

特约专栏

## 柔性有机发光二极管材料与器件研究进展

李 琛, 黄根茂, 段 炼, 邱 勇

(清华大学化学系 有机光电子与分子工程教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:** 有机发光二极管 (Organic Light Emitting Diodes, 简称 OLED) 是全固态的薄膜发光器件。由于 OLED 的可柔性制备、低驱动电压、低功耗等优点, 其在未来的可穿戴应用上具有广阔的发展前景。目前, 小尺寸的 OLED 显示器已经实现商业化, 大尺寸的 OLED 电视和照明也已有产品问世, 但 OLED 器件的可穿戴应用尚处于探索期。综述了近年来基于可穿戴应用的柔性 OLED 材料及器件技术的研究进展, 具体介绍了柔性基板材料、柔性薄膜晶体管材料、柔性 OLED 发光层技术、柔性薄膜封装材料与技术等方面的研究进展。此外, 介绍了近几年来兴起的一些新型的柔性器件制备技术, 如柔性纤维布基底技术、纤维状聚合物发光电化学池技术、对称平面层器件结构和狭缝涂布式印刷技术等。最后, 对柔性 OLED 材料与器件技术的发展趋势进行了展望。

**关键词:** 有机发光二极管; 可穿戴设备; 柔性器件材料; 柔性制备技术

**中图分类号:** TN312.8    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1674-3962(2016)02-0101-07

## Recent Advances in Organic Light-Emitting Diodes for Flexible Applications

LI Chen, HUANG Genmao, DUAN Lian, QIU Yong

(Key Laboratory of Organic Optoelectronics & Molecular Engineering of Ministry of Education,  
Department of Chemistry, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Organic light-emitting diodes (OLEDs) are solid state light emitting devices. They have broad prospects in the field of wearable devices owing to their flexibility nature, low driving voltage and low power consumption. Small to medium size OLED displays have already been commercialized. Large OLED TVs and OLED lightings have also emerged in real applications. We review the most focused issues as well as the main progress in the field of flexible OLED technology in the recent years. The developing trends of flexible substrate material, flexible thin film transistor material, flexible OLED emitting layer and flexible thin film encapsulation layer are summarized. We also introduce some emerging flexible device fabrication technologies, such as flexible fabric substrate, polymer fibre based light emitting cell, the symmetric panel stacking device structure and slot-die coating technology. Lastly, we look to the prospect of the flexible OLED materials and devices technology.

**Key words:** organic light emitting diodes; wearable devices; materials for flexible OLEDs; fabrication technologies for flexible devices

### 1 前 言

早在 20 世纪 60 年代, Pope 等<sup>[1]</sup>就发现了有机半导体的电致发光现象。1987 年, 美国 Kodak 公司的 Tang 等<sup>[2]</sup>采用有机小分子半导体材料研制出低电压、高亮度的有机发光二极管 (OLED), 第一次展示了有机发光器

件的广阔前景。目前, OLED 的发光效率和稳定性已经能够满足中小尺寸显示的要求, 并广泛应用在仪表和智能手机领域; 大尺寸的 OLED 电视机也已开始进入市场。作为一种新型的平板显示技术, OLED 具有宽视角、超薄、响应快、发光效率高等优点, 是全球公认的液晶后的下一代主流显示器。同时由于具有可大面积成膜、功耗低等特性, OLED 还是一种理想的平面光源, 在节能环保型照明领域具有广阔的应用前景。由于 OLED 是全固态的薄膜器件, 且采用有机材料、无定形材料制备, 因而在柔性器件方面具有天然的优势, 也使其成为可穿戴智能设备领域中重要的技术。

收稿日期: 2015-07-14

第一作者: 李 琛, 男, 1989 年生, 博士研究生

通讯作者: 段 炼, 男, 1975 年生, 副研究员, 博士生导师,

Email: duanl@tsinghua.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2016.02.03

OLED 的发光原理类似无机的二极管发光: 在外界电场的驱动下, 电子和空穴分别由阴极和阳极注入到有机电子传输层和空穴传输层, 并在有机发光层中复合生成激子, 激子辐射跃迁回到基态并发光。OLED 为全固态的器件, 在进行弯曲折叠的过程中亦能正常工作, 因此易于制备柔性器件; 基于高分子的有机发光二极管 (PLED)<sup>[3]</sup> 具有可全湿法制备的特点, 在柔性显示领域具有很大的应用潜力。

