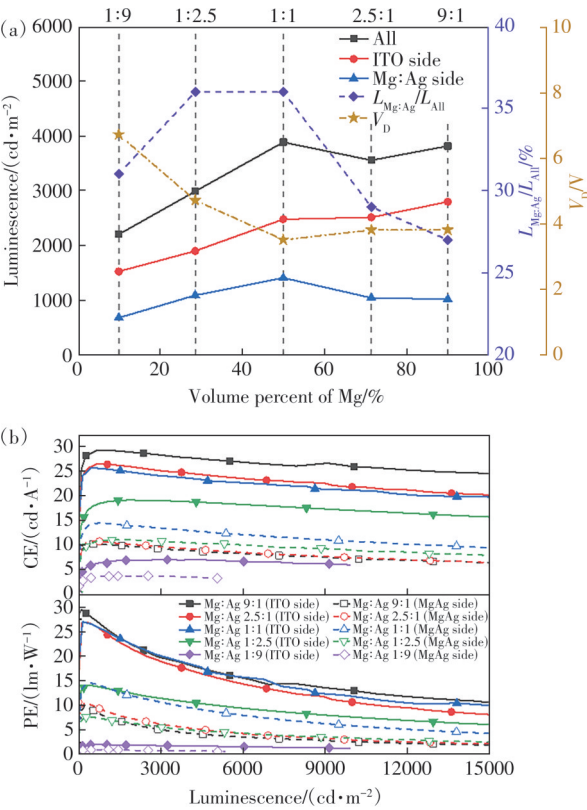


图 4 (a)透明器件性能与 Mg:Ag 电极掺杂比例关系;(b)不同掺杂比例 Mg:Ag 阴极的透明绿光器件电流效率(CE)和功率效率(PE)曲线

Fig.4 (a) Diagram of transparent device performance and Mg:Ag electrode doping ratio. (b) Current efficiency (CE) and power efficiency (PE) curves of transparent devices with different doping ratios of Mg:Ag cathodes

当 Mg:Ag 合金中 Mg 的含量低于 50% 时,所制备的器件呈现出较高的驱动电压,并且其总发光亮度以及 ITO 面的出光量也会随着 Mg 含量的降低而呈现出下降的趋势。这是因为低功函数的 Mg 含量减少对电子的注入性能产生了不利影响。而当 Mg:Ag 合金中 Mg 的含量超过 50% 时,器件的电压都稳定保持在一个相对较低的数值区间,即 3.5~

3.8 V 之间,这表明此时电子的注入性能处于良好状态。然而,由于 Mg 含量的增加,Mg:Ag 电极的透过率有所降低,具体表现为 Mg:Ag 电极面的出光比例有所降低。与此同时,Ag 含量的减少导致电极的导电性下降,从而使得驱动电压有所增加。

当厚度为 14 nm、比例为 1:1 的 Mg:Ag 薄膜为阴极时,可获得最好的器件性能,其 Mg:Ag 侧同亮度下具有最高的电流效率和功率效率,同时 ITO 侧发光也相对较好;与比例为 1:9、厚度为 20 nm 的 Mg:Ag 电极制备的器件相比,驱动电压都是 3.5 V,但通过降低阴极厚度和进行比例优化,使 Mg:Ag 阴极的透明度得到了提高,从不足 50% 的平均透过率提高到了超过 60%,器件的两侧发光对称性也得到了明显改善。

3.2 倒置器件中电子传输层的优化

随后,我们制备了结构为 ITO/N-doping ETL/Bepp₂: Ir(ppy)₃ (30 nm, 5%)/TCTA (5 nm)/NPB (15 nm)/HAT-CN (40 nm)/Al 的绿光倒置 OLED 器件。首先制备了当 N 型掺杂层为 Bphen:Cs₂CO₃ (Cs₂CO₃ 为 50% 掺杂),厚度为 80 nm、60 nm、40 nm 和 20 nm 四种不同电子传输层厚度的倒置结构 OLED 器件,发现倒置结构对器件发光性能的影响并不明显,如图 5 所示。当 ETL 厚度从 80 nm 减到 20 nm 时,*J-V* 曲线几乎没有变化,这表明 ETL 的厚度变化并不会引起器件电学性能的明显改变;结合图 5(b) 中光谱的变化,表明器件亮度的变化是由于光学性能引起的。其中,40 nm 厚度的 ETL 器件表现出最佳的器件性能。

