

文章编号: 1000-7032(2023)04-0657-07

基于镁电子注入层的倒置磷光有机发光二极管

李 轩, 郑浩臣, 吕文理*, 徐苏楠, 孙 磊, 彭应全

(中国计量大学 光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310008)

摘要: 倒置有机发光二极管(Inverted organic light-emitting diodes, IOLEDs)因其结构容易与 n 型薄膜晶体管技术集成而得到了广泛研究。在 IOLEDs 研究中,为了使电子能从底阴极有效注入电子传输层,对各式各样的电子注入层结构进行了研究。本文制备并研究了采用超薄金属 Mg 作为电子注入层的高效绿色磷光 IOLEDs。研究发现超薄金属 Mg 薄膜具有优良的透光性;基于 2 nm 厚 Mg 电子注入层的 IOLEDs 具有最优的发光性能,其启亮电压、最大电流效率和外量子效率分别为 3.06 V、46.5 cd/A 和 13.3%。

关键词: 有机发光二极管; 倒置; 超薄镁; 电子注入层

中图分类号: TN312.8 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20220362

Inverted Phosphorescent Organic Light-emitting Diodes Utilizing Mg as Electron-injection Layer

LI Xuan, ZHENG Haochen, LYU Wenli*, XU Sunan, SUN Lei, PENG Yingquan

(School of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310008, China)

* Corresponding Author, E-mail: lwl@cjl.u.edu.cn

Abstract: Inverted organic light-emitting diodes (IOLEDs) consist of a bottom cathode followed by the formation of an electron injection layer (EIL), an electron transport layer (ETL), a light emission layer (EML), a hole transport layer (HTL) and an anode, which have been widely investigated to match the existing n-type thin film transistor technology. In IOLEDs research, various EIL structures were studied to improve the efficiency of electron injection from the bottom cathode to ETL. In this paper, we report on high efficiency green phosphorescent IOLEDs utilizing ultra-thin Mg as EIL. The ultra-thin Mg films deposited on quartz substrates exhibited excellent light transmittance. IOLEDs based on the 2 nm Mg as EIL demonstrated the optimal device performance, with the maximum current efficiency, the maximum external quantum efficiency and turn-on voltage of 46.5 cd/A, 13.3% and 3.06 V, respectively.

Key words: organic light-emitting diodes; inverted; ultra-thin Mg; electron injection layer

1 引 言

倒置有机发光二极管(Inverted organic light-emitting diodes, IOLEDs)由底部阴极、电子注入层(EIL)、电子传输层(ETL)、发光层(EML)、空穴传输层(HTL)和阳极等功能层组成,因该结构容易与 n 型薄膜晶体管技术集成、容易实现全透明或顶发光 OLEDs 而被广泛研究^[1-5]。此外,在 IOLEDs

中,由于电子注入层最先被沉积在底部阴极上,含有活泼碱金属的电子注入层远离顶电极,不易被氧化,从而使得器件的寿命提高^[6]。

在底发光 IOLEDs 中,透明导电氧化物 ITO 因其良好的光学和电学性质通常被作为器件的阴极。由于 ITO 的功函数较高,与 ETL 的最低未占据分子轨道(LUMO)能级相差较大,较大的电子注入势垒使得电子无法有效从阴极注入 ETL。为

收稿日期: 2022-10-11; 修订日期: 2022-11-30

基金项目: 浙江省自然科学基金青年项目(LQ19F040003)

Supported by Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China(LQ19F040003)

了解决这个问题,通常会在ITO与ETL之间插入电子注入层(EIL)来降低电子注入势垒,改善电子的注入效率。为此,多种复杂的电子注入层结构得到了研究^[7],诸如:Tris(8-hydroxyquinoline) aluminum(Alq_3)/ Alq_3 : Li_3N 、HAT-CN/Al/Bphen:Li、 ZnO 、 MoS_2 、 ZnO /tris-[3-3-pyridyl] mesityl borane (3TP-YMB)、 ZnO /Bathophenanthroline 4,7-Diphenyl-1,10-phenanthroline (Bphen): Cs_2CO_3 、1,4,5,8,9,11-Hexa-azatriphenylenehexacarbonitrile (HAT-CN)/Al/LiF和Al纳米颗粒^[8-16]等。但复杂的多层电子注入层结构,特别是旋涂和碱金属掺杂等制备工艺,大大增加了IOLEDs的制备工艺难度和成本。