随着可穿戴智能设备的兴起, OLED 柔性器件的制备技术也得到了蓬勃的发展。目前, 三星的 Galaxy S6 智能手机、苹果的 apple watch 智能手表等均已采用了柔性 OLED 技术。本文将对近年来柔性有机发光器件的一些技术进展进行概述, 主要内容涵盖柔性基板材料、柔性薄膜晶体管 (TFT) 材料、柔性 OLED 发光层技术、柔性薄膜封装技术等方面。

## 2 柔性有机发光器件技术

从技术发展阶段来看, 柔性显示可分为可弯曲屏幕、可折叠屏幕、自由柔性屏幕 3 个阶段。目前, OLED 显示技术的主流是有源驱动 OLED (AMOLED) 技术。大部分的柔性 OLED 产品都还处在初级的可弯曲屏幕阶段, 而这一阶段的研发也主要围绕着柔性基板、柔性 TFT 背板、柔性 OLED 发光层与薄膜封装这几个关键技术点来进行。

### 2.1 柔性基板技术

柔性基板包括金属箔、薄化玻璃、塑胶基板等。金属箔因为透光性能差, 在使用上受到较大的限制, 而薄化玻璃最大的问题在于易碎裂。以聚酰亚胺 (Polyimide) 为主的塑胶材料由于透明且不易碎裂, 在业界已经成为制备柔性基板最为流行的材料。但是, 塑胶材料用在柔性基板上也面临着几个重大技术问题。

首先是基板本身的耐热、光学、机械以及阻水氧渗透等方面性能能否满足器件应用需求。①塑胶基板的耐热特性包括热裂解温度、玻璃转移温度、热膨胀系数等。以当前流行的低温多晶硅 (LTPS) 驱动工艺为例, 塑胶基板必须历经多次至少 400 °C 以上的温度考验以及在真空镀膜时的电浆轰击, 基板材料具备耐热稳定性与分子层次的化学稳定性是技术成功的关键。②光学特性则包括光穿透度、光色泽、折射系数等, 特别是对于底部发光的显示模式 (光从柔性基板面发出), 作为显示器的显示面基板, 其优异的光学特性是成像质量的关键。③机械特性包括表面平坦性与粗糙度、表面硬度、机械强度等, 因为显示器必须能承受人为的触碰, 以及可穿戴、可收纳等严苛环境考验, 所以使用过程能够不受损伤也是重要的一环。④至于阻水氧渗透特性, 则包

括水气穿透率 (Water Vapor Transmission Rate, 简称 WVTR) 及氧气穿透率 (Oxygen Transmission Rate, 简称 OTR), 此两个参数最常被用来说明基板封装阻水能力的好坏。通常来说, OLED 寿命要达到 10 000 h 以上, 封装的 WVTR 须小于  $1 \times 10^{-6} \text{ g/m}^2/\text{day}$ , 而 OTR 则须小于  $1 \times 10^{-5} \text{ g/m}^2/\text{day}$ <sup>[4]</sup>。而现行塑胶基板阻水氧特性皆在  $1 \text{ g/m}^2/\text{day}$  以上, 因此柔性 AMOLED 须在柔性基板上再搭配阻隔层 (Barrier Layer), 才达到有效的阻水氧渗透特性。如何在柔性显示器上制造类玻璃封装般的高信赖性封装结构且具备挠曲特性, 是提高柔性 AMOLED 寿命最重要的课题。

### 2.2 柔性薄膜晶体管 (TFT)

柔性 TFT 背板是驱动柔性 AMOLED 面板最为关键的技术, 现阶段研发的技术包括硅基晶体管 (Silicon TFT, 简称 SiTFT)、有机晶体管 (Organic TFT, 简称 OTFT) 以及金属氧化物半导体晶体管 (Metal-Oxide TFT, 简称 MOxTFT)。以上 3 种技术, 可在不同低温下制作, 故可与柔性塑胶基板搭配。

为了将 TFT 制作于柔性基板, 工艺温度须符合基板所能承受的耐温极限。同时, 低温成长的薄膜其本质应力较小, 更适合于柔性器件所使用。然而, 低温沉积的薄膜其膜内缺陷比高温沉积的高, 从而影响器件的电学性能与可靠性表现, 因此工艺温度也须兼顾薄膜的电气特性而不能无限制地降低。

由于硅基技术相较于其他材料较为成熟, 目前仍以柔性硅基 TFT 背板技术最为普遍, 主要包括非晶硅 (Amorphous Silicon, 简称 a-Si) TFT 和低温多晶硅 (Low Temperature Poly-Silicon, 简称 LTPS) TFT。其中 a-Si TFT 具有工艺简单和器件均匀性好的优点, 但是由于 a-Si 的载流子迁移率低 ( $\sim 1 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ )<sup>[5]</sup>, 其过低的电流难以驱动 AMOLED。目前业界主要还是以 LTPS TFT (载流子迁移率  $\sim 100 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ )<sup>[6]</sup> 来驱动 AMOLED 器件。

