

文章编号: 1000-7032(2023)09-1644-06

## 基于超薄透明 $\text{Ag}_2\text{O}/\text{Ag}$ 阳极的高效有机电致发光器件

陈煌煌, 王琳嘉, 尹娟, 李国刚\*, 吴志军

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 提出了一种通过在玻璃衬底表面引入氧化银种子层的方法, 成功制备了具有良好表面、光学、电学特性的超薄透明导电  $\text{Ag}$  薄膜。首先, 在玻璃衬底上用热沉积的方法生长 1 nm  $\text{Ag}$  薄膜, 然后对该薄膜进行空气等离子体处理, 生成氧化银种子层, 该种子层可抑制  $\text{Ag}$  原子的随机迁移, 提高随后沉积  $\text{Ag}$  原子成核密度, 从而促进  $\text{Ag}$  原子快速成膜。以该超薄透明氧化银/银薄膜为阳极, 实现了一种高效磷光有机电致发光器件, 器件的最大电流效率、功率效率分别为  $60.4 \text{ cd}\cdot\text{A}^{-1}$  和  $63.2 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ , 是常规 ITO 器件的 1.45 倍和 1.60 倍。该研究结果表明, 以氧化银为种子层的超薄透明  $\text{Ag}$  薄膜是极具发展潜力的透明导电电极。

**关键词:** 氧化银; 空气等离子体; 透明阳极; 有机电致发光器件

中图分类号: TN383.1

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20230090

## Efficient Organic Light-emitting Devices Based on Ultrathin Transparent $\text{Ag}_2\text{O}/\text{Ag}$ Anodes

CHEN Huanghuang, WANG Linjia, YIN Juan, LI Guogang\*, WU Zhijun

(Fujian Provincial Key Laboratory of Light Propagation and Transformation, College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

\* Corresponding Author, E-mail: lgg@hqu.edu.cn

**Abstract:** This paper proposes a strategy to successfully realize ultra-thin transparent conductive  $\text{Ag}$  thin films with excellent surface, optical, and electrical properties by introducing a silver oxide seed layer onto the surface of a glass substrate. Firstly, a 1-nm-thick  $\text{Ag}$  film is evaporated onto a glass substrate by thermal deposition and then treated with oxygen plasma to generate a silver oxide seed layer. The seed layer can alleviate the random migration of  $\text{Ag}$  atoms and improve the nucleation density of the subsequently deposited  $\text{Ag}$  atoms, thus promoting the film formation of  $\text{Ag}$  atoms. An efficient phosphorescent organic light-emitting device was fabricated using the realized ultra-thin transparent silver oxide/silver film as an anode. The device's maximum current efficiency and power efficiency are  $60.4 \text{ cd}\cdot\text{A}^{-1}$  and  $63.2 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ , respectively, 1.45 and 1.60 times higher than those of the conventional ITO-based devices. The results show that the ultra-thin transparent  $\text{Ag}$  thin film with silver oxide as a seed layer is a highly promising transparent conductive electrode.

**Key words:**  $\text{Ag}_2\text{O}$ ; air plasma; transparent anode; organic light-emitting device(OLED)

### 1 引 言

氧化铟锡(ITO)作为一种透明导电薄膜, 因其具有低方块电阻及在可见光范围内透过率高的

独特优势, 一直被广泛用作有机电致发光器件(OLED)的透明电极<sup>[1]</sup>。然而, 铟是稀有金属, 这使得 ITO 的生产成本也随之提高, 同时, ITO 自身的脆性<sup>[2]</sup>和较差的机械稳定性限制了它在 OLED 中

收稿日期: 2023-04-12; 修订日期: 2023-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(12004121)

Supported by National Natural Science Foundation of China(12004121)

的进一步应用。因此,研究者开发了多种透明电极以取代ITO,如石墨烯、碳纳米管、导电聚合物和金属纳米线等。石墨烯薄膜虽兼具高导电性和高透光率<sup>[3]</sup>,但制备工艺极其复杂,难以大规模生产;碳纳米管之间存在很大的接触电阻,这使得它的导电性较差;导电聚合物<sup>[4]</sup>虽有成本低、制作简单等优势,但稳定性较差;金属纳米线<sup>[5]</sup>虽具有较高的导电性,并可实现柔性弯曲,但大多采用旋涂工艺制作,会出现导电均匀性不一的问题。超薄透明Ag薄膜(厚度小于10 nm)在可见光范围内具有较小的光损失,且可通过热沉积或溅射的简单方法制备<sup>[6]</sup>,这使得超薄透明Ag薄膜成为取代ITO的理想选择。然而,受限于岛状(Volmer-Weber)生长模式,超薄Ag薄膜通常形成离散的岛状纳米团簇,从而无法导电;此外,纳米团簇还会引起很强的表面等离子体激元(SPP)吸收,从而极大地降低超薄薄膜的透过率。因此,调控改变Ag薄膜生长模式,抑制岛状生长,对于实现超薄透明导电Ag薄膜至关重要。

