

## 热塑性聚氨酯衬底表面改性及其在柔性 OLED 中的应用研究

李欣奕<sup>1</sup>, 吴丽双<sup>2</sup>, 杨惠山<sup>2</sup>, 张乐天<sup>1</sup>, 谢文法<sup>1</sup>, 刘士浩<sup>1\*</sup>

(1. 集成光电子学国家重点联合实验室 吉林大学实验区, 吉林大学电子科学与工程学院, 吉林 长春 130012;

2. 物理与信息工程学院, 泉州师范学院, 福建 泉州 362000)

**摘要:** 柔性 OLED 的发展依赖高性能柔性衬底的支持。热塑性聚氨酯(TPU)是一种兼具柔韧性和高强度的高分子材料,因其软链段与硬链段交替排列的结构,展现出应用于柔性 OLED 衬底的潜力。然而,商用 TPU 表面常存在微观不平整,这对高精度柔性 OLED 的制造造成不利影响,可能导致光学和电性能下降。为解决这一问题,本研究通过溶液加工在 TPU 表面沉积聚(3,4-乙二噻吩)-聚苯乙烯磺酸盐(PEDOT:PSS)涂层以改善表面质量。结果显示, PEDOT:PSS 涂层将 TPU 表面粗糙度从 7.05 nm 显著降低至 2.19 nm,提高了后续功能涂层(如发光层和电极层)的沉积均匀性。基于修饰后的 TPU 衬底,成功制备顶发射和底发射柔性 OLED,最高外量子效率分别达 16.0% 和 15.2%,并表现出优异的柔性显示性能。本研究为 TPU 在柔性 OLED 及其他柔性电子器件中的应用提供了新思路和支持,具有重要前景。

**关键词:** 有机电致发光器件; 柔性衬底; 热塑性聚氨酯; 表面修饰

中图分类号: O482.31 文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20240352 CSTR: 32170.14.CJL.20240352

## Study on Surface Modification of Thermoplastic Polyurethane Substrate and Its Application in Flexible OLEDs

LI Xinyi<sup>1</sup>, WU Lishuang<sup>2</sup>, YANG Huishan<sup>2</sup>, ZHANG Letian<sup>1</sup>, XIE Wenfa<sup>1</sup>, LIU Shihao<sup>1\*</sup>

(1. State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Jilin University Region, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China;

2. College of Physics and Information Engineering, Quanzhou Normal University, Quanzhou, 362000, China)

\* Corresponding Author, E-mail: liushihao@jlu.edu.cn

**Abstract:** The development of flexible OLEDs relies on high-performance flexible substrates. Thermoplastic polyurethane (TPU), a polymer material with alternating soft and hard segments in its molecular chains, combines flexibility with high strength, making it a promising candidate for flexible OLED substrates. However, commercial TPU surfaces often exhibit microscopic irregularities, such as waviness or roughness, which adversely affect the fabrication of high-precision flexible OLEDs, potentially leading to reduced optical and electrical performance. To address this issue, this study employs solution processing to deposit a poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-polystyrene sulfonate (PEDOT:PSS) coating on the TPU surface to improve surface quality. Results show that the PEDOT:PSS coating significantly reduced the surface roughness of TPU from 7.05 nm to 2.19 nm, enhancing the uniformity of subsequent functional layers (e.g., emitting layers and electrodes). Using the modified TPU substrate, top-emitting and bottom-emitting flexible OLEDs were successfully fabricated, achieving maximum external quantum efficiencies

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金(62374071, 62475097); 吉林省科技厅自然科学基金(YDZJ202401319ZYTS); 福建省自然科学基金项目资助(2022J011104, 2021J01971)

Supported by National Natural Science Foundation of China (62374071, 62475097); Science and Technology Development Planning of Jilin Province (YDZJ202401319ZYTS); Natural Science Foundation of Fujian Province (2022J011104, 2021J01971)

of 16.0% and 15.2%, respectively, while demonstrating excellent flexibility. This study provides new insights and theoretical support for the application of TPU in flexible OLEDs and other flexible electronic devices, offering significant potential for future advancements.

**Key words:** organic light-emitting device; flexible substrate; thermoplastic urethanes; surface modification

## 1 引 言

有机发光二极管(Organic light-emitting diode, OLED)因其对比度高、视角广、响应速度快、能耗低等优点,近年来在智能手机、平板电脑、电视、可穿戴设备等领域得到广泛应用,逐渐成为下一代显示技术的重要代表<sup>[1-4]</sup>。然而,随着智能设备不断向轻薄、可穿戴方向发展,传统刚性 OLED 在柔性应用中的局限性日益凸显,难以满足未来智能设备对显示技术的更高要求。为了应对这一挑战,柔性 OLED 以其可弯曲、可折叠的独特优势吸引了科研和产业界的关注,特别是在可穿戴设备、柔性显示、电子皮肤等前沿领域<sup>[5-7]</sup>,柔性 OLED 不仅展现出广阔的应用前景,更被视为推动未来显示技术革新的关键。