### 2.3 柔性 OLED 发光层

单就 OLED 发光层而言, 柔性基板与传统玻璃基板的工艺基本上是兼容匹配的。但是, 作为传统 AMOLED 器件的导电阳极材料 ITO, 已经无法适应柔性显示应用, 寻找新型导电材料以取代 ITO, 也成为了柔性显示中非常重要的研究课题之一。

在柔性显示中, 由于弯曲或卷曲应用情况的存在, ITO 很容易发生断裂而导致器件失效。所以, 新型的替代材料除了透明、功函数匹配以及导电性好之外, 还需要非常好的材料延展性。目前的研究主要集中在超薄金属阳极、银纳米线 (Ag Nano Wire, 简称 AgNW) 和石墨烯 (Graphene) 上。

通常来说, 阳极基底的材料应满足折射率大于 1.8 的要求才能实现比较有效的光取出, 而一般的塑料基底折射率都小于 1.5, 导致光取出效率不高。吕正红等<sup>[7]</sup>提出了一种基于塑料基底的超薄金属阳极材料(图 1), 这种阳极材料由溅射在聚碳酸酯(Lexan)塑料基底上的  $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Au}/\text{MO}_3$  构成。相比于传统的 ITO/ $\text{MO}_3$  材料, 采用这种阳极的白光器件外量子效率由 25% 提升到 40%。当采用折射率达到 1.55 的镜片增加光取出后, 器件的外量子效率达到了 60%。这种阳极材料由于可以直接溅射在柔性的 lexan 或者 lens 基底上, 在柔性制备上具有 ITO 无法比拟的优势。

银纳米线除具有银优良的导电性之外, 由于纳米级别的尺寸效应, 还具有优异的透光性、耐曲挠性<sup>[8]</sup>, 因此被视为是最有可能替代传统 ITO 透明电极的材料, 为实现柔性显示提供了可能。目前, 制备柔性银纳米线透明导电薄膜普遍采用涂布印刷的方法。这种方法制备的银纳米线表面电阻达到  $\sim 15 \Omega/\text{sq}$ , 透光率为 83%。柔性银纳米线透明导电薄膜与传统的 ITO 膜相比, 具有更多的优势: 稳定性和弯曲性能良好、对湿度和高温呈现出较强的惰性、薄膜弯曲多次后对电阻产生的影响很小。但是, 银纳米线的空穴注入效率偏低, 需要配合其他材料来提高整体材料的效率。

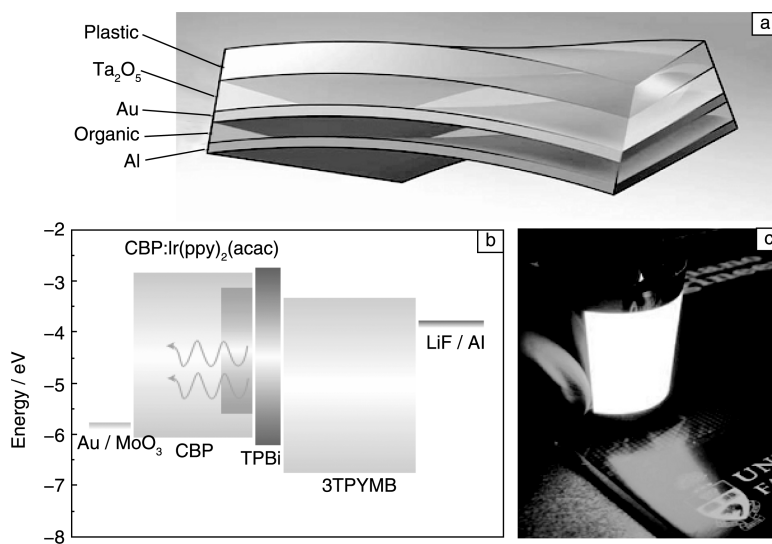


图1 超薄金属阳极材料及白光器件结构示意图(a)、能级图(b)和实物照片(c)<sup>[7]</sup>

Fig. 1 Device structure (a), energy level graph (b) and photograph (c) of the white OLED device based on the ultra-thin metallic anode<sup>[7]</sup>