近年来,超薄透明导电Ag薄膜的研发取得了一系列进展<sup>[7]</sup>,研究者在衬底表面引入种子层有效抑制了Ag的岛状生长,促进了Ag的快速成膜。Liu等<sup>[8]</sup>在玻璃衬底引入Ge种子层,实现了10 nm的透明导电Ag薄膜,该超薄透明Ag薄膜的方块电阻( $R_{\square}$ )、RMS粗糙度分别为15.1  $\Omega/\square$ 、0.768 nm,可见光范围内的平均透过率接近60%;常见的种子层还包括Al、Cu、Sn<sup>[9]</sup>等,与Ag相比这些种子层的透过率较低,因而在超薄Ag薄膜中引起比较大的光损耗;在玻璃衬底引入黏合层,如MoO<sub>3</sub>、ZnS、ZnO、PAI、PEI等也是促进超薄Ag薄膜生长<sup>[10]</sup>的有效手段,然而,黏合层厚度需要精确控制且其制备过程也较为复杂,增加了工艺难度;此外,在Ag薄膜中掺入少量的Al、Cu也被证实有助于实现超薄透明导电Ag薄膜<sup>[11-12]</sup>。

在本研究中,我们提出了一种简单有效的方法,成功地制备了兼具良好导电性和透过率的超薄透明银薄膜。首先采用热沉积的方式得到1 nm厚的Ag,再对其进行空气等离子体(Air plasma)处理,得到Ag<sub>2</sub>O种子层,该种子层有效抑制了Ag原子的随机迁移,提高随后沉积Ag原子成核密度,从而促进了Ag原子快速成膜。Yun等<sup>[13]</sup>在氧气环境下溅射银靶制备了半氧化的Ag<sub>2</sub>O种子层,该方法的有效性对部分氧化膜的厚度以及反

应溅射中氧气和氩气的入口流量比极为敏感,与优化条件稍有偏差,就会导致超薄Ag膜电导率显著下降,使制造过程复杂化。与已报道的方法比较,我们引入Ag<sub>2</sub>O种子层的工艺简单有效且通用性高。制备得到的Ag<sub>2</sub>O(1 nm)/Ag(9 nm)薄膜的 $R_{\square}$ 、RMS粗糙度分别为24.2  $\Omega/\square$ 、0.405 nm,可见光范围内的平均透过率为60.8%;基于Ag<sub>2</sub>O(1 nm)/Ag(9 nm)阳极,研制了高性能磷光OLED,其电流效率、功率效率分别是相同结构ITO器件的1.45倍和1.60倍。

## 2 实 验

在60 °C的条件下,将玻璃基片浸入5%浓度的Decon 90溶液与去离子水中,各超声清洗5 min,再放入2%浓度的WIN-188溶液中超声清洗10 min,最后放入无水乙醇中超声10 min。清洗完成后,用纯氮气吹干基片,在120 °C的烘箱中烘干30 min,并在氧等离子体气体中放置10 min,消除基质上的所有污染物。将清洗后的玻璃基板放入真空室,在约 $3.0 \times 10^{-5}$  Pa的高真空条件下,在基板上热沉积1 nm的Ag;然后玻璃基板放入等离子体清洗机腔内,进行1 min的Air plasma处理,生成Ag<sub>2</sub>O种子层。随后,立即将玻璃基板放回真空室,热沉积生长9 nm厚的Ag薄膜,1 nm Ag和9 nm Ag的生长速度分别为0.01 nm/s和0.033 nm/s。使用振荡石英晶体传感器原位实时监测银薄膜的沉积速率和厚度,并使用表面分析仪(KLA-Tencor P7)对银薄膜的厚度进行了校准;使用扫描电镜显微镜(SEM, Zeiss supra55)、原子力显微镜(AFM, Oxford-instruments Cypher S)获得超薄透明Ag薄膜的表面特性;Ag 3d与N 1s电子状态由X射线光电子能谱技术(XPS Thermo scientific K-alpha<sup>+</sup>)测量获得;功函数由紫外光电子能谱(UPS Kratos Axis Supera)测量;方块电阻及透射率曲线分别由四探针电阻分析仪(Four Probe Tech, ltd)、UV/VIS/NIR光谱仪(PerkinElmer Lambda750)测得。