柔性衬底是柔性 OLED 的重要组成部分,衬底的选择对 OLED 的机械性能、光学性能和长期可靠性至关重要<sup>[8-9]</sup>。目前,市场上常见的柔性衬底包括性能稳定并已商业化的 PI (Polyimide) 衬底、适合大规模生产且成本较低的 PET (Polyethylene terephthalate) 衬底,以及兼具机械强度和热稳定性的 PEN (Polyethylene naphthalate) 衬底<sup>[10-12]</sup>。此外,一些具有创新功能的新型柔性衬底也在不断涌现,如环保、低成本的纸基衬底<sup>[13]</sup>、具有高透明度和柔韧性的石墨烯复合衬底<sup>[14]</sup>,以及具有生物物质特性的丝素蛋白衬底<sup>[15]</sup>。这些新型柔性衬底的开发,不仅为柔性衬底的研究带来了新的视角,也为提升柔性 OLED 的性能和拓展其应用领域提供了更多可能。

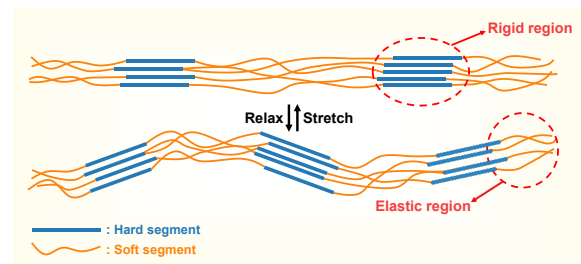


图1 TPU的分子链结构。

Fig. 1 Molecular chain structure of TPU.

热塑性聚氨酯(Thermoplastic polyurethane, TPU)是一种常见的高分子材料,其分子链由交替的软链段和硬链段组成,如图1所示。软链段通常是聚酯或聚醚多元醇,使TPU具有出色的柔韧性、可塑性和弹性;而硬链段则是二异氰酸酯,使材料具有较高的机械强度和热稳定性<sup>[16]</sup>。这种软硬结合的分子结构使得TPU兼具优异的柔韧性、高强度和出色的耐候性,可以在复杂的环境中长期使用。因此,热塑性聚氨酯被广泛应用于汽车、鞋类、电子设备、医疗器械等领域,成为许多工业和消费品的关键材料<sup>[17-18]</sup>。同时,随着柔性电子技术的发展,TPU在可穿戴设备和OLED等领域也显示出巨大的应用潜力<sup>[19-20]</sup>。

目前,将TPU应用于柔性OLED的相关研究仍较为有限。2022年,香港理工大学的Lu等人采用全溶液法成功制备了一种基于TPU衬底的可弯折OLED<sup>[21]</sup>。该研究中,TPU首先溶解于二甲基甲酰胺(DMF)中,随后通过旋涂工艺将溶液涂覆在预先沉积有银纳米线(AgNWs)电极的玻璃衬底上。经过退火处理后,TPU衬底从玻璃衬底上剥离,从而得到具有电极结构的TPU衬底。然而,该全溶液加工工艺较为复杂,对电极材料的质量和稳定性要求较高,从而限制了其可重复性和普适性。

本研究旨在利用现有商用TPU与OLED相结合,实现基于TPU的柔性OLED显示效果。研究首先发现了原始TPU衬底与OLED不兼容的问题,并通过引入聚(3,4-乙氧噻吩)-聚苯乙烯磺酸盐(PEDOT:PSS)涂层对TPU衬底进行了表面改性,从而改善其表面特性。随后,在修饰后的TPU衬底上单独制备电极,并通过一系列测试验证了其作为柔性衬底的可行性。在此基础上,分别在改性后的TPU衬底上制备了顶发射型和底发射型OLED,并将其性能与玻璃基OLED进行了对比分析。研究结果初步验证了基于TPU衬底的柔性显示性能,并成功展示了TPU作为柔性OLED衬底的应用潜力。

## 2 实验

### 2.1 器件制备

在本实验中,各有机功能层及电极均通过真空蒸镀方式制备。OLED 的衬底采用光学玻璃和厚度为 0.8 mm 的 TPU 薄膜,该厚度兼具良好的宏观平整度和韧性。首先使用迪康 90 清洁液和去离子水进行超声清洗,并在烘干箱中干燥,随后将其置于真空度低于  $6 \times 10^{-4}$  Pa 的多源有机分子气相沉积系统中。利用石英晶体膜厚监测仪实时监控各层薄膜的蒸镀速率和厚度。金属及有机薄膜以约 0.1~0.2 nm/s 的速率依次沉积于衬底上。阳极与阴极由相应的掩模板定形,最终形成 4 个发光面积为  $10 \text{ mm}^2$  的发光器件。