Li 等<sup>[9]</sup>报道了在柔性有机发光电化学池(LEC)阳极结构中使用纳米复合物光驱出结构提高器件效率(图 2)。钛酸锶钡纳米颗粒分散于聚合物基体中以提高光驱出效率, 碳纳米管和银纳米线则作为电极沉积在基底表面。绿光器件  $10\,000 \text{ cd}/\text{m}^2$  亮度下电流效率达到  $118 \text{ cd}/\text{A}$ , 最大外量子效率为 38.9%, 效率比基于玻璃/ITO 的器件提高 246%; 白光器件效率为  $46.7 \text{ cd}/\text{A}$ , 外量子效率达 30.5%, 效率提高 224%。他们制备的柔性 LEC 在曲率半径 3 mm 反复弯曲测试下器件性能无明显衰减。

Pei 等<sup>[10]</sup>近年多次报道了可拉伸柔性的有机发光电化学池(LEC)器件。2011 年, 他们采用了低电阻、高透明度和低表面粗糙度的碳纳米管聚合物复合电极结构, 这种复合电极在拉伸长度 50% 以内电阻变化不大。他们制备的发光器件可被拉伸 45% 而无显著性能下降。这是世界上第一个电极、半导体和电介质层均可被拉伸的有机发光器件。2012 年, Pei 等<sup>[11]</sup>又使用了银纳米线

聚合物复合材料制备了可拉伸的透明电极。当拉伸 50% 时, 电极方块电阻仅升高了 2.3 倍, 即使是在往复拉伸 600 次后方块电阻也只升高 8.5 倍。

石墨烯是已知的世界上最薄、最坚硬的纳米材料, 单层石墨烯几乎是完全透明的, 只吸收 2.3% 的光; 常温下其电子迁移率超过  $15\,000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ , 比纳米碳管或单晶硅高, 而电阻率只约  $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ , 比铜或银更低<sup>[12]</sup>。由于石墨烯实质上是一种透明、良好的导体, 非常适合应用于 AMOLED 的透明导电阳极。正是看到了石墨烯的应用前景, 许多国家纷纷建立石墨烯相关技术研发中心, 尝试开发石墨烯商业化技术, 进而在电子相关的工业技术领域获得潜在的应用专利。

石墨烯应用于 OLED 阳极的一个重要问题是石墨烯的功函数比较低因而不能实现有效的空穴注入。韩国浦项科技大学的 Lee 等<sup>[13]</sup>利用具有渐变功函数的自组装



注入层 (GraHIL) 修饰石墨烯 (图 3a), 成功制备了高效率的基于石墨烯透明阳极的柔性 OLED 器件。对比传统的 ITO 阳极, 这种石墨烯阳极的绿光器件电流效率由

81 cd/A 提升到 98.1 cd/A, 并且器件具有良好的柔性 (图 3b)。这种石墨烯阳极在柔性及可卷曲的全彩显示和固态照明上具有广阔的应用前景。

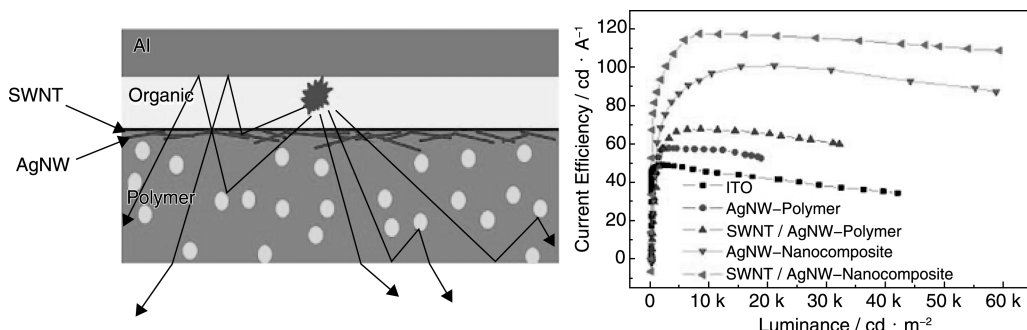


图 2 柔性纳米复合物阳极光驱 LEC 器件结构示意图及效率<sup>[9]</sup>

Fig. 2 Schematic diagram of wave guide mode and current efficiencies of the LEC devices using nano-compounds as transparent anode<sup>[9]</sup>