器件制备在真空度低于 $3.0 \times 10^{-5}$  Pa的超高真空环境下进行。器件的电流密度、电压、亮度由Keithley 2400程控电源及LS-110亮度计组成的测试系统进行测量,电致发光光谱由PR655光谱仪和Keithley 2450程控电源组成的系统测量。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 XPS 光谱分析

图 1(a)、(b)分别是未经 Air plasma 处理的 1 nm Ag 薄膜与经 Air plasma 处理的 1 nm Ag 薄膜的 Ag 3d XPS 谱。图 1(a)显示,未经处理的 Ag 原子,其核外 3d 电子结合能分别为 368.2 eV ( $3d_{5/2}$ )和 374.2 eV ( $3d_{3/2}$ ),这对应于单质 Ag 原子分离良好的自旋轨道分量<sup>[14]</sup>;此外,在图 1(a)中可观察到单质 Ag 原子 3d 电子具有的典型损耗特征。而经过 Air plasma 处理后,Ag 原子核外 3d 电子结合能分别下降为 367.6 eV ( $3d_{5/2}$ )和 373.8 eV ( $3d_{3/2}$ ),与  $Ag_2O$  中 Ag 原子核外 3d 电子结合能相对应<sup>[15]</sup>。值得注意的是,经过 Air plasma 处理后,单质 Ag 原子核外 3d 电子具有的典型损耗特征消失。以上研究结果表明,经过 Air plasma 处理后,单质 Ag 被氧化成了  $Ag_2O$ 。

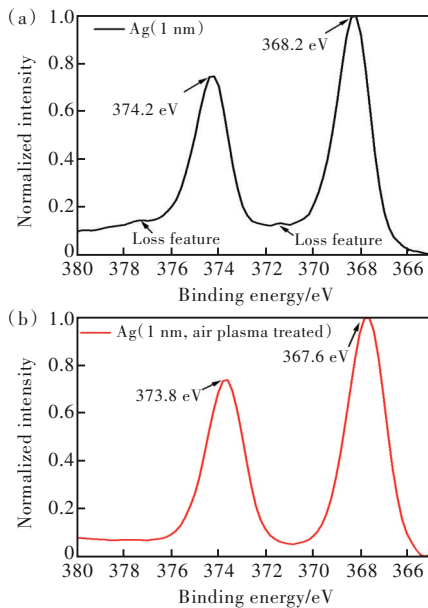


图 1 (a) Ag(1 nm) 的 Ag 3d XPS 谱; (b) 经 Air plasma 处理 Ag(1 nm) 的 Ag 3d XPS 谱。

Fig.1 (a) Ag 3d state XPS from Ag(1 nm). (b) Ag 3d state XPS from the Air plasma treated Ag(1 nm).

#### 3.2 SEM 与 AFM 图像分析

图 2(a)、(b)分别为  $Ag_2O(1\text{ nm})/Ag(9\text{ nm})$  薄膜与 Ag(10 nm) 薄膜的 SEM 俯视图。测量结果表明,  $Ag_2O(1\text{ nm})/Ag(9\text{ nm})$  已形成了连续均匀平整的薄膜,  $Ag_2O(1\text{ nm})/Ag(9\text{ nm})$  与 Ag(10 nm) 的表面覆盖率分别为 86.7% 和 64.2%; 通过四探针设备测得该薄膜的方块电阻为  $24.2\ \Omega/\square$ 。以上结果表明该薄膜具有优异的导电性, 可有效传输载流子; 相比之下, 10 nm 的 Ag 薄膜, 形成了许多离