### 2.2 器件表征

器件的亮度-电流-电压特性及电致发光光谱数据由吉时利-2400、柯尼卡美能达 LS-110 亮度计和 Maya Pro2000 光纤光谱仪构建的 OLED 器件光电性能测试系统,在室温常规大气条件下进行测量。利用布鲁克公司的轻敲式原子力显微镜 Dimension Icon 对 TPU 及电极进行形貌表征。采用中国苏州福田检测设备有限公司 FT-8000D 对剥离与应力等机械性能进行测试。使用上海中晨公司的接触角测角仪 JC2000D 测量液滴落在衬底上后的静态侧向图像。

## 3 结果与讨论

### 3.1 TPU 衬底的修饰、优化与表征

在基于 TPU 衬底制备 OLED 的初步尝试中,我们采用与玻璃衬底相同的预处理方法,包括清洁、退火和等离子处理。然而,与玻璃衬底上制备的 OLED 相比,TPU 衬底上的 OLED 表现出显著的发黄现象,并且测试发现器件因为断路而完全失效(如图 2a 所示),推测可能是与 TPU 直接连接的电极结构与 TPU 发生反应或接触不良导致的。这一现象可能源于以下两方面原因:其一,OLED 材料与 TPU 直接接触时可能发生了不可控的化学反应;其二,在 OLED 蒸发沉积过程中,气态的材料微粒可能渗透至 TPU 衬底内部,从而破坏了器件的功能性。

为进一步探讨 TPU 衬底表面的形貌特性,我们采用 AFM 对未经任何处理的原始 TPU 和退火处理后的 TPU 进行表征,同时以  $1 \mu\text{m}$  间隔对原始  $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$  尺寸的 AFM 图像进行高度曲线采

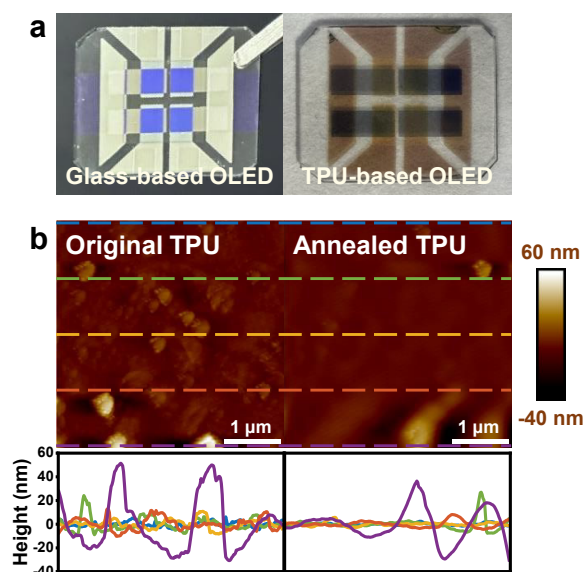


图2 (a) 在玻璃衬底和 TPU 衬底上制备的 OLED 的照片;(b) 原始 TPU 衬底与退火处理后 TPU 衬底的 AFM 表面形貌图及对应的高度分布曲线。

Fig. 2 (a) Images of OLEDs fabricated on glass and TPU substrates; (b) AFM images and corresponding height profiles of the original TPU and annealed TPU substrates.

样。结果显示,原始 TPU 表面具有较大的高度差,并存在明显的颗粒特征,表面粗糙度(RMS)为 7.05 nm。经过退火处理后,TPU 表面形貌有所改善,RMS 值降至 5.84 nm。然而,退火处理未能显著消除颗粒特征,表明单纯的热处理无法有效提升 TPU 表面的平整度,难以满足 OLED 器件制备的要求。综上所述,现有 TPU 衬底需要通过进一步的表面修饰,例如引入功能性界面层,来优化其表面性能,以提高其与 OLED 制备工艺的兼容性,从而满足高性能柔性 OLED 的制造需求。

经过多次尝试与验证,本研究最终选择了聚(3,4-乙二氧噻吩)-聚苯乙烯磺酸盐(PEDOT:PSS)作为表面修饰材料,并采用旋涂法在 TPU 衬底上制备了 PEDOT:PSS 薄膜,如图 3a 所示,选用光敏胶将 TPU 衬底粘贴到玻璃上,是为了后续的旋涂工艺流程顺利进行,同时相比使用双面胶粘贴,光敏胶粘贴后更易将 TPU 衬底从玻璃上揭开并分离,避免过大的外力对衬底造成损伤。由于 PEDOT:PSS 具有优异的稳定性和良好的导电性,广泛应用于各种电子器件中<sup>[22-23]</sup>。将 PEDOT:PSS 与 TPU 结合,有望有效改善 TPU 衬底的表面性质,从而确保 OLED 器件的正常工作。此外相比



其他修饰材料, PEDOT:PSS有良好的成膜效果,且不需要借助可能会与TPU发生反应的其它辅助溶剂。

然而, PEDOT:PSS与TPU之间的浸润性较差,这可能导致涂层的不均匀性,进而影响器件的性能和效果。为解决这一问题,本研究向PEDOT:PSS溶液中掺入了表面活性剂FS-30,FS-30是一种常用的非离子表面活性剂,具有较强的润湿性,能够增强液体与固体表面的相容性,从而改善PEDOT:PSS与TPU衬底之间的浸润性。为了优化FS-30的掺杂比例并评估其对浸润性改善的效果,我们进行了接触角测试,如图3b所示。具体而言,我们测试了不同FS-30掺杂浓度(0%、1%、