利用简单的低功函数金属薄膜作为电子注入层是降低IOLEDs制备工艺难度和成本的有效途径。相对于金属Al和 $\text{Ag}^{[17]}$,金属Mg具有更低的功函数,在早期荧光IOLEDs研究中也作为电子注入层^[1,18-19]。例如,2002年,Dobbertin等报道了顶发射的荧光IOLEDs采用Au(100 nm)/Mg(100 nm)双层结构作为器件的底电极和电子注入层^[18]。2006年,Chu等将超薄Mg薄膜插入到ITO底电极与 Alq_3 电子传输层之间,实现了电流效率~4.66 cd/A的荧光IOLEDs^[11]。同年,他们采用Mg/ Cs_2O :Bphen作为电子注入层,实现了电流效率~13.0 cd/A的白光IOLEDs^[19]。然而,在后来的磷光IOLEDs研究中,采用Mg作为电子注入层并不多见。在本研究中,我们采用超薄金属Mg作为电子注入层,将其插入到磷光IOLEDs的底电极与电子传输层之间,实现了高效率的绿色磷光IOLEDs。

2 实 验

2.1 样品制备

本文制备了结构如图1(a)所示的IOLEDs,其中采用图案化刻蚀的条状ITO作为底电极,超薄金属Mg薄膜作为电子注入层,Bis[2-(2-hydroxyphenyl)-pyridine beryllium (BePP2)作为电子传输层,质量比~8%的Tris(2-phenylpyridine) iridium (III) ($\text{Ir}(\text{ppy})_3$)掺杂在4,4'-bis(carbazol-9-yl) biphenyl (CBP)中作为发光层,1,1-Bis[(di-4-tolylamino)phenyl]cyclohexane (TAPC)作为空穴传输层,HAT-CN作为电荷产生层(CGL),Al作为顶电极。所有有机半导体材料均采购于吉林奥来德光电材料股份有限公司,在使用之前均未经过二次提纯。在器件制备之前,ITO玻璃衬底分别在丙酮、乙醇、去离子水超声清洗10 min,用氮气吹干

并在真空干燥箱(60 °C)中烘烤30 min。金属Mg颗粒在浓度为2%的稀盐酸中浸泡1 min以去除表面的氧化层。器件衬底和材料全部装入真空镀膜机,当真空度达到 2×10^{-4} Pa时开始蒸镀膜。其中Mg EIL和Al电极分别采用金属钨舟和钨丝作为加热源蒸镀,有机薄膜采用石英坩埚加热源蒸镀,薄膜的厚度通过石英晶振膜厚监测仪实时监测。为了精确控制Mg电子注入层的厚度,通过调节蒸发舟的功率,使Mg保持在较低的蒸发速率(0.5~1 nm/min)下沉积。器件的ITO底电极与Al顶电极为2 mm宽互相垂直的条状,重叠部分为器件的有效发光区域,面积为0.04 cm^2 。顶电极蒸镀完成之后,器件被转移至充满氩气的手套箱(水、氧含量小于 0.1×10^{-6})中,采用玻璃盖板和紫外固化胶对器件进行封装。

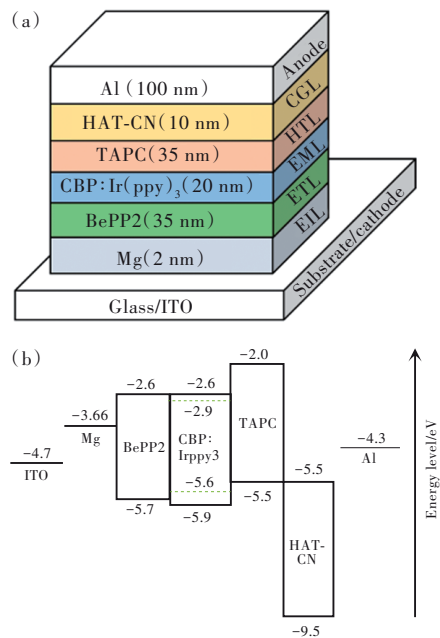


图1 基于Mg电子注入层的IOLEDs器件结构示意图(a)和能级示意图(b)