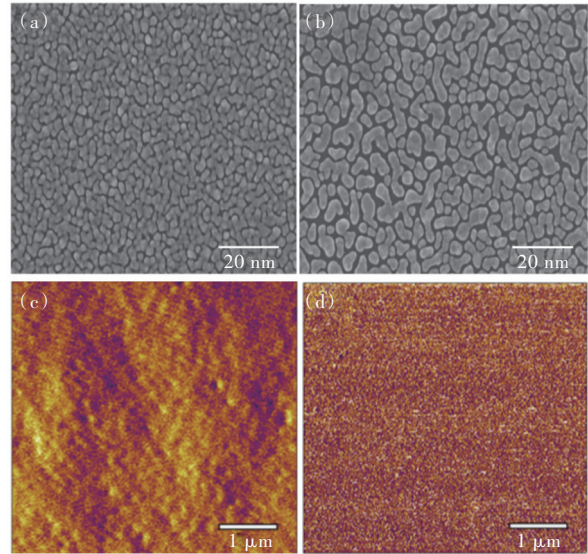


图 2 (a)  $Ag_2O(1\text{ nm})/Ag(9\text{ nm})$  SEM 俯视图; (b) Ag(10 nm) SEM 俯视图; (c)  $Ag_2O(1\text{ nm})/Ag(9\text{ nm})$  AFM 图; (d) Ag(10 nm) AFM 图。

Fig.2 (a) Top-view SEM images for  $Ag_2O(1\text{ nm})/Ag(9\text{ nm})$ . (b) Top-view SEM images for Ag(10 nm). (c) AFM image for  $Ag_2O(1\text{ nm})/Ag(9\text{ nm})$ . (d) AFM image for Ag(10 nm).

散、不连续的岛状团簇, 这说明该薄膜不具备导电性。图 2(c)、(d)为  $Ag_2O(1\text{ nm})/Ag(9\text{ nm})$  和 Ag(10 nm) 的 AFM 图像。如图 2(c) 所示,  $Ag_2O(1\text{ nm})/Ag(9\text{ nm})$  的 RMS(均方根) 表面粗糙度仅为 0.521 nm, 这说明该薄膜具有光滑平整的表面形态; 而如图 2(d) 所示, 10 nm Ag 薄膜 RMS 粗糙度高达 2.177 nm, 表明该薄膜表面呈不连续离散状态。SEM 和 AFM 的测量结果表明,  $Ag_2O$  种子层可有效促进 Ag 原子的成膜过程。

#### 3.3 透光率分析

图 3 为  $Ag_2O(1\text{ nm})/Ag(9\text{ nm})$ 、Ag(10 nm) 及 ITO 的透光率曲线。从图 3 可以看出,  $Ag_2O(1\text{ nm})/Ag(9\text{ nm})$  薄膜的透光率高于 Ag(10 nm) 薄膜, 二

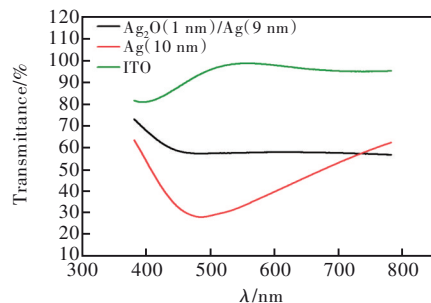


图 3  $Ag_2O(1\text{ nm})/Ag(9\text{ nm})$ 、Ag(10 nm) 及 ITO 透光率。  
Fig.3 The transmittance of  $Ag_2O(1\text{ nm})/Ag(9\text{ nm})$ , Ag(10 nm) and ITO.



者的平均透光率分别为 60.8% 和 43.5%, 且  $\text{Ag}_2\text{O}$  (1 nm)/ $\text{Ag}$  (9 nm) 的透光率曲线更平滑, 色散特性更为优越。此外, 如图 3 所示, 由于 10 nm Ag 形成了离散的纳米团簇, 这引起了很强的表面等离子体极化激元 (Surface plasmon polaritons, SPP) 吸收<sup>[16]</sup>。  $\text{Ag}_2\text{O}$  (1 nm)/ $\text{Ag}$  (9 nm) 与 ITO 透过率与方块电阻的比值分别为 0.025 和 0.07,  $\text{Ag}_2\text{O}$  (1 nm)/ $\text{Ag}$  (9 nm) 透过率与方块电阻比值较低, 主要是由于它需要在透过率与电导率之间取一个折中。

以上薄膜的表面、电学及光学研究结果表明,  $\text{Ag}_2\text{O}$  种子层有助于制备超薄透明导电 Ag 薄膜, 这是由于该种子层可以有效抑制 Ag 原子在衬底表面的随机迁移, 提高 Ag 原子成核密度, 使得 Ag 薄膜生长由岛状模式向层状模式转化。