5%和10%)下PEDOT:PSS溶液在TPU衬底上的接触角。实验结果表明,随着FS-30掺杂比例的增加, PEDOT:PSS在TPU衬底上的浸润性显著改善。当FS-30掺杂浓度达到10%时,接触角最小,表明浸润性最佳。为避免过高的FS-30浓度对溶液性能产生不利影响,我们最终选择了10%的掺杂浓度作为优化方案。

针对修饰后的TPU衬底(以下简称m-TPU),我们同样进行了AFM表征,如图3c所示。结果显示, m-TPU衬底的表面平整度得到了显著提升,其RMS由原始TPU的7.05 nm降低至2.19 nm。这一显著改善不仅验证了表面修饰工艺的有效性,也为后续工艺流程的优化奠定了坚实的基础。

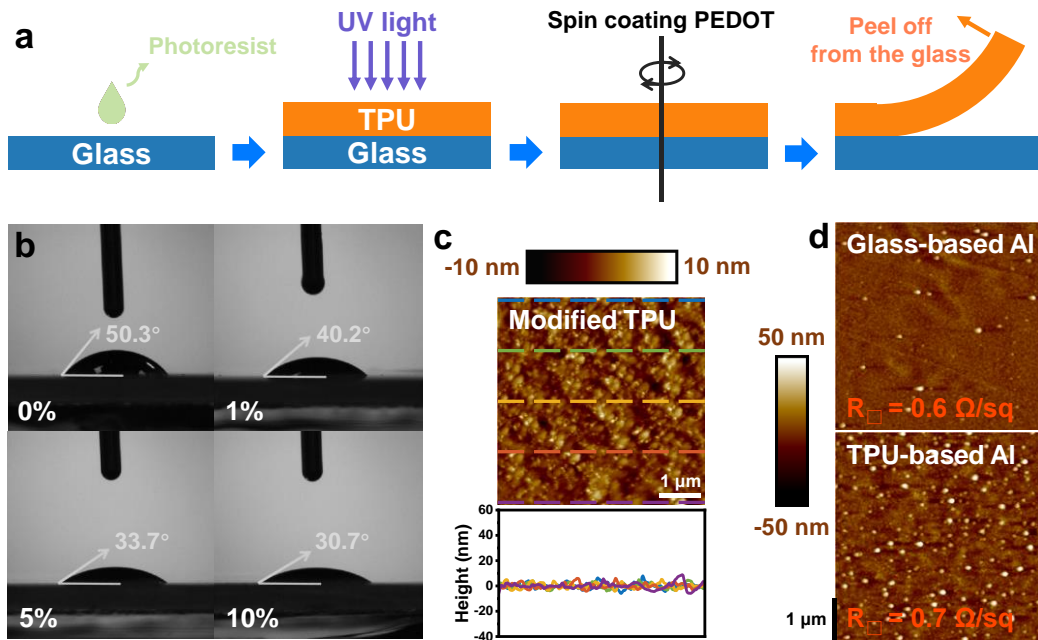


图3 (a) PEDOT:PSS修饰TPU的工艺流程示意图;(b)引入不同掺杂浓度表面活性剂FS-30的PEDOT:PSS溶液在TPU衬底上的接触角;(c) m-TPU的AFM表面形貌及其相应的高度分布曲线;(d) m-TPU与玻璃衬底上制备的100 nm Al电极的AFM表面形貌及其方块电阻。

Fig. 3 (a) Schematic of the process for modifying TPU with PEDOT:PSS; (b) Contact angle of PEDOT:PSS solution with different FS-30 doping concentrations on TPU substrate; (c) AFM image and corresponding height profiles of m-TPU; (d) AFM images and sheet resistance of 100 nm Al electrodes fabricated on m-TPU and glass substrates.

此外,为了评估m-TPU对解决前述TPU与OLED发生反应问题的改善效果,我们分别在m-TPU和玻璃衬底上单独制备了100 nm的Al电极,并进行了AFM分析比较。结果表明,m-TPU上的Al电极更倾向于岛状生长,从而导致更多的尖峰形态,因此其RMS值较高,达到了8.83 nm,约为玻璃衬底上Al电极RMS值4.24 nm的两倍。然而,制备在m-TPU上的Al电极在宏观效果上与玻璃衬底上的Al电极相似。此外,方块电阻数据表明,尽管