Fig.1 Schematic structure(a) and energy level diagram(b) of IOLEDs based on Mg electron injection layer

在本研究中,我们制备了基于Al(2 nm)/LiF(1 nm)、Al(2 nm)/LiF(1 nm)/Al(1 nm)和Mg电子注入层的IOLEDs,同时制备了不具有电子注入层的IOLEDs作为参考器件。此外,为了优化Mg电子注入层的厚度,我们制备了Mg电子注入层厚度分别为0.5,1,2,3 nm的IOLEDs器件。

2.2 样品表征

IOLEDs器件的性能表征采用OLED-200光色电综合性能分析系统(杭州远方光电信息股份有

公司),该系统配备了 Keithley 2400 源表作为器件测试的电压源表,可直接测试 OLEDs 的电流密度-电压(J - V)特性、亮度-电压(L - V)特性曲线,并获得 OLEDs 的电流效率(CE)、外量子效率(EQE)和电致发光(EL)光谱。为了表征 Mg 薄膜的光学特性和表面形貌,在石英玻璃和硅衬底上分别蒸镀了不同厚度的 Mg 薄膜,测量了其透射光谱和扫描电子显微镜(SEM)图像。

3 结果与讨论

在底发光的 IOLEDs 中,超薄的 Ag 或 Al 等金属薄膜通常被沉积在 ITO 底电极上作为电子注入层,金属电子注入层对器件透射率的影响是首先需要考虑的。由于金属薄膜厚度严重影响着其透射率,为了提高透射率,这些金属电子注入层的厚度一般都很薄(0.5~2 nm)^[20]。不同于 Al 和 Ag 的热蒸发沉积,Mg 在高真空下的热蒸发是由固体直接升华,在加热中没有观测到金属 Mg 的熔化现象。不同厚度 Mg 薄膜在石英衬底上的透射光谱如图 2 所示,石英衬底在可见光范围(380~780 nm)平均透射率为 94.8%。当 1,2,3 nm Mg 薄膜分别沉积在石英衬底上,其在可见光范围的平均透射率分别为 93.6%、93.1%、92.7%,相对于石英衬底分别降低了 1.21%、1.84%、2.21%。由此

可见,超薄金属 Mg 薄膜具有极好的透光性,保证了 IOLEDs 的发光能有效透射出器件。

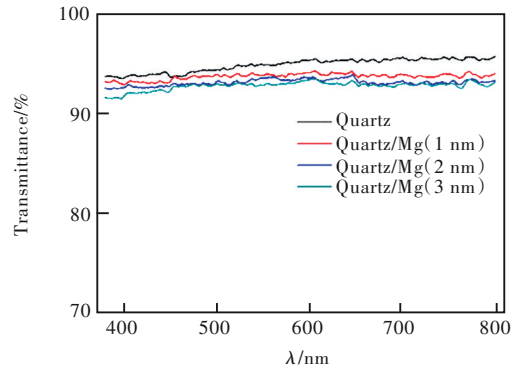


图2 石英衬底与石英/Mg薄膜的透射光谱

Fig.2 Transmission spectra of quartz substrate and quartz/Mg films

为了对比金属 Mg 作为 EIL 对 IOLEDs 电子注入效率的影响,同时制备了基于 Al(2 nm)/LiF(1 nm)、Al(2 nm)/LiF(1 nm)/Al(1 nm) EIL 和无 EIL 的 IOLEDs 器件,四种器件的 J - V 、 L - V 、 CE - V 和 EQE - V 特性曲线如图 3 所示。由图 3(a)可见,在相同驱动电压(12 V)下,基于 Al/LiF、Al/LiF/Al 和 Mg EIL IOLEDs 的电流密度分别是无 EIL 器件的 2.01, 3.62, 11.7 倍。表明引入 Mg 电子注入层可有效地改善电子的注入效率。如图 1(b)的