#### 4 器件制备及其性能分析

为了比较, 我们分别制备了以  $\text{Ag}_2\text{O}$  (1 nm)/ $\text{Ag}$  (9 nm) 和 ITO 为阳极的器件, 其结构为阳极/HAT-CN (5 nm)/TAPC (50 nm)/TCTA (5 nm)/TCTA: PO-01 (8%, 15 nm)/BPhen (55 nm)/LiQ (1 nm)/Al。其中, 阳极分别为  $\text{Ag}_2\text{O}$  (1 nm)/ $\text{Ag}$  (9 nm) 和 ITO; HAT-CN、TAPC 和 TCTA 分别代表 1,4,5,8,9,11-Hexaaza-triphenylene-hexacarbonitrile, 1,1-bis-(4-bis(4-methylphenyl)-aminophenyl)-Cyclohexane 和 4,4,4-tris (N-carbazolyl) triphenylamine; PO-01 和 BPhen 分别为 Iridium (III) bis(4-(4-tert-butylphenyl) thieno [3,2-c] pyridinato-N,C2") acetylacetonate 和 4,4,4-Tris (N-carbazolyl) triphenylamine。

图 4(a) 给出了器件的  $V$ - $L$ 、 $V$ - $J$  曲线, 由图中可以看出, 在相同电压下,  $\text{Ag}_2\text{O}$  (1 nm)/ $\text{Ag}$  (9 nm) 器件的亮度与电流密度均显著高于 ITO 器件。图 4(b) 分别为  $\text{Ag}_2\text{O}$  (1 nm)/ $\text{Ag}$  (9 nm) 和 ITO 的紫外光电子能谱, 从图中可得  $\text{Ag}_2\text{O}$  (1 nm)/ $\text{Ag}$  (9 nm) 和 ITO 的二次电子截止边分别为 16.68 eV 和 16.72 eV。因此, 由 He I 紫外光源光子能量  $h\nu=21.22$  eV<sup>[17]</sup> 计算可得 ITO 和  $\text{Ag}_2\text{O}$  (1 nm)/ $\text{Ag}$  (9 nm) 的功函数分别为 4.54 eV 和 4.50 eV, 二者几乎没有差别; 通过方块电阻计算得到,  $\text{Ag}_2\text{O}$  (1 nm)/ $\text{Ag}$  (9 nm) 的电导率为  $4.13 \times 10^6$  S/m, ITO ( $R_{\square}=12 \Omega/\square$ ) 的电导率为  $6.41 \times 10^5$  S/m。图 4(c) 分别为 ITO/HAT-CN (5 nm)、 $\text{Ag}_2\text{O}$  (1 nm)/ $\text{Ag}$  (9 nm)/HAT-CN (5 nm) 的 N 1s XPS 谱, 由图可知, HAT-CN 与 Ag 接触后, N 1s 电子结合能由 399.68 eV 移动到 400.28 eV。结合能的移动表明 Ag 与 HAT-CN 中