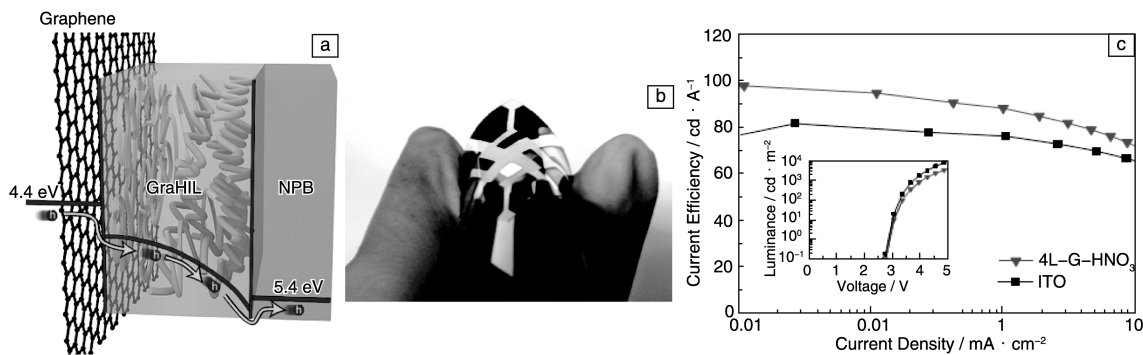


图 3 GraHIL 修饰的石墨烯阳极的空穴注入机理示意图(a); 绿光器件照片(b); 绿光器件电流效率(c)<sup>[13]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of hole injecting mechanism of the GraHIL modified graphene anode (a); photograph of the green light device (b); current efficiency of the green light device (c)<sup>[13]</sup>

## 2.4 柔性器件的薄膜封装

传统的 AMOLED 器件封装使用玻璃封盖加环氧树脂密封以及干燥剂吸收水气来实现, 可以很好地提高器件的寿命。但对于柔性显示而言, 这种方法的局限性很大。因为玻璃是刚性很强的材料, 弯曲会影响到其密封性。因此, 业界针对柔性显示发展出了以薄膜封装 (Thin Film Encapsulation, 简称 TFE) 为主的柔性封装形式。目前主流的 TFE 技术是采用具有高阻隔水氧能力的膜层即阻隔层 (多采用致密氧化物材料如  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  等)<sup>[14]</sup>, 此类材料的阻隔能力随着膜层厚度增加而提升, 但达到某一厚度后就不再增加。为了使封装能力达标, 一般采用具有平坦化能力的膜层对表面进行“修复”平整, 消除表面缺陷后再沉积阻隔层, 即可超越单层阻隔层的封装阻隔水氧能力。

薄膜封装对设备和工艺的要求相对较高, 相应的良率较低使成本居高不下, 因此, 业内发展了新的封装方案, 即用薄膜封装与高性能阻水膜结合进行, 称之为复

合封装<sup>[14]</sup>。通过在柔性基材的薄膜上沉积具有阻隔能力的单层或多层的高性能阻水膜, 其 WVTR 可以达到  $10^{-4} \text{ g/m}^2/\text{day}$  数量级。该膜层也可用于对柔性显示器件的封装, 但因其本身 WVTR 不足以实现 OLED 封装, 考虑到 TFE 的高成本, 柔性显示器生产过程中通常先在 OLED 表面沉积单层或多层高阻隔水氧能力的薄膜, 然后利用高性能阻水膜贴合整个基板, 以达到性能和成本的平衡。

Kim 等<sup>[15]</sup>报道了低功耗的柔性有机发光显示器件。他们首次制备了含薄膜封装层 (TFE) 覆盖的微腔和低温滤光片 (LTCF) 的柔性顶发光 OLED 器件。LTCF 和微腔被用于减少光反射, 从而提高效率。通过这种新型光学结构设计, 器件对比度在 500 lux 下达到 14:1, 暗室中达到 150 000:1。这种结构的柔性 OLED 器件功耗比目前普遍使用的基于极化膜的 OLED 技术降低了 30%。

## 2.5 其他柔性器件技术

可折叠屏幕的特点是其可以沿某一中线以极小的曲

率半径(一般小于 3 mm)折叠, 因此其携带更为方便, 这种显示设备对弯曲度有了更高的要求。目前 AMOLED 仍是最有潜力实现可折叠屏幕的技术。可折叠屏相比可弯曲屏幕需攻克的技术难点有: 基板软硬拼接折线处的无痕化和耐弯曲封装技术等。

自由柔性屏幕的特点是整体都可以自由弯曲, 弯曲次数应大于十万次, 产品厚度小于 0.5 mm, 因此其更容易穿戴。该技术对弯曲屏幕的材料疲劳特性提出更高的要求, 因此在材料和设计上需要革命性突破。