存在一定的RMS差异,但方块电阻差异较小,表明m-TPU仍为OLED的制备提供了良好的条件。

### 3.2 m-TPU衬底上的电极机械性能研究

为了更好地了解m-TPU作为柔性衬底与OLED结合的可行性,我们在m-TPU衬底上单独制备了100 nm的Al电极,并进行了相关的机械性能研究。

首先,我们比较了m-TPU衬底与玻璃衬底上电极的剥离性能,如图4a所示。从图中可以看

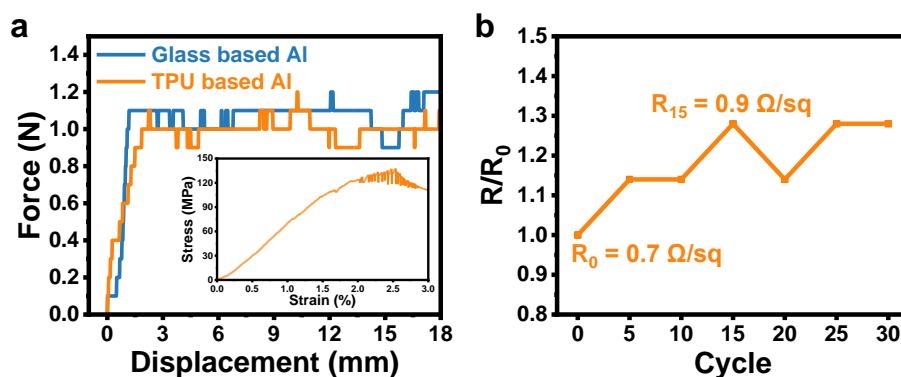


图4 (a) 玻璃和 m-TPU 衬底上 Al 电极的剥离测试曲线, 插图为 m-TPU 衬底上 Al 电极的应力-应变曲线; (b) m-TPU 衬底上 Al 电极的方块电阻随弯折次数变化的曲线。

Fig. 4 (a) Peel test curves of Al electrodes on glass and m-TPU substrates, and inset: stress-strain curve of Al electrodes on m-TPU substrates; (b) variation of square resistance of Al electrodes on m-TPU substrates with the number of bending cycles.

出, m-TPU 衬底与玻璃衬底在电极剥离力上表现相似。尽管 m-TPU 衬底的剥离力略低于玻璃衬底, 但整体剥离力接近 1.0 N, 表明电极与 TPU 衬底之间具有良好的粘附力。此外, m-TPU 衬底在剥离过程中表现出一定的力波动, 这可能与其柔

性特性有关, 但这种波动并未显著影响其作为 OLED 衬底的可行性。图 4a 插图中, m-TPU 上的电极应力-应变分析结果表明, 制备大面积电极的 m-TPU 在初始状态下表现出良好的力学性能, 具备较高的承载能力和明显的塑性变形特征。曲线

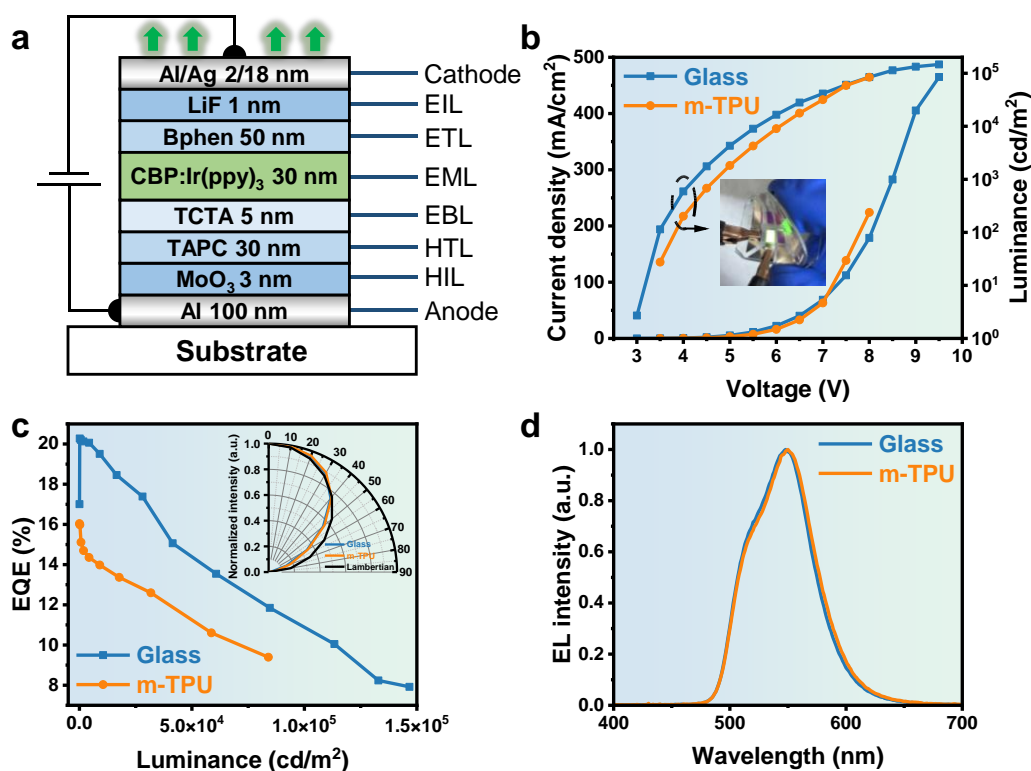


图5 (a) 顶发射 OLED 的结构示意图; (b) m-TPU 基与玻璃基顶发射 OLED 的电压-亮度-电流密度曲线, 插图为 m-TPU 基 OLED 的柔性显示效果图; (c) m-TPU 基与玻璃基顶发射 OLED 的外量子效率-亮度曲线, 插图为二者的角度分布曲线, 并与朗伯体分布进行对比; (d) m-TPU 基与玻璃基顶发射 OLED 的电致发光光谱。