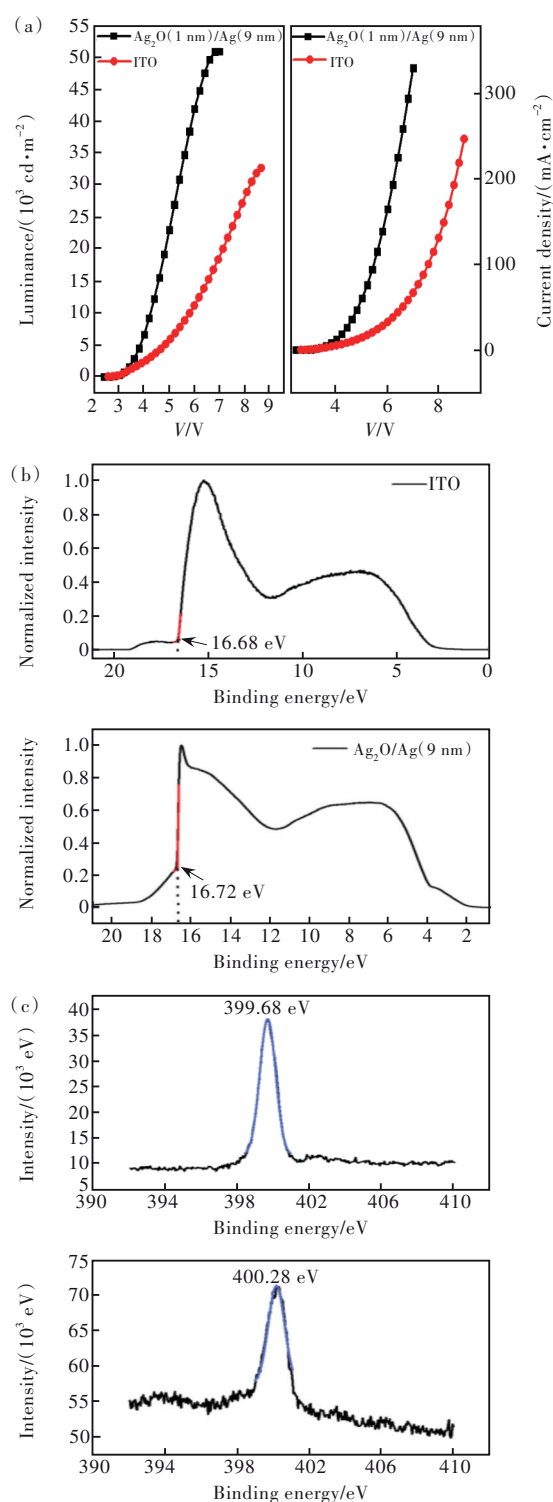


图 4 (a)  $\text{Ag}_2\text{O}$  (1 nm)/ $\text{Ag}$  (9 nm) 器件与 ITO 器件的  $L$ - $V$ - $J$  特性; (b) ITO 与  $\text{Ag}_2\text{O}$  (1 nm)/ $\text{Ag}$  (9 nm) 的 UPS 光谱; (c) ITO/HAT-CN (5 nm) 与  $\text{Ag}_2\text{O}$  (1 nm)/ $\text{Ag}$  (9 nm)/HAT-CN (5 nm) 的 N 1s XPS 谱。

Fig.4 (a) Current density-voltage-luminance characteristics of the  $\text{Ag}_2\text{O}$  (1 nm)/ $\text{Ag}$  (9 nm)-based and ITO-based devices. (b) UPS spectra for ITO and  $\text{Ag}_2\text{O}$  (1 nm)/ $\text{Ag}$  (9 nm). (c) N 1s state XPS from HAT-CN (5 nm) on ITO and on  $\text{Ag}_2\text{O}$  (1 nm)/ $\text{Ag}$  (9 nm).

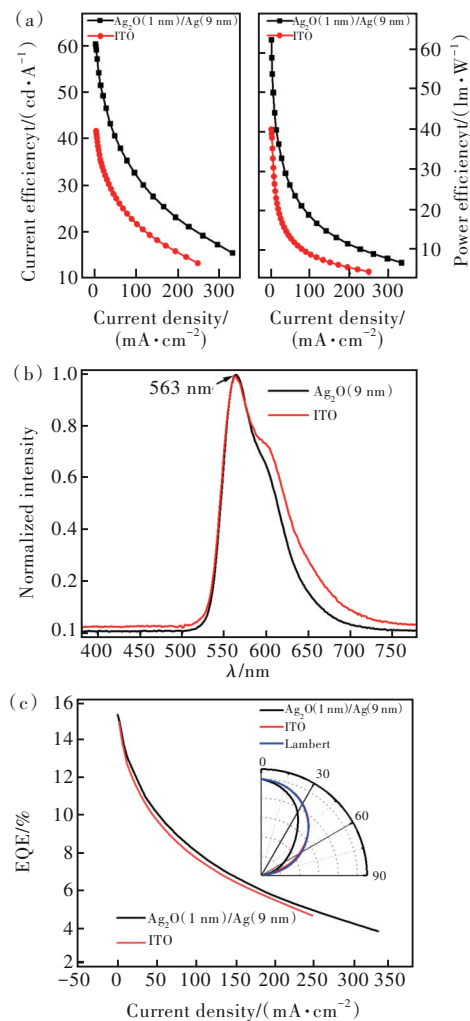


图 5 (a)  $\text{Ag}_2\text{O}(1\text{ nm})/\text{Ag}(9\text{ nm})$  器件与 ITO 器件的 CE- $J$ -PE 特性; (b)  $\text{Ag}_2\text{O}(1\text{ nm})/\text{Ag}(9\text{ nm})$  器件与 ITO 器件的光谱; (c)  $\text{Ag}_2\text{O}(1\text{ nm})/\text{Ag}(9\text{ nm})$  器件与 ITO 器件的 EQE- $J$  特性 (插图: 器件光强-角度分布曲线)。

Fig.5 (a) Current efficiency-current density-power efficiency properties of the  $\text{Ag}_2\text{O}(1\text{ nm})/\text{Ag}(9\text{ nm})$ -based and ITO-based devices. (b) Spectra of the  $\text{Ag}_2\text{O}(1\text{ nm})/\text{Ag}(9\text{ nm})$ -based and ITO-based devices. (c) External quantum efficiency-current density of the  $\text{Ag}_2\text{O}(1\text{ nm})/\text{Ag}(9\text{ nm})$ -based and ITO-based devices (Inset: angle-dependence properties of luminous intensity for the  $\text{Ag}_2\text{O}(1\text{ nm})/\text{Ag}(9\text{ nm})$ -based and ITO-based devices).