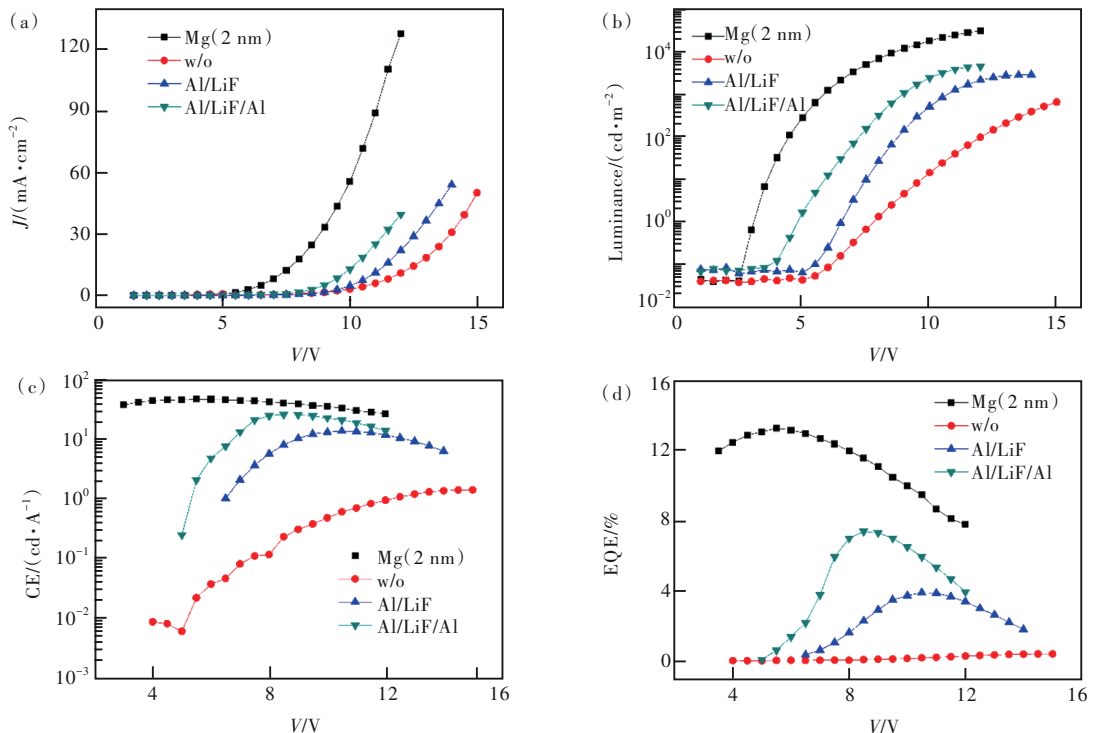


图3 基于 Mg、Al/LiF 和 Al/LiF/Al EIL IOLEDs 与无 EIL 器件的特性曲线。(a) J - V ;(b) L - V ;(c) CE - V ;(d) EQE - V 。

Fig.3 Characteristic curves of Mg, Al/LiF and Al/LiF/Al EIL IOLEDs and w/o EIL device. (a) J - V . (b) L - V . (c) CE - V . (d) EQE - V .

IOLEDs 能级示意图所示,ITO 的功函数为 -4.7 eV,BePP2 电子传输层的 LUMO 能级为 -2.6 eV,在无 EIL IOLEDs 中,电子从 ITO 阴极向 BePP2 电子传输层注入需要克服很大的注入势垒 ~ 2.1 eV^[20]。相对于金属 Al,Mg 具有更低的功函数 -3.66 eV^[17],当 Mg EIL 插入到 ITO 阴极与 BePP2 电子传输层之间,电子的注入势垒可被降低至 0.9 eV。Mg EIL 引入起到了电子注入势垒调控的作用,电子的注入可用典型 Richardson-Schottky 热注入模型描述^[7]。

图 3(b)展示了 IOLEDs 的 L - V 特性曲线。可见引入 Al/LiF、Al/LiF/Al 和 Mg EIL 后,IOLEDs 的启亮电压从 7.5 V 分别降低到 $6.5, 4.72, 3.06$ V; 在相同电压 12 V 下,无 EIL IOLEDs 的亮度仅有 104.7 cd/m²,而引入 Al/LiF、Al/LiF/Al 和 Mg EIL 之后,亮度分别增大到 $2369.1, 4946.3, 35157$ cd/m²。表明引入 EIL 之后,从阴极注入的大量电子与从阳极注入的空穴在发光层有效复合并发光;而无 EIL 器件由于从阴极无法有效注入电子,使得器件发光较弱。图 3(c)、(d)展示了 IOLEDs 的电流效率和外量子效率随电压变化的曲线。可