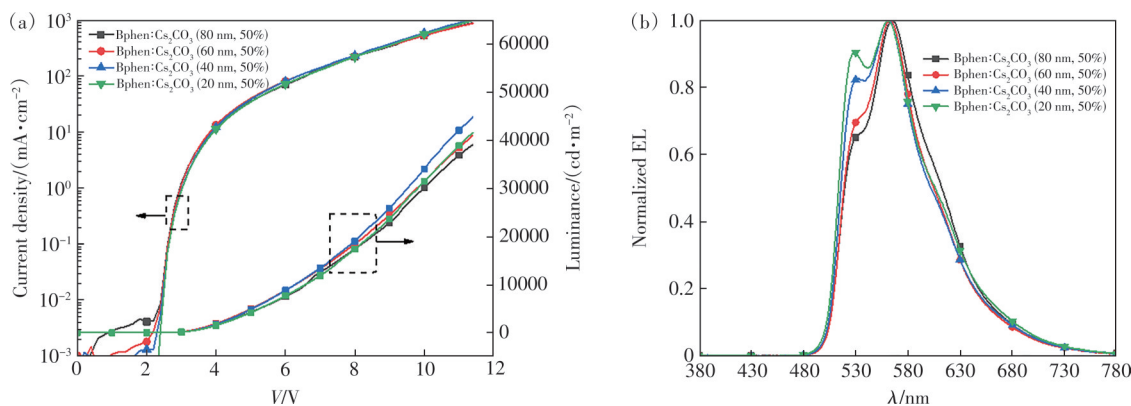


图 5 不同电子传输层厚度的倒置绿光器件的(a)电流密度-电压-亮度(*J-V-L*)曲线与(b)归一化发光光谱(@10 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$)

Fig.5 (a) Current density-voltage-luminance (*J-V-L*) curve and (b) normalized luminescence spectra (@10 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$) of inverted green light devices with different ETL thickness

随后使用 Bphen:KBH₄、Bphen:Cs₂CO₃ 和 Bphen:LiQ 三种不同掺杂的电子传输层来探究其对倒置器件性能的影响,如图 6 所示。在均为 20% 的掺

杂浓度下,Bphen:Cs₂CO₃ 为 ETL 的倒置器件表现出最佳性能。优化后,Bphen:Cs₂CO₃ (60 nm, 50%) 和 Bphen:KBH₄ (60 nm, 10%) 分别为两种 ETL 的

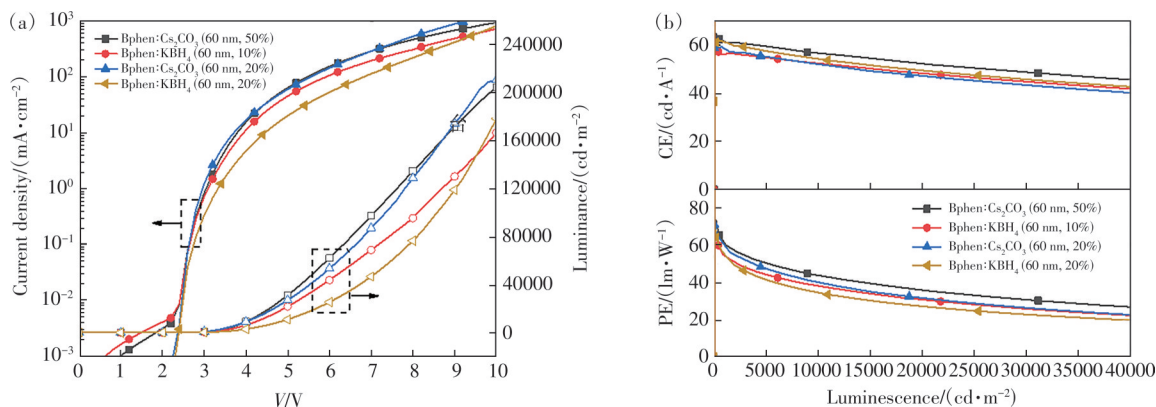


图 6 不同掺杂电子传输层倒置绿光器件的(a)电流密度-电压-亮度(*J-V-L*)曲线、(b)电流效率(CE)和功率效率(PE)曲线(掺杂 LiQ 的器件由于不能正常发光无相关数据)