的 N 元素发生了配位反应, Ag 与 N 之间的电子转移使得 HAT-CN 的 LUMO 能级朝 Ag 的功函数弯曲, 降低了空穴注入势垒, 极大地提高了从 Ag 向

HAT-CN 的空穴注入效率。综上, 更高的电导率及更高效的空穴注入效率使得  $\text{Ag}_2\text{O}(1\text{ nm})/\text{Ag}(9\text{ nm})$  器件具有更高的电流密度。

图 5(a) 给出了  $J$ -CE、 $J$ -PE 曲线。可以看出, 在相同电流密度下,  $\text{Ag}_2\text{O}(1\text{ nm})/\text{Ag}(9\text{ nm})$  器件的 CE 和 PE 相比 ITO 器件均有提高, 器件最大电流效率、功率效率分别为  $60.4\text{ cd}\cdot\text{A}^{-1}$ 、 $63.2\text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ , 是相同结构 ITO 器件的 1.45 倍和 1.60 倍。效率的提升优于文献[8]报道的结果, 这是由于 1 nm  $\text{Ag}_2\text{O}$  种子层有效避免了由 Ge 引起的光吸收。电流效率与功率效率显著提高是因为  $\text{Ag}_2\text{O}(1\text{ nm})/\text{Ag}(9\text{ nm})$  中存在的微腔效应<sup>[18]</sup>。图 5(b) 是  $\text{Ag}_2\text{O}(1\text{ nm})/\text{Ag}(9\text{ nm})$  和 ITO 器件的光谱, 相较于 ITO 器件,  $\text{Ag}_2\text{O}(1\text{ nm})/\text{Ag}(9\text{ nm})$  器件光谱更窄, 这证明了  $\text{Ag}_2\text{O}(1\text{ nm})/\text{Ag}(9\text{ nm})$  器件中存在微腔效应。图 5(c) 为  $J$ -EQE 曲线。EQE 计算需要考虑器件的光强分布模式 (见图 5(c) 插图), 由图知, ITO 器件的光强分布接近理想朗伯特体分布, 而  $\text{Ag}_2\text{O}(1\text{ nm})/\text{Ag}(9\text{ nm})$  器件的光强分布明显偏离朗伯特分布。由图 5(c) 可看出,  $\text{Ag}_2\text{O}(1\text{ nm})/\text{Ag}(9\text{ nm})$  与 ITO 器件的 EQE 差别很小, 这是由于微腔只改变光子在各个角度的分布, 提高了正面出射光子的比例, 并没有极大地提高光子取出效率。

## 5 结 论

本文通过在玻璃衬底表面引入氧化银种子层, 成功制备了超薄透明导电  $\text{Ag}_2\text{O}(1\text{ nm})/\text{Ag}(9\text{ nm})$  薄膜, 该薄膜方块电阻为  $24\ \Omega/\square$ , 电导率为  $4.13\times 10^6\text{ S/m}$ , RMS 粗糙度为  $0.521\text{ nm}$ , 可见光范围内平均透光率为  $60.8\%$ , 功函数为  $4.50\text{ eV}$ , 表现出优异的光学与电学性质。同时制备了基于  $\text{Ag}_2\text{O}(1\text{ nm})/\text{Ag}(9\text{ nm})$  阳极的磷光 OLED, 器件最大电流效率、功率效率分别为  $60.4\text{ cd}\cdot\text{A}^{-1}$ 、 $63.2\text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ , 是相同结构 ITO 器件的 1.45 倍和 1.60 倍。本文研究结果为制备超薄透明导电 Ag 阳极提供了一种高效简洁的方法。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址: <http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230090>。