Fig. 5 (a) Schematic structure of top-emitting OLEDs; (b) Voltage-luminance-current density curves of m-TPU-based and glass-based top-emitting OLEDs, with an inset showing the flexible display effect of m-TPU-based OLEDs; (c) External quantum efficiency-brightness curves of m-TPU-based and glass-based top-emitting OLEDs, with an inset showing the angular distribution curves of both, compared with Lambertian distribution; (d) EL spectra of m-TPU-based and glass-based top-emitting OLEDs.

在达到峰值应力后出现轻微波动,表明在受力过程中材料可能发生微裂纹扩展或局部失稳,但整体结构保持稳定,证明其在弯曲前具有良好的力学稳定性和抗拉强度。

柔性 OLED 的实现离不开电极优异的弯曲性能。我们对制备在 m-TPU 衬底上的大面积电极进行了弯曲测试,并考察了弯曲次数对方块电阻的影响。如图 4b 所示,尽管电阻变化比值  $R/R_0$  随着弯曲循环次数的增加而逐渐升高,但增幅较小。经过 30 次弯曲循环后,电阻比值的最大增幅仅为约 1.3。这表明电极在反复弯曲过程中表现出较高的稳定性和耐久性,电极与导电层的结构损伤或接触变化较轻微,整体性能影响不大,器件能够在多次弯曲后保持基本功能。这一结果进一步验证了 m-TPU 衬底电极在柔性 OLED 应用中的可行性和可靠性。

### 3.3 基于 m-TPU 衬底的柔性 OLED

通过一系列测试验证 TPU 用于柔性衬底的可行性后,我们首先在其上制备了顶发射 OLED,结构如图 5a 所示。阳极和阴极分别是 100 nm Al 和 2 nm Al/18 nm Ag,  $\text{MoO}_3$  和 TAPC(4,4'-环己基二[N,N-二(4-甲基苯基)苯胺])分别用作空穴注入层(HIL)和空穴传输层(HTL),LiF、Bphen(4,7-二苯基-1,10-菲啰啉)和 TCTA(4,4',4'-三(咔唑-9-基)三苯胺)分别用作电子注入层(EIL)、电子传输层(ETL)和电子阻挡层(EBL)。发光层采用了 CBP 作为主体材料并掺杂 10% 的  $\text{Ir}(\text{ppy})_3$  作为磷光客体材料,通过高效的能量传递与激子复合,产生绿色磷光发射,为器件提供了高效、稳定的发光性能。上述所有功能层均通过蒸发沉积法制备。