Fig.6 (a) Current density-voltage-luminance (*J-V-L*) curve, (b) current efficiency (CE) and power efficiency (PE) of inverted green light devices with different doping ETL (Devices doped with LiQ have no relevant data due to their inability to emit light normally)

最佳掺杂浓度, Bphen:Cs₂CO₃ 依然表现出最优的发光效果, 相同亮度下具有最高的电流效率和功率效率。值得注意的是, 使用 LiQ 作为掺杂材料的器件却无法正常发光, 我们后续尝试了多种比例 (20:1~1:1) 均无法成功, 这一情况可能与 LiQ 相对较高的 LUMO 能级 (3.15 eV) 存在关联。相关报道指出, Cs₂CO₃ 和 KBH₄ 在蒸镀过程中会分解成为具有更低功函数的 Cs (1.9 eV)、Cs₂O (~2.0 eV) 和 K (2.3 eV)^[29-30]。并且, 由于采用了混合蒸镀工艺, Cs₂CO₃ 和 KBH₄ 的分解在一定程度上受到了抑制, 但同时仍保留了少量的分解, 而这恰好提高了电子注入效率。

3.3 倒置器件中空穴注入层与器件腔长变化影响

在倒置结构器件 ITO/Bphen:Cs₂CO₃ (60 nm, 50%)/Bepp₂:Ir(ppy)₃ (30 nm, 5%)/TCTA (5 nm)/

NPB (15 nm)/HAT-CN (X nm)/Al 中, 图 7(a) 的 J - V 曲线显示, 随着 HAT-CN 厚度从 30 nm 线性增大至 260 nm, 整体器件电阻呈现单调递增趋势。这一变化主要源于 HAT-CN 厚度增加所带来的附加串联电阻增大, 并使得载流子注入势垒在电学层面被逐步放大。然而, 与此形成鲜明对比的是, 器件的亮度与电流效率并未随电阻增大而出现单调衰减, 反而表现出明显的周期性振荡行为 (见图 7(d))。这一现象直观地说明, 在倒置 OLED 微腔结构中, 电学因素 (如串联电阻、注入势垒) 对最终发光性能的影响远小于光学因素 (即微腔效应)。值得注意的是, 实验结果在 $X=40$ nm 处出现亮度和发光效率峰值。该结论不仅验证了微腔模型在倒置 OLED 中的适用性, 也为后续通过光学腔长设计进一步提升器件性能提供了明确的实验依据和优化窗口。