## 参 考 文 献:

- [1] 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)
- [ 2 ] 刘萍, 李宇, 韦闯闯, 等. 界面调控对柔性量子点电致发光器件性能的影响 [J]. 发光学报, 2023, 44(4): 641-656.  
LIU P, LI Y, WEI C C, *et al.* Effects of interface regulation on performances of flexible quantum dot electroluminescent devices [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(4): 641-656. (in Chinese)
- [ 3 ] 吴晓晓, 李福山, 吴薇, 等. 基于石墨烯/PEDOT:PSS叠层薄膜的柔性OLED器件 [J]. 发光学报, 2014, 35(4): 486-490.  
WU X X, LI F S, WU W, *et al.* Flexible organic light emitting diodes based on double-layered graphene/PEDOT:PSS conductive film [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2014, 35(4): 486-490. (in Chinese)
- [ 4 ] TIAN Y, WANG T, ZHU Q X, *et al.* High-performance transparent PEDOT:PSS/CNT films for OLEDs [J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(8): 2067.
- [ 5 ] 杨楨林, 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)
- [ 6 ] BI Y G, LIU Y F, ZHANG X L, *et al.* Ultrathin metal films as the transparent electrode in ITO-free organic optoelectronic devices [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2019, 7(6): 1800778-1-23.
- [ 7 ] SCHUBERT S, MEISS J, MÜLLER-MESKAMP L, *et al.* Improvement of transparent metal top electrodes for organic solar cells by introducing a high surface energy seed layer [J]. *Adv. Energy Mater.*, 2013, 3(4): 438-443.
- [ 8 ] LIU S H, LIU W B, YU J, *et al.* Silver/germanium/silver: an effective transparent electrode for flexible organic light-emitting devices [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2014, 2(5): 835-840.
- [ 9 ] 许君君, 黄金华, 盛伟, 等. 超薄金属透明导电膜及其应用研究进展 [J]. 材料导报, 2019, 33(11): 1875-1881.  
XU J J, HUANG J H, SHENG W, *et al.* Research progress on ultrathin metal transparent conductive films and their applications [J]. *Mater. Rep.*, 2019, 33(11): 1875-1881. (in Chinese)
- [ 10 ] HAN Y C, LIM M S, PARK J H, *et al.* ITO-free flexible organic light-emitting diode using ZnS/Ag/MoO<sub>3</sub> anode incorporating a quasi-perfect Ag thin film [J]. *Org. Electron.*, 2013, 14(12): 3437-3443.
- [ 11 ] ZHANG C, ZHAO D W, GU D E, *et al.* An ultrathin, smooth, and low-loss Al-doped Ag film and its application as a transparent electrode in organic photovoltaics [J]. *Adv. Mater.*, 2014, 26(32): 5696-5701.
- [ 12 ] HUANG J H, LIU X H, LU Y H, *et al.* Seed-layer-free growth of ultra-thin Ag transparent conductive films imparts flexibility to polymer solar cells [J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2018, 184: 73-81.
- [ 13 ] ZHAO G Q, SHEN W F, JEONG E, *et al.* Ultrathin silver film electrodes with ultralow optical and electrical losses for flexible organic photovoltaics [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, 10(32): 27510-27520.
- [ 14 ] ANTHONY M T, SEAH M P. XPS: energy calibration of electron spectrometers. I: an absolute, traceable energy calibration and the provision of atomic reference line energies [J]. *Surf. Interface Anal.*, 1984, 6(3): 95-106.
- [ 15 ] TJENG L H, MEINDERS M B J, VAN ELP J, *et al.* Electronic structure of Ag<sub>2</sub>O [J]. *Phys. Rev. B*, 1990, 41(5): 3190-3199.
- [ 16 ] 曹修东, 张会红, 田野, 等. 基于表面等离子体共振效应的荧光太阳集光器制备及其性能 [J]. 发光学报, 2022, 43(3): 396-403.  
CAO X D, ZHANG H H, TIAN Y, *et al.* Preparation and performance of luminescent solar concentrator based on surface plasmon resonance effect [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(3): 396-403. (in Chinese)
- [ 17 ] SALANECK W R. Classical ultraviolet photoelectron spectroscopy of polymers [J]. *J. Electron. Spectrosc. Relat. Phenom.*, 2009, 174(1-3): 3-9.
- [ 18 ] 于荣梅, 濮春英, 殷复荣, 等. 超低效率滚降顶发射白光有机电致发光器件 [J]. 发光学报, 2022, 43(1): 77-84.  
YU R M, PU C Y, YIN F R, *et al.* Ultra-low efficiency roll-off top-emitting white organic light-emitting diodes [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(1): 77-84. (in Chinese)



陈煌煌(1998-),男,福建福州人,硕士研究生,2020年于江西科技师范大学获得学士学位,主要从事有机电致发光器件的研究。

E-mail: chenhuanghuang244@163.com



李国刚(1973-),男,福建邵武人,博士,副教授,2013年于厦门大学获得博士学位,主要从事有机电致发光器件的研究。

E-mail: lgg@hqu.edu.cn