如图 5b 插图所示,基于 m-TPU 衬底的顶发射 OLED 成功实现了柔性显示效果,能够在弯折的状态下稳定发光,且器件在发光过程中能够持续

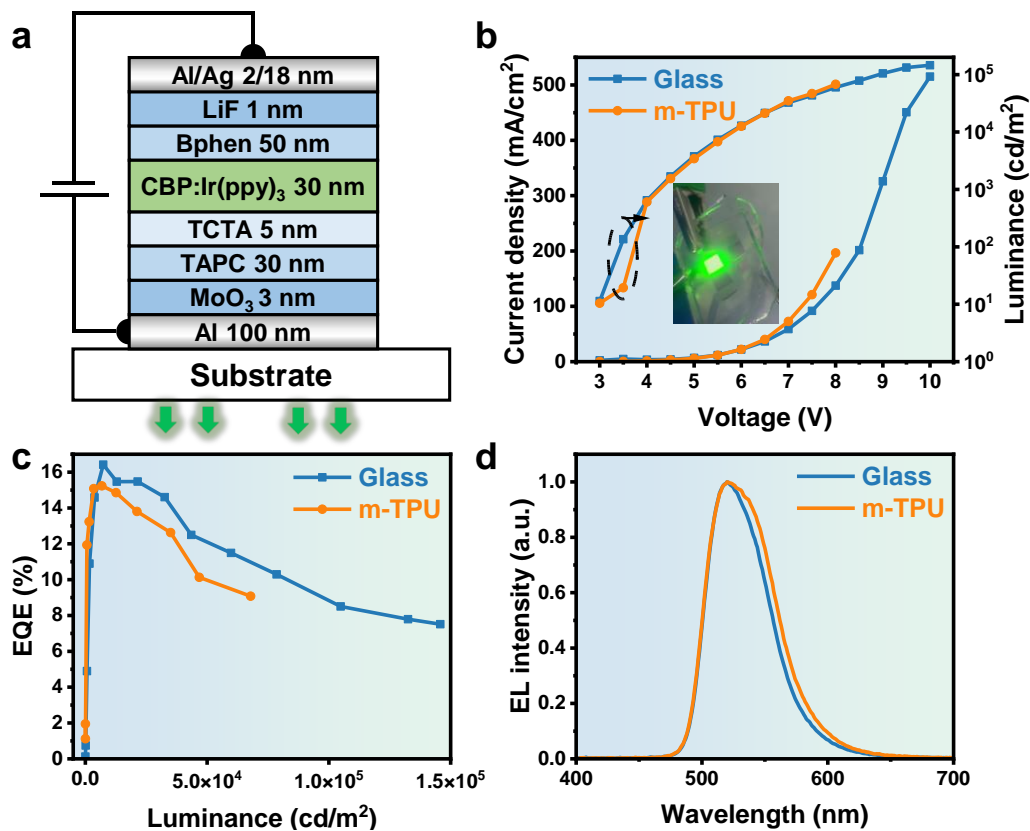


图 6 (a) 底发射 OLED 的结构示意图; (b) m-TPU 基与玻璃基底发射型 OLED 的电压-亮度-电流密度曲线, 插图显示 m-TPU 基 OLED 的柔性显示效果图; (c) m-TPU 基与玻璃基底发射型 OLED 的外量子效率-亮度曲线; (d) m-TPU 基与玻璃基底发射型 OLED 的电致发光光谱。

Fig. 6 (a) Schematic diagram of the bottom-emitting OLED structure; (b) Voltage-luminance-current density curves of bottom-emitting OLEDs based on m-TPU and glass substrates, with an inset showing the flexible display effect of the m-TPU-based OLED; (c) External quantum efficiency-luminance curves of bottom-emitting OLEDs based on m-TPU and glass substrates; (d) EL spectra of m-TPU-based and glass-based bottom-emitting OLEDs.

保持柔性,并适应外部机械变形。在电学性能方面,如图 5b 和 5c 所示,m-TPU 衬底上的顶发射 OLED 在开启电压和低电压下的表现与玻璃衬底的顶发射 OLED 相当。尽管在高电压下,m-TPU 基顶发射 OLED 的亮度和外量子效率(External quantum efficiency, EQE)略低于玻璃基顶发射 OLED,但这一差距可以理解,因为柔性衬底往往在电学性能与玻璃衬底存在一定差距,这些差距体现在衬底的介电常数与导电性、表面平整度与界面接触质量及机械变形引起的内部应力等方面。尽管如此,m-TPU 基顶发射 OLED 仍然实现了最高 EQE 达到 16.0% 的性能。进一步地,图 5c 插图的角度分布曲线显示,m-TPU 基顶发射 OLED 与玻璃基顶发射 OLED 具有相近的发光分布,展现了类似的视角特性。此外,从图 5d 的光谱曲线可以看出,m-TPU 衬底的引入对 OLED 的发光光谱几乎没有影响,两者的光谱曲线基本一致,并且保持了相同的发光峰值,表明 m-TPU 衬底并未显著改变 OLED 的基本发光特性。

为了进一步验证 m-TPU 衬底在 OLED 器件中的应用可行性,我们制备并测试了底发射 OLED,

其具体器件结构如图 6a 所示。与顶发射 OLED 相比,基于 m-TPU 衬底的底发射型 OLED 同样表现出优异的电学和光学性能,其最高 EQE 也达到了 15.2%,同时具备柔性显示的能力,充分证明了 TPU 衬底的适用性。