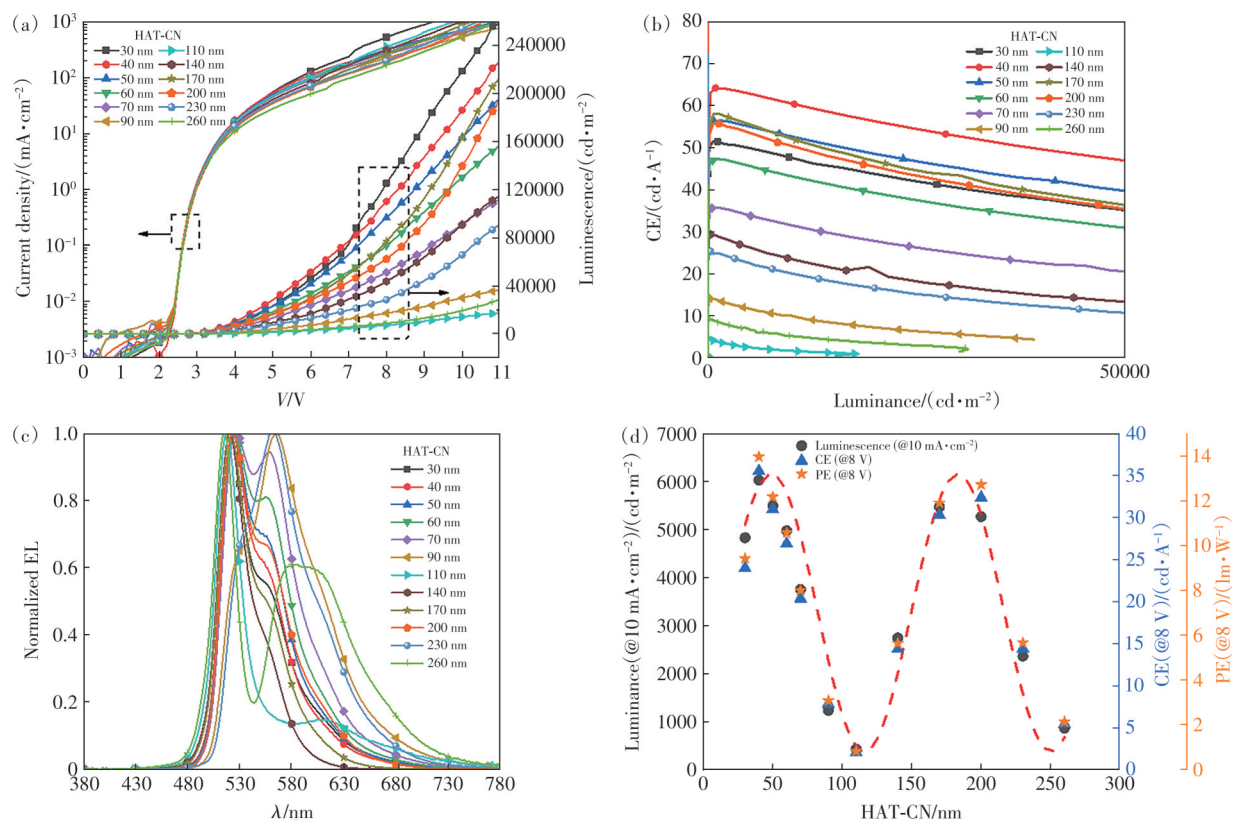


图 7 不同空穴注入层厚度的倒置绿光器件的 (a) J - V - L 曲线、(b) CE 曲线、(c) 归一化发光光谱 (@10 $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$) 和 (d) 亮度-HIL 厚度关系图

Fig.7 (a) J - V - L curve, (b) CE curve, (c) normalized Luminance spectra (@10 $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$), and (d) Luminance-HIL thickness relationship graph of inverted green light devices with different HIL thicknesses

3.4 光取出层对透明倒置器件的影响

结合对透明电极和倒置器件中载流子传输层的优化, 为进一步提高 OLED 的发光性能和透过率, 引入 BCP 作为光取出层, 通过逐层折射率匹配形成折射率梯度, 减少全反射产生的损失^[31]。制备

了结构为 ITO/Bphen:Cs₂CO₃ (60 nm, 50%)/Bepp₂:Ir(ppy)₃ (30 nm, 5%)/TCTA (5 nm)/NPB (15 nm)/HAT-CN (40 nm)/Mg:Ag (1:1, 14 nm)/BCP (50 nm) 的透明倒置 OLED 器件, 并与无 BCP 作为光取出层的器件进行对比。结合图 8 可知, 有无 BCP 的