见,Mg EIL IOLEDs 的发光效率最高,CE_{max} 和 EQE_{max} 分别达到 46.5 cd/A 和 13.3% ,分别是无 EIL 器件的 48 倍和 43 倍。

图 4 展示了 IOLEDs 的归一化 EL 光谱,峰值波长如表 1 所示。可见四种 IOLEDs 的 EL 光谱只存在微小的差异,说明激子复合主要集中在 CBP:Ir(ppy)₃ 发光层内。EL 光谱间微小的差异可能来源于器件内微弱的微腔效应^[21]。

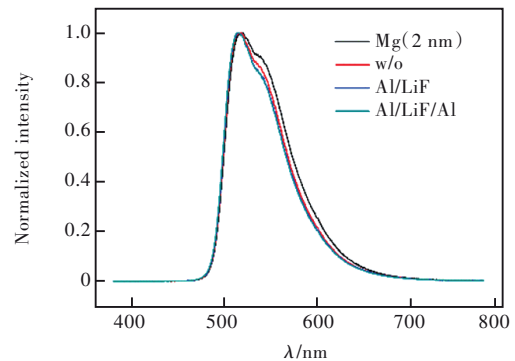


图 4 基于 Mg、Al/LiF 和 Al/LiF/Al EIL IOLEDs 与无 EIL 器件的 EL 光谱。

Fig.4 EL spectra of Mg, Al/LiF and Al/LiF/Al EIL IOLEDs and w/o EIL device.

表 1 IOLEDs 的发光特性参数

Tab. 1 Luminescence characteristic parameters of the IOLEDs

器件结构	启亮电压 ^a /V	L^b /(cd·m ⁻²)	EQE _{max} /%	CE _{max} /(cd·A ⁻¹)	EL 峰值波长/nm	
Mg EIL	0.5 nm	5.65	228.28	1.58	5.65	517
	1.0 nm	4.89	4 059.00	5.33	19.20	517
	2.0 nm	3.06	35 157.00	13.30	46.50	517
	3.0 nm	3.38	26 505.00	11.60	35.90	515
Al/LiF/Al EIL	4.72	4 946.30	7.32	26.60	516	
Al/LiF EIL	6.50	2 369.10	3.87	13.80	515	
参考器件 (无 EIL)	7.50	104.70	0.31	0.96	515	

^a 器件发光亮度达到 1 cd/m² 对应的电压;^b 驱动电压为 12 V 对应的发光亮度。

为了进一步研究 Mg EIL 厚度对 IOLEDs 性能的影响,我们制备了 Mg 电子注入层厚度分别为 $0.5, 1, 2, 3$ nm 的 IOLEDs 器件,器件的 J - L - V 、EQE- V 特性曲线如图 5 所示,表 1 列出了各个器件的性能参数。由图 5 可见,当 Mg EIL 厚度小于 2 nm 时,器件电流密度、亮度和发光效率都随 Mg 厚度的增加而增大。而当 Mg 的厚度增大到 3 nm 时,器件的发光亮度和效率有所降低,而电流密度与 2 nm Mg EIL 器件相当。为了探究 Mg EIL 厚度对器件性能影响的原因,使用场

发射扫描电子显微镜表征了 Mg 薄膜的表面形貌,如图 6 所示。由图 6 可见, 2 nm 厚的 Mg 可以有效覆盖硅衬底表面,只有少量岛状薄膜形成;而当 Mg 的厚度增大到 3 nm 及以上,岛状 Mg 薄膜明显增多。基于此我们推测,厚度小于 2 nm 的 Mg 薄膜无法有效覆盖 ITO 表面,电子无法有效注入,使得器件的发光性能较差;而当 Mg 薄膜的厚度增大到 3 nm,由于 Mg 薄膜透射率降低以及岛状 Mg 薄膜的散射,使得器件发光亮度和效率逐步降低^[22]。