韩国高等技术研究院的 Kwon 等<sup>[16]</sup>利用柔性纤维布 (Fabric) 作为载体, 制备了如图 4a 所示的基于  $\text{Alq}_3$  发光的 OLED 器件。这种器件能够自如地进行弯曲, 并且在 5 mm 曲率半径进行 1 000 次弯曲之后, 电流效率依然变化不大, 保持在 9 cd/A 左右。这种器件在可穿戴设备中可能得到应用。他们还采用浸渍涂布 (Dip-Coating) 的方法<sup>[17]</sup>, 制备了 PLED 器件 (图 4b), 这种器件有可能通过纺织的方法应用于衣物中, 从而为可穿戴器件的应用提供更多可能性。

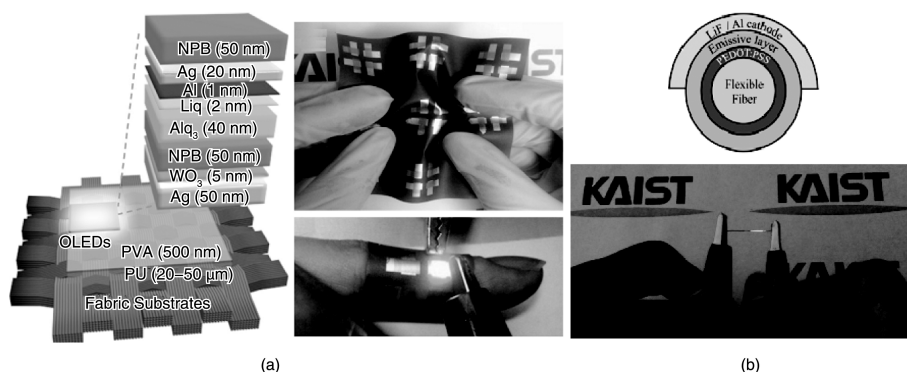


图 4 基于纤维材料基底的 OLED 器件 (a) 和 PLED 器件 (b)<sup>[16-17]</sup>

Fig. 4 The OLED device (a) and the PLED device (b) based on fibric substrate<sup>[16-17]</sup>

彭慧胜等<sup>[18]</sup>提出了一种基于可穿戴设备的有机发光器件制备方法。他们利用全湿法的方法, 以金属线为阴极, 氧化锌为电子注入层, 聚合物为发光层, 并利用碳纳米管薄片卷在器件外部作为阳极, 制作了如图 5 所示的纤维状聚合物发光电化学池 (PLEC)。这

种方法制备的器件具有如下优点: 全湿法制备制作成本低、易于工业化推广, 与观察角度无关的发光, 通过改变聚合物可实现多种颜色, 轻便、柔性可纺织等等。这些优点使得这种器件在可穿戴设备上具有广阔的应用前景。

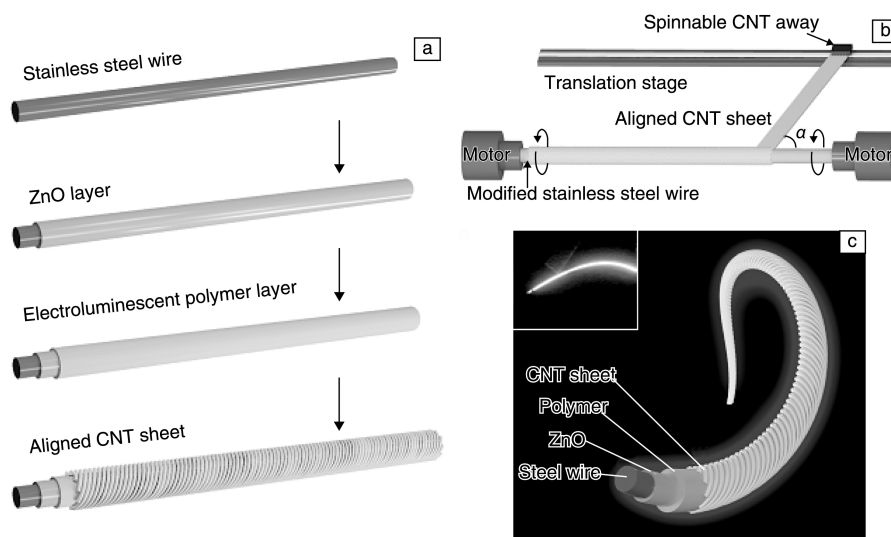


图 5 纤维状聚合物发光电化学池的制作流程 (a)、实物图 (b) 及效果图 (c)<sup>[18]</sup>

Fig. 5 Fabrication process (a), photograph (b), and lighting picture (c) of polymer fibre based LEC<sup>[18]</sup>