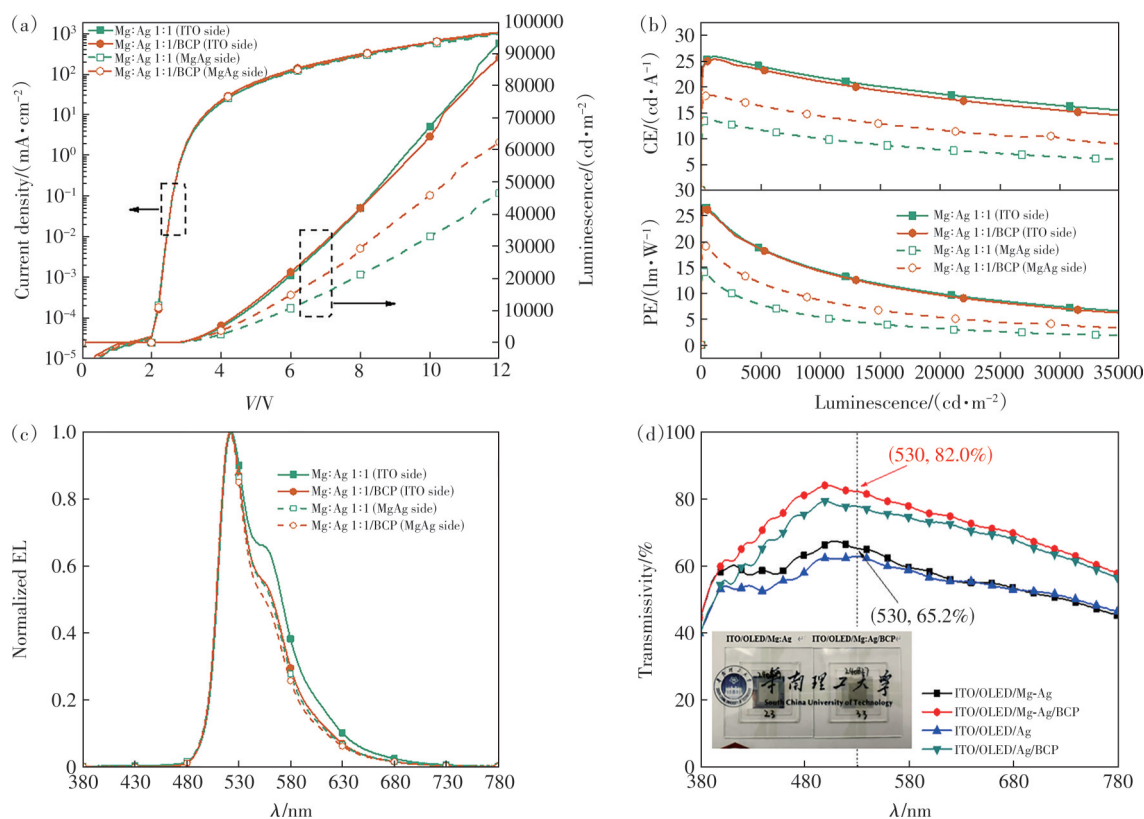


图 8 倒置透明 OLED 器件两侧的(a)电流密度-电压-亮度(J - V - L)曲线、(b)电流效率(CE)和功率效率(PE)曲线、(c)归一化发光光谱(@ $10 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$);(d)透明倒置器件透过率与实物测试图

Fig.8 (a) J - V - L curve, (b) CE and PE curve, (c) normalized luminescence spectra (@ $10 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$) of two sides of transparent inverted OLED. (d) Light transmittance of transparent inversion device and the physical image

器件在 ITO 侧相同电压下的发光亮度和电流效率几乎一致,但光谱上存在一定差异,而具有 BCP 的器件在 ITO 侧的发光光谱更窄。在 14 nm 厚度、比例 1:1 的 Mg:Ag 阴极外侧通过真空蒸镀的方法蒸镀 50 nm 的 BCP 薄膜,该器件 Mg:Ag 电极侧在相同电压下比无 BCP 器件具有更高的亮度和电流效率,包含 BCP 器件的电流密度-电压曲线几乎与未覆盖 BCP 器件的重合,表明覆盖 BCP 不会改变电极的导电性能,而主要作用是在光学性能上得到改善。

同时,制备的倒置透明 OLED 器件具有相对较好的性能。在 $10 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,ITO 侧的发光亮度为 $2237 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$,Mg:Ag 侧的发光亮度为 $1844 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 并占总发光亮度的 45%,启亮电压保持在一个较低的数值为 2.4 V,两侧光谱的峰值位置、半高宽

以及形状和强度分布近乎相同,说明器件两侧发光对称性较好,器件透过率在 530 nm 处达到 82.0% (见图 8(d)),整体透明度也较好。

4 结 论

本文通过对透明 Mg:Ag 电极比例和厚度的优化,以及倒置器件中的载流子传输层结构设计,得到了性能较高的倒置透明 OLED 器件。14 nm 厚度、1:1 比例的 Mg:Ag 阴极倒置结构发光器件具有如下性能:启亮电压 2.4 V、两侧发光强度比 45%:55%、透光率 82.0% @ 530 nm,为实现高性能倒置透明 OLED 器件提供了参考思路和方法。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250146>

参 考 文 献:

[1] 刘迪莹,钟锦耀,唐彪,等. 柔性印刷 OLED 研究进展[J]. 液晶与显示, 2021, 36(2): 217-228.