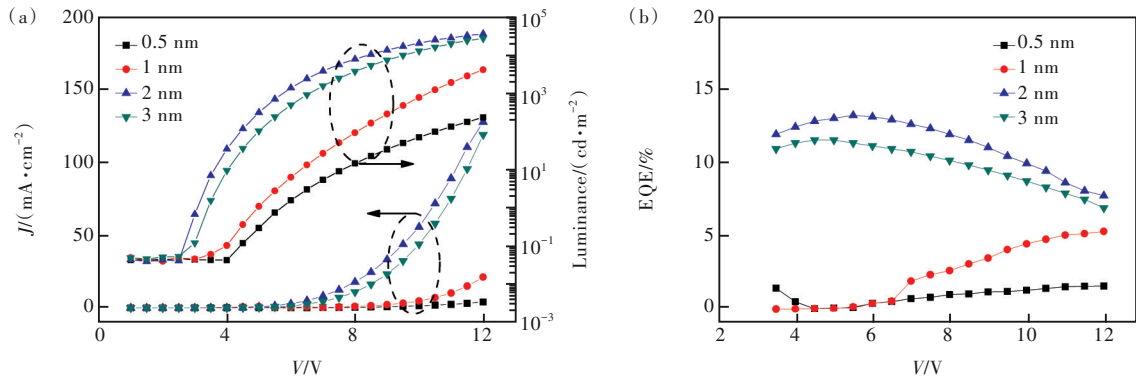


图 5 不同厚度 Mg EIL 的 IOLEDs 特性曲线。(a) J - L - V ; (b) EQE - V 。

Fig.5 Characteristic curves of IOLEDs with different thicknesses of Mg EIL. (a) J - L - V . (b) EQE - V .

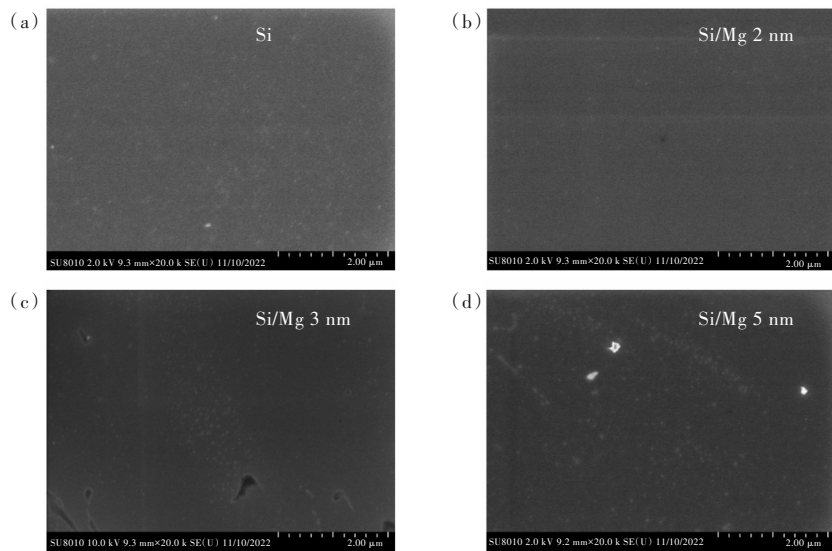


图 6 沉积在硅衬底上不同厚度 Mg 的 SEM 图像。(a) Si 衬底; (b) 2 nm Mg; (c) 3 nm Mg; (d) 5 nm Mg。

Fig.6 SEM images of different thicknesses of Mg films on Si substrates. (a) Si. (b) 2 nm Mg. (c) 3 nm Mg. (d) 5 nm Mg.

表 2 列举了近年来基于 $\text{Ir}(\text{ppy})_3$ 作为磷光掺杂剂 IOLEDs 的电子注入层结构及其发光性能参数。可见,文献中报道的基于 $\text{Ir}(\text{ppy})_3$ 的 IOLEDs 大多采用碱金属掺杂的 EIL 结构。本文制备的

Mg EIL IOLEDs 发光效率略低的主要原因在于依然存在较高的电子注入势垒 ($\sim 0.9 \text{ eV}$)。在后续研究中,可通过采用 Mg EIL 与碱金属掺杂相结合的结构来进一步提高 IOLEDs 的发光效率。

表 2 基于 $\text{Ir}(\text{ppy})_3$ 作为磷光掺杂剂的 IOLEDs 电子注入层结构及其性能参数

Tab. 2 EIL structures and performance parameters of IOLEDs based on $\text{Ir}(\text{ppy})_3$ as phosphor dopant