由于可折叠器件要求曲率半径较小(3 mm), 因而对有机发光功能层的耐弯折性提出了更高的要求。而在器件中, 靠器件中心线越近的位置在弯折中所受的切面应力越小, 如图 6a 所示。利用这一原理, 一种对称平面叠层(Symmetric Panel Stacking, SPS)的柔性器件设计方案被发展出来(图 6b)。SPS 方案相对于传统的 CPL (Circular Polarizer) 方案, OLED 功能层处于更中心的位

置, 因而避免了弯折过程中对发光层的过度破坏, 从而可能更具有耐用性。台湾 AU Optronics 公司的 Lee 等<sup>[19]</sup>对比了基于 SPS 方案和 CPL 方案的两种柔性 OLED 器件。SPS 方案下的器件不仅在高温(60 °C)/高湿度(90%)测试下相比 CPL 器件保持了更好的器件稳定性, 而且在经过曲率半径为 3 mm 的正向和反向弯折之后, 画质没有减弱。

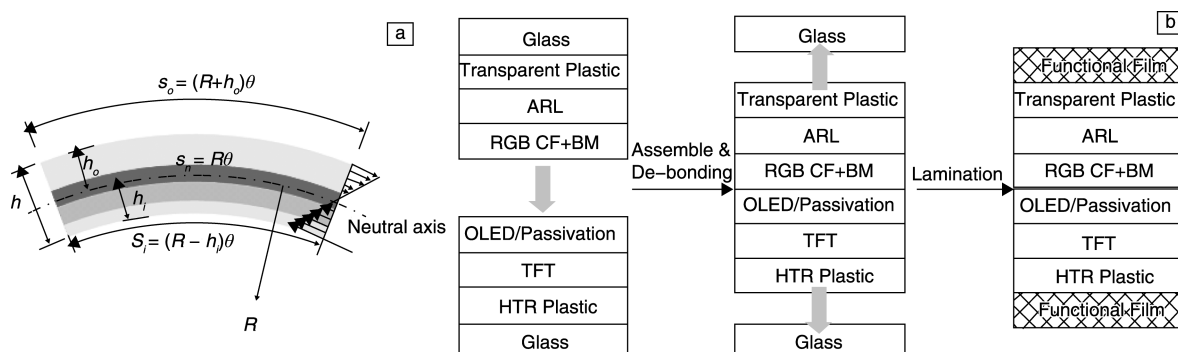


图 6 切面应力示意图(a)和对称平面叠层器件方案示意图(b)<sup>[19]</sup>

Fig. 6 Schematic diagrams of shearing stress (a) and the symmetric panel stacking device structure (b)<sup>[19]</sup>

此外, 一些湿法的柔性制备技术也被开发出来。Edman 等<sup>[20]</sup>使用狭缝涂布方式(Slot-die Coating)印刷柔性有机发光电化学池(LEC)器件(图 7)。器件结构为: PET/PEDOT:PSS/发光层/ZnO 纳米颗粒, 发光层为商品化的共轭聚合物 superyellow, 掺杂 KCF<sub>3</sub>SO<sub>3</sub>和聚氧化乙烯(PEO)。他们首先在柔性 PET 衬底上通过滚筒卷涂

ZnO 纳米颗粒作阴极, 再滚筒卷涂有机功能层, 最后以同样的方法制备阳极, 器件制备过程完全在空气中进行。该方法制备的黄绿光 LEC 器件电流效率为 0.6 cd · A<sup>-1</sup>, 10 V 下亮度为 150 cd · m<sup>-2</sup>。这种方法为采用连续滚筒式(Roll-to-Roll)方法制备廉价柔性机电致发光器件提供了思路。