## 4 结 论

针对商用 TPU 衬底在 OLED 制备过程中存在的表面质量不佳及性能失效问题,我们采用了 PEDOT:PSS 进行表面修饰,并通过掺杂 10% 的表面活性剂 FS-30 对其进行优化,显著提高了 PEDOT:PSS 在 TPU 表面的浸润性和膜层均匀性。在此基础上,我们成功在改性后的 TPU 衬底上制备了大面积电极,并通过一系列实验验证了表面修饰工艺的有效性和可靠性。最终,我们在修饰后的 TPU 衬底上分别制备了顶发射型和底发射型 OLED,二者均展现出优异的柔性显示性能,且在机械稳定性和发光均匀性方面具有显著优势。本研究证明了 TPU 衬底与 OLED 器件结合的良好前景,也为柔性电子器件的设计和开发提供了新的思路与实验依据。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] Im Y, Byun S Y, Kim J H, *et al.* Recent progress in high-efficiency blue-light-emitting materials for organic light-emitting diodes[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2017, 27(13): 1603007.
- [ 2 ] Yin Y, Ali M U, Xie W, *et al.* Evolution of white organic light-emitting devices: from academic research to lighting and display applications[J]. *Mater. Chem. Front.*, 2019, 3(6): 970-1031.
- [ 3 ] 娄敬丽,黎刚刚,王志明等. 紫外/深蓝 OLED 发光材料研究进展 [J]. *发光学报*, 2023, 44(01): 37-60.  
LOU J L, LI G G, WANG Z M, *et al.* Progress of Ultraviolet/Deep-blue OLED Luminescent Materials [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(01): 37-60. (in Chinese)
- [ 4 ] Bauri J, Choudhary R B, Mandal G. Recent advances in efficient emissive materials-based OLED applications: a review [J]. *J. Mater. Sci.*, 2021, 56(34): 18837-18866.
- [ 5 ] Zhang D, Huang T, Duan L. Emerging self-emissive technologies for flexible displays[J]. *Adv. Mater.*, 2020, 32(15): 1902391.
- [ 6 ] Smith J T, Katchman B A, Kullman D E, *et al.* Application of flexible OLED display technology to point-of-care medical diagnostic testing[J]. *J. Disp. Technol.*, 2016, 12(3): 273-280.
- [ 7 ] Song J, Lee H, Jeong E G, *et al.* Organic light-emitting diodes: pushing toward the limits and beyond[J]. *Adv. Mater.*, 2020, 32(35): 1907539.
- [ 8 ] Cho D H, Kwon O E, Park Y S, *et al.* Flexible integrated OLED substrates prepared by printing and plating process[J]. *Org. Electron.*, 2017, 50: 170-176.
- [ 9 ] Zhou J, Ai N, Wang L, *et al.* Roughening the white OLED substrate's surface through sandblasting to improve the external quantum efficiency[J]. *Org. Electron.*, 2011, 12(4): 648-653.
- [ 10 ] Spechler J A, Koh T W, Herb J T, *et al.* A transparent, smooth, thermally robust, conductive polyimide for flexible electronics[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2015, 25(48): 7428-7434.
- [ 11 ] 孙媛媛,华玉林,郑加金,印寿根,冯秀岚,王树国. 柔性衬底白色有机电致发光器件的制备及其性能 [J]. *发*

- 学报, 2005, 26(3): 327-332.
- SUN Y Y, HUA Y L, ZHENG J J, YIN S G, FENG X L, WANG S G. Fabrication and Study of Flexible Organic White-light-emitting Devices [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2005, 26(3): 327-332. (in Chinese)
- [ 12 ] Kim E, Cho H, Kim K, *et al.* A facile route to efficient, low-cost flexible organic light-emitting diodes: utilizing the high refractive index and built-in scattering properties of industrial-grade PEN substrates[J]. *Adv. Mater.*, 2015, 27(9): 1624-1631.
- [ 13 ] Pan T, Liu S, Zhang L, *et al.* A flexible, multifunctional, optoelectronic anticounterfeiting device from high-performance organic light-emitting paper[J]. *Light Sci. Appl.*, 2022, 11(1): 59.
- [ 14 ] Sharif P, Alemdar E, Ozturk S, *et al.* Rational molecular design enables efficient blue TADF-OLEDs with flexible graphene substrate[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2022, 32(47): 2207324.
- [ 15 ] Liu Y, Xie Y M, Liu Y, *et al.* Flexible organic light emitting diodes fabricated on biocompatible silk fibroin substrate [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2015, 30(10): 104004.
- [ 16 ] Paraskos A J. *Energetic Polymers: Synthesis and Applications*[M]. Switzerland: Springer. 2017.
- [ 17 ] Choi J, Jang J U, Yin W B, *et al.* Synthesis of highly functionalized thermoplastic polyurethanes and their potential applications[J]. *Polymer*, 2017, 116: 287-294.
- [ 18 ] Desai S M, Sonawane R Y, More A P. Thermoplastic polyurethane for three-dimensional printing applications: A review [J]. *Polym. Adv. Technol.*, 2023, 34(7): 2061-2082.
- [ 19 ] 李子欣, 黄汉军, YOU Somary 等. 自愈合发光聚氨酯弹性体的制备与性能 [J]. 发光学报, 2023, 44(06): 985-994.
- LI Z X, HUANG H J, YOU Somary, *et al.* Preparation and Properties of Self-healing Luminescent Polyurethane Elastomer [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(06): 985-994. (in Chinese)
- [ 20 ] Chen T, Xie Y, Wang Z, *et al.* Recent advances of flexible strain sensors based on conductive fillers and thermoplastic polyurethane matrixes[J]. *ACS Appl. Polym. Mater.*, 2021, 3(11): 5317-5338.
- [ 21 ] Lu Z. *Intrinsically stretchable, transparent organic light-emitting diode enabled by fully-solution processing* [D]. Hong Kong: Hong Kong Polytechnic University, 2022.
- [ 22 ] Lövenich W. PEDOT-properties and applications[J]. *Polym. Sci. Ser. C*, 2014, 56(1): 135-143.
- [ 23 ] 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)



李欣奕(1999-),男,河南济源人,硕士研究生,2021年于吉林大学获得学士学位,主要从事电致发光器件及柔性衬底的研究。

E-mail: lixiny22@mails.jlu.edu.cn



刘士浩(1992-),男,山东聊城人,副教授,博士,2018年于吉林大学获得博士学位,主要从事有机发光器件方面的研究。

E-mail: liushihao@jlu.edu.cn