LIU D X, ZHONG J Y, TANG B, *et al.* Research progress of flexible and printed OLED [J]. *Chin. J. Liq. Cryst.*

- Disp.*, 2021, 36(2): 217-228. (in Chinese)
- [2] WANG T T, LU K K, XU Z H, *et al.* Recent developments in flexible transparent electrode [J]. *Crystals*, 2021, 11(5): 511.
- [3] 邹建华, 朱冠成, 王磊, 等. 有机电致发光器件及显示驱动研究进展 [J]. *发光学报*, 2023, 44(1): 198-217.
ZOU J H, ZHU G C, WANG L, *et al.* Research progress on organic light-emitting diodes and display drive [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(1): 198-217. (in Chinese)
- [4] HUANG Y G, HSIANG E L, DENG M Y, *et al.* Mini-LED, micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives [J]. *Light Sci. Appl.*, 2020, 9: 105.
- [5] BANERJEE S, SINGH P, PURKAYASTHA P, *et al.* Evolution of organic light emitting diode (OLED) materials and their impact on display technology [J]. *Chem. Asian J.*, 2025, 20(4): e202401291.
- [6] LIGUORI R, NUNZIATA F, APRANO S, *et al.* Overcoming challenges in OLED technology for lighting solutions [J]. *Electronics*, 2024, 13(7): 1299.
- [7] ZHAO L X, LI J, LI L Q, *et al.* Recent advances in small-molecule organic fluorescent semiconductors [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2024, 12(35): 13745-13761.
- [8] TANG C W, VANSLYKE S A. Organic electroluminescent diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, 51(12): 913-915.
- [9] 李一爽, 包志强, 邹德月, 等. 透明发光二极管研究进展 [J]. *发光学报*, 2023, 44(9): 1527-1545.
LI Y S, BAO Z Q, ZOU D Y, *et al.* Research progress of transparent light-emitting diodes [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(9): 1527-1545. (in Chinese)
- [10] SONG T B, LI N. Emerging transparent conducting electrodes for organic light emitting diodes [J]. *Electronics*, 2014, 3(1): 190-204.
- [11] CHANG M K, JEONG S, KIM D, *et al.* Review of integrated gate driver circuits in active matrix thin-film transistor display panels [J]. *Micromachines*, 2024, 15(7): 823.
- [12] LONG Y F, MENG H. Key components for active-matrix OLED displays: Fundamentals and market status [J]. *J. Lumin.*, 2025, 280: 121099.
- [13] WU T Z F, JIN Y C, LÜ Z Y, *et al.* Dual side transparent organic light-emitting diodes with a modified Ag top cathode [J]. *Displays*, 2024, 83: 102713.
- [14] LI P, CHEN Z Q, FANG K, *et al.* An electrode based on Ca: Au alloy and atomic layer deposition for a transparent flexible OLED device [J]. *J. Electron. Mater.*, 2024, 53(6): 2955-2964.
- [15] LEE D, CHO E S, JEON Y, *et al.* Characterization of the material and electrical properties depending on the Mg:Ag ratio as a cathode for TEOLED [J]. *Mater. Chem. Phys.*, 2023, 303: 127742.
- [16] KWON S K, LEE E H, KIM K S, *et al.* Efficient micro-cavity top emission OLED with optimized Mg: Ag ratio cathode [J]. *Opt. Express*, 2017, 25(24): 29906-29915.
- [17] MAN J X, HE S J, WANG D K, *et al.* Tailoring Mg: Ag functionalities for organic light-emitting diodes [J]. *Org. Electron.*, 2018, 63: 41-46.
- [18] 李轩, 郑浩臣, 吕文理, 等. 基于镁电子注入层的倒置磷光有机发光二极管 [J]. *发光学报*, 2023, 44(4): 657-663.
LI X, ZHENG H C, LYU W L, *et al.* Inverted phosphorescent organic light-emitting diodes utilizing mg as electron-injection layer [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(4): 657-663. (in Chinese)
- [19] BOLINK H J, CORONADO E, REPETTO D, *et al.* Inverted solution processable OLEDs using a metal oxide as an electron injection contact [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2008, 18(1): 145-150.
- [20] FUJIMOTO H, MIYAYAMA T, SANADA N, *et al.* Plasma-tolerant structure for organic light-emitting diodes with aluminum cathodes fabricated by DC magnetron sputtering: using a Li-doped electron transport layer [J]. *Org. Electron.*, 2013, 14(11): 2994-2999.
- [21] CHUNG D S, DAVIDSON-HALL T, YU H, *et al.* Significant enhancement in quantum-dot light emitting device stability via a ZnO: polyethylenimine mixture in the electron transport layer [J]. *Nanoscale Adv.*, 2021, 3(20): 5900-5907.
- [22] CHU T Y, CHEN J F, CHEN S Y, *et al.* Highly efficient and stable inverted bottom-emission organic light emitting devices [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89(5): 053503.
- [23] FU C Y, LIN H P. Performance enhancement of blue organic light-emitting devices by inserting BPhen: Alq₃ as an n-doping