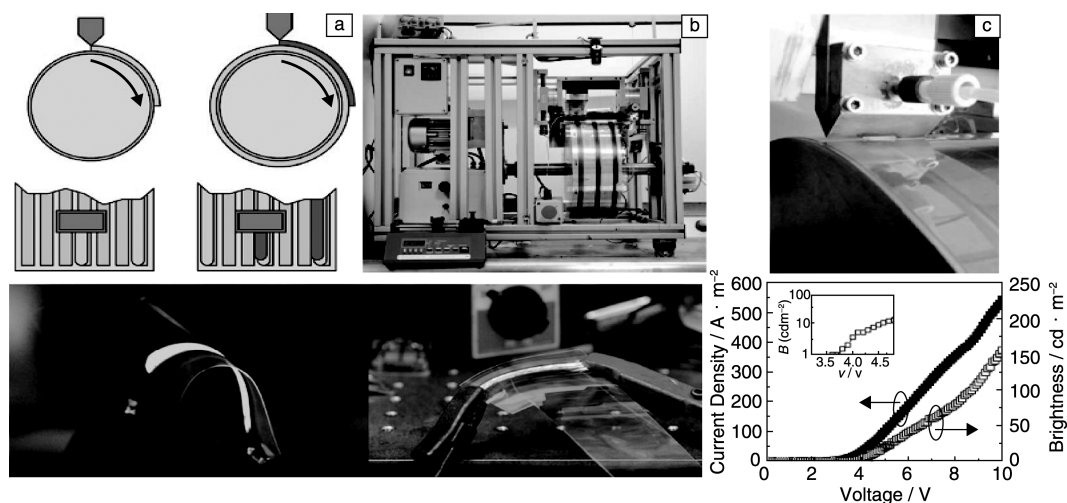


图 7 狭缝涂布方式印刷制备柔性高分子有机电致发光器件<sup>[20]</sup>

Fig. 7 Printed flexible OLEDs fabricated by slot-die coating method<sup>[20]</sup>

### 3 结 语

目前, OLED 技术在小尺寸平板显示领域已经实现了市场化应用, 在大尺寸平板显示领域也开始逐渐商业化。但是对于柔性及可穿戴 OLED 器件而言, 在柔性基板、柔性 TFT、ITO 替代阳极及柔性封装技术上都还有很大挑战。柔性及可穿戴应用还要求器件具有很强的耐弯折能力或耐磨损能力, 这对器件的各层薄膜材料的力学性能提出了较高的要求。总体来说, 可替代 ITO 的柔性阳极材料、透明 TFT 材料、多样化的柔性基板材料、满足曲率半径小于 3 mm 的耐卷曲器件是近些年研究的重点。用布和金属线等特殊材料为基底制备的器件, 由于可与纺织衣物结合, 在可穿戴器件领域可能大有可为, 也是一个值得探索的研究课题。此外, OLED 发光层薄膜本身在卷曲、折叠等力学作用下的稳定性问题也是一个可以在理论和实验上深入研究的课题。

#### 参考文献 References

- [1] Pope M, Kallmann H, Magnante P. *J Chem Phys*[J], 1963, 38: 2 042.
- [2] Tang C W, VanSlyke S A. *Appl Phys Lett*[J], 1987, 51: 913.
- [3] Gustafsson G, Cao Y, Treacy G M, et al. *Nature*[J], 1992, 357: 477-479.
- [4] Stevens M, Tuomela S, Mayer D. *Society of Vacuum Coaters 48<sup>th</sup> Annual Technical Conference Proceedings*[C]. 2005.
- [5] Le Comber P G, Spear W E. *Phys Rev Lett*[J], 1970, 25: 509-511.
- [6] Oana Y. *J Soc Inf Disp*[J], 2001, 9: 169-172.
- [7] Wang Z B, Helander M G, Qiu J, et al. *Nat Photonics*[J], 2011, 5: 753-757.
- [8] Lee J Y, Connor S T, Cui Y, et al. *Nano Lett*[J], 2008, 8 (2): 689-692.
- [9] Li L, Liang J, Chou S Y, et al. *Sci Rep*[J], 2014, 4: 4 307.
- [10] Yu Z, Niu X, Liu Z, et al. *Adv Mater*[J], 2011, 23: 3 989.
- [11] Hu W, Niu X, Li L, et al. *Nanotechnology*[J], 2012, 23: 344 002.
- [12] Novoselov K S, Fal'ko V I, Colombo L, et al. *Nature*[J], 2012, 490: 192-200.
- [13] Han T H, Lee Y, Choi M R. *Nat Photonics*[J], 2012, 6: 105-110.
- [14] Park J S, Chae H, Chung H K. *Semicond Sci Technol*[J], 2011, 26: 034 001.
- [15] Kim S, Kwon H J, Lee S, et al. *Adv Mater*[J], 2011, 23: 3 511.
- [16] Kim W, Kwon S, Lee S M, et al. *Org Electron*[J], 2013, 14: 3 007.
- [17] Kwon S, Kim W, Kim H C, et al. *SID 2015 Digest*[J], 2015: 1 753-1 755.
- [18] Zhang Z T, Guo K P, Li Y M. *Nat Photonics*[J], 2015, 9: 233-238.
- [19] Lee M T, Lin K H, Lin Y L. *SID Digest*[J], 2015: 958-961.
- [20] Sandström A, Dam H F, Krebs F C, et al. *Nat Commun*[J], 2012, 3: 1 002.

(编辑 惠 琼)