电子注入层结构	启亮电压/V	EQE/%	CE/($\text{cd}\cdot\text{A}^{-1}$)	参考文献
Mg	3.06	13.3	46.5	本工作
Cs_2CO_3	2.90	—	53.3	[23]
$\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{Li}_2\text{CO}_3:\text{TmPyPB}$	3.20	16.9	58.7	[24]
Bphen:Li	—	—	38.0	[25]
$\text{Rb}_2\text{CO}_3:\text{TPBi}$	4.00	17.1	—	[26]
$\text{Rb}_2\text{CO}_3:\text{Bphen}$	3.60	14.2	—	[26]
$\text{Rb}_2\text{CO}_3:\text{B3PYMPM}$	2.40	19.8	—	[26]
Bphen: Cs_2CO_3	3.40	20.1	68.7	[27]
$\text{ZnO}:\text{CsCO}_3$	—	—	45.2	[28]
$\text{ZnO/Bphen}:\text{Cs}_2\text{CO}_3$	3.40	14.3	52.5	[14]

4 结 论

本文制备并研究了基于超薄 Mg 电子注入层的 IOLEDs,结果表明超薄金属 Mg 薄膜具有良好的透射率,且作为电子注入层可有效改善 IOLEDs 的电子注入效率。基于 2 nm Mg EIL 的 IOLEDs 展示出最优的

发光性能,其启亮电压、最大电流效率和最大外量子效率分别为 3.06 V、46.5 cd/A 和 13.3%。

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.20220362>.

参 考 文 献:

- [1] CHU T Y, CHEN S Y, CHEN J F, *et al.* Ultrathin electron injection layer on indium-tin oxide bottom cathode for highly efficient inverted organic light-emitting diodes [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2006, 45(6R): 4948-4950.
- [2] FORTUNATO E, BARQUINHA P, MARTINS R. Oxide semiconductor thin-film transistors: a review of recent advances [J]. *Adv. Mater.*, 2012, 24(22): 2945-2986.
- [3] NOMURA K, KAMIYA T, HOSONO H. Ambipolar oxide thin-film transistor [J]. *Adv. Mater.*, 2011, 23(30): 3431-3434.
- [4] REINEKE S, LINDNER F, SCHWARTZ G, *et al.* White organic light-emitting diodes with fluorescent tube efficiency [J]. *Nature*, 2009, 459(7244): 234-238.
- [5] 吕方, 顾建男, 卞梦颖, 等. 有机发光二极管(OLED)顶发射器件的透明电极 [J]. *科学通报*, 2018, 63(12): 1111-1122.
LÜ F, GU J N, BIAN M Y, *et al.* Transparent electrode for top emission organic light-emitting diode [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2018, 63(12): 1111-1122. (in Chinese)
- [6] 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): 053503-1-3.
- [7] 姜慧慧, 肖静, 殷照洋, 等. 倒置有机发光二极管中电子注入的研究及发展 [J]. *科学通报*, 2021, 66(17): 2105-2116.
JIANG H H, XIAO J, YIN Z Y, *et al.* Progress and outlook on electron injection in inverted organic light-emitting diodes [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2021, 66(17): 2105-2116. (in Chinese)
- [8] 张睿, 李传南, 李涛, 等. 一种采用 Li₃N 掺杂电子注入层的底发射倒置结构 OLED 的制备 [J]. *光子学报*, 2011, 40(2): 199-203.
ZHANG R, LI C N, LI T, *et al.* Fabrication of inverted bottom organic light-emitting device with Li₃N n-type doping electron injecting layer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(2): 199-203. (in Chinese)
- [9] 张浩, 王立, 容佳玲, 等. 碳酸铯修饰 Al 作为反射阴极的倒置顶发射 OLED 器件 [J]. *发光学报*, 2012, 33(6): 611-615.
ZHANG H, WANG L, RONG J L, *et al.* Efficient inverted top-emitting organic light-emitting devices with cesium carbonate modified Al cathode [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2012, 33(6): 611-615. (in Chinese)
- [10] TANG X, DING L, SUN Y Q, *et al.* Inverted and large flexible organic light-emitting diodes with low operating voltage [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2015, 3(48): 12399-12402.
- [11] TAKADA M, FURUTA S, KOBAYASHI T, *et al.* Inverted organic light-emitting diodes with an electrochemically deposited zinc oxide electron injection layer [J]. *J. Appl. Phys.*, 2016, 120(18): 185501-1-6.
- [12] GUO K P, SI C F, HAN C, *et al.* High-performance flexible inverted organic light-emitting diodes by exploiting MoS₂ nanopillar arrays as electron-injecting and light-coupling layers [J]. *Nanoscale*, 2017, 9(38): 14602-14611.
- [13] FUKAGAWA H, SASAKI T, TSUZUKI T, *et al.* Long-lived flexible displays employing efficient and stable inverted organic light-emitting diodes [J]. *Adv. Mater.*, 2018, 30(28): 1706768-1-7.
- [14] CHEN Y H, CHU S Q, LI R Q, *et al.* Highly efficient inverted organic light-emitting devices adopting solution-processed double electron-injection layers [J]. *Org. Electron.*, 2019, 66: 1-6.
- [15] WANG J, ZHANG M K, ZHANG Y Q, *et al.* Efficient inverted organic light-emitting devices using a charge-generation unit as electron-injection layers [J]. *Org. Electron.*, 2021, 96: 106202-1-6.