- electron transport layer [J]. *Solid State Commun.*, 2024, 378: 115411.
- [24] HUH J W, MOON J, LEE J W, *et al.* Organic/metal hybrid cathode for transparent organic light-emitting diodes [J]. *Org. Electron.*, 2013, 14(8): 2039-2045.
- [25] JIA M P, XU X J, PENG J H, *et al.* Solution-processed double-layer electron-transport layer for conventional blue phosphorescent organic light-emitting diodes [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2016, 4(10): 1635-1641.
- [26] ZHAO D, LIU Y F, WU M G, *et al.* Large area transparent organic light-emitting device by using PFN modified ZnO as electron transfer layer [C]. *Proceedings of SPIE 10842, 9th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Subdiffraction-Limited Plasmonic Lithography and Innovative Manufacturing Technology, Chengdu*, 2019: 108420R.
- [27] YE H T, LEE C C, SHIH C J, *et al.* Vacuum-deposited MoO₃/Ag/WO₃ multilayered electrode for highly efficient transparent and inverted organic light-emitting diodes [J]. *Org. Electron.*, 2018, 59: 266-271.
- [28] ZHAO Y P, NIU Y X, SHI W, *et al.* Enhancing the light output-coupling of inverted top-emitting organic light-emitting diodes by using the localized surface Plasmon resonance of Ag nanoparticles [J]. *Adv. Mater. Interfaces*, 2022, 9(15): 2200244.
- [29] LIU Q, ZHANG D Q, DUAN L, *et al.* Thermally decomposable KBH₄ as an efficient electron injection material for organic light-emitting diodes [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2009, 48(8): 080205.
- [30] LIU Q, DUAN L, LI Y, *et al.* Study on the electron injection mechanism of thermally decomposable Cs₂CO₃ [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2009, 48(10R): 102302.
- [31] CHEN S F, XIE W F, MENG Y L, *et al.* Effect of 2, 9-dimethyl-4, 7-diphenyl-1, 10-phenanthroline outcoupling layer on electroluminescent performances in top-emitting organic light-emitting devices [J]. *J. Appl. Phys.*, 2008, 103(5): 054506.



李佳坤(2000–),男,山东济南人,硕士研究生,2022年于华南理工大学获得学士学位,主要从事有机电致发光器件的研究。
E-mail: ljkun1004@163.com



邹建华(1983–),男,湖北荆州人,博士,研究员,2010年于华南理工大学获得博士学位,主要从事新型显示器件、有源矩阵(AMOLED)显示屏彩色化、柔性显示技术与工艺开发。
E-mail: zjh@newvision-cn.com