- [16] LOU X, WANG X X, LIU C H, *et al.* Small-sized Al nanoparticles as electron injection hotspots in inverted organic light-emitting diodes [J]. *Org. Electron.*, 2016, 28: 88-93.
- [17] MICHAELSON H B. The work function of the elements and its periodicity [J]. *J. Appl. Phys.*, 1977, 48(11): 4729-4733.
- [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] CHU T Y, CHEN J F, CHEN S Y, *et al.* Comparative study of single and multiemissive layers in inverted white organic light-emitting devices [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89(11): 113502-1-3.
- [20] WANG X L, SHI C S, GUO Q X, *et al.* Highly efficient inverted organic light-emitting diodes using composite organic heterojunctions as electrode-independent injectors [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2016, 4(37): 8731-8737.
- [21] BULOVIĆ V, KHALFIN V B, GU G, *et al.* Weak microcavity effects in organic light-emitting devices [J]. *Phys. Rev. B*, 1998, 58(7): 3730-3740.
- [22] CHO H, JOO C W, CHOI S, *et al.* Highly conductive and transparent thin metal layer for reducing microcavity effect in top-emitting white organic light-emitting diode [J]. *Org. Electron.*, 2022, 106: 106537-1-7.
- [23] LEE J H, LEE S, KIM J B, *et al.* A high performance transparent inverted organic light emitting diode with 1, 4, 5, 8, 9, 11-hexaazatriphenylenehexacarbonitrile as an organic buffer layer [J]. *J. Mater. Chem.*, 2012, 22(30): 15262-15266.
- [24] CHANG C H, HSU M K, WU S W, *et al.* Using lithium carbonate-based electron injection structures in high-performance inverted organic light-emitting diodes [J]. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2015, 17(19): 13123-13128.
- [25] MEYER J, WINKLER T, HAMWI S, *et al.* Transparent inverted organic light-emitting diodes with a tungsten oxide buffer layer [J]. *Adv. Mater.*, 2008, 20(20): 3839-3843.
- [26] LEE J H, WANG P S, PARK H D, *et al.* A high performance inverted organic light emitting diode using an electron transporting material with low energy barrier for electron injection [J]. *Org. Electron.*, 2011, 12(11): 1763-1767.
- [27] YE H T H, 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] ZHOU T, LING Z T, TANG Z Y, *et al.* Efficient solution-processed inverted organic light-emitting diodes by using polyethyleneimine as interface layer [J]. *Phys. Status Solidi (A)*, 2018, 215(14): 1800138-1-6.



李轩(1997-),女,湖南长沙人,硕士研究生,2019年于湖南师范大学树达学院获得学士学位,主要从事有机光电子器件方面的研究。
E-mail: lx_lex@outlook.com



吕文理(1988-),男,甘肃会宁人,博士,2016年于兰州大学获得博士学位,主要从事有机光电子器件方面的研究。
E-mail: lvwl@cjlu.edu.cn