

文章编号:1007-2780(2012)05-0599-09

柔性显示衬底的研究及进展

冯魏良, 黄 培*

(南京工业大学 化学化工学院 材料化学工程国家重点实验室, 江苏 南京 210009, E-mail: fengweiliangax@126.com)

摘 要: 柔性显示作为下一代显示, 由于其具有超薄, 质量轻, 耐用等优点, 已经引起了广泛的关注。为了制备柔性显示, 柔性薄板如塑料和金属薄片作为衬底已被研究。在过去十几年中, 柔性衬底大规模替代传统的玻璃衬底具备很大的潜力, 其被认为是柔性显示发展的关键。文章综述了柔性衬底如聚合物、不锈钢、超薄玻璃、纸质和生物复合物的最新进展, 并针对柔性衬底的缺点介绍了改善方法。最后, 为了推进柔性显示的发展, 概述了卷对卷技术, 其在柔性显示应用中有着广阔的市场。

关 键 词: 柔性衬底; 寿命; R2R

中图分类号: O621.22; TB39

文献标识码: A

DOI: 10.3788/YJYXS20122705.0599

Advances in Flexible Displays Substrates

FENG Wei-liang, HUANG Pei*

(State Key Laboratory of Materials-Oriented Chemical Engineering, College of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China, E-mail: fengweiliangax@126.com)

Abstract: Flexible displays have been attracted much attention as a next generation display for their ultra-slim, light weight, durable, and conformable properties. In order to fabricate flexible displays, the flexible sheets such as plastics and metal foils have been developed as a substrate material. Over the past decade, flexible substrates that have enabled the potential for wide-scale replacement of traditional glass substrates are critical to flexible displays development. This progress report provides an update developments in flexible substrates, which include polymer, stainless steel, ultra-thin glass, paper, bio-composite. Meanwhile, some novel solutions were summarized to overcome shortcomings in developing flexible displays. Finally, roll-to-roll technology for the development of flexible displays will be introduced, since it will allow their market implementation in flexible displays.

Key words: flexible substrates; lifetime; roll-to-roll

1 引 言

柔性显示正逐渐改善人们的生活和交流, 并显著推进着信息可视化, 其最有前景的应用集中在触摸屏、个人数字助理(PDAs)、商标、安全身份文件^[1-2]、环境显示^[3]、医疗^[4]、普通照明^[5]、机器

人感觉皮肤^[6]等。柔性电子与作为平板显示的LCDs 和等离子体显示相比, 具有超薄、质量轻、耐用、储存量大、设计自由、可收卷的优点^[7-8]。iSuppli 柔性显示器的报道数据, 预测了 2007 年~2013 年的柔性显示器市场前景约有 20 亿美元^[9]。

收稿日期: 2012-05-04; 修订日期: 2012-06-07

作者简介: 冯魏良(1986—), 男, 湖北黄石人, 博士研究生, 主要从事柔性显示方面的研究。

* 通讯联系人, E-mail: phuang@njut.edu.cn

目前柔性显示已经应用于一些电子产品上,但是大规模产业化还有一些瓶颈问题需要解决,比如器件的寿命和工作稳定性等。因此,本文将综述目前柔性衬底材料的选择及对柔性显示的寿命和稳定性改善方法,介绍一种应用于柔性显示衬底,可以替代传统沉积的新型产业化 roll-to-roll 技术。该技术在实现柔性显示产量化生产的同时还可以降低成本,提高工作效率。

2 柔性衬底材料

近年来,柔性显示技术取得了巨大进步,已经广泛应用于显示产品上,特别是在移动通信设备方面。塑料衬底的 OLED 显示器(图 1)质量轻、超薄,以扩展的形式展现,具备真正的柔性显示。



图 1 可收卷式高信息容量有机 OLEDs

Fig. 1 Extendable roll-out high information content flexible OLED displays

在柔性显示器件中,柔性衬底是研发柔性显示的基础。依据目前国内外柔性显示衬底的研究进展,柔性显示衬底主要分为五类:塑料、金属箔片、超薄玻璃和最近引起研究者广泛关注的纸质衬底、生物复合薄膜衬底。这些衬底提供的装置性能与传统玻璃衬底接近,对于大多应用,使用极低成本柔性衬底发展柔性显示是非常重要的。

2.1 塑料衬底

塑料作为柔性衬底被认为具有广阔的前景,因为塑料衬底具备透明性、柔性、质量轻、耐用、价格便宜等优点。融入现代精密技术的塑料衬底有助于有机发光聚合物和有源矩阵薄膜晶体管阵列的生长和印刷,为大规模整合柔性电子装置提供了成本效益、卷-卷高容量加工的可能性。

塑料衬底一般分为 3 类:①半结晶热塑性聚合物,如 PET、PEN、PEEK^[10-11]。PET 和 PEN 作为柔性衬底展现了一些重要的特性,包括固有

的良好透明性,简单的加工过程,良好的力学性能,较高的阻隔氧气和水汽渗透性能,但是其不耐高温,低温沉积 ITO 时,器件性能降低。温度升高时,这类聚合物衬底收缩,ITO 膜容易从衬底脱落;其表面粗糙度也比较大,沉积在聚合物衬底上的薄膜容易产生缺陷。②非结晶聚合物,如 PC 和 PES^[12]为非结晶热塑性塑料,可熔融挤压或溶剂注造。PES 有良好的透明度和较高的工作上限温度,但是价格昂贵,耐溶剂性差。③非结晶高玻璃化转变温度(T_g)聚合物,如 PAR、PCO、PNB 和 PI^[13-14],PI 具有良好的热稳定性,较好的力学性能和化学性能,但是透明度低,价格也比较贵。织物材料^[15]也可以用来作为柔性衬底。不同聚合物衬底的玻璃化转变温度如图 2 所示。

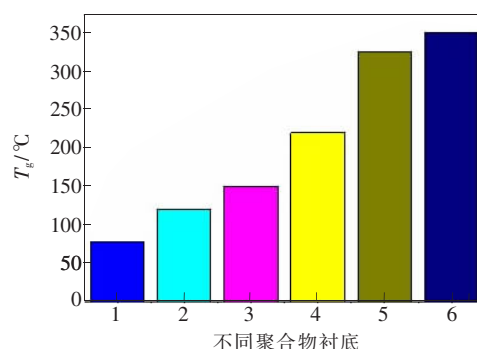


图 2 不同聚合物衬底的玻璃化转变温度

Fig. 2 Different glass transition of film substrates

为了取代玻璃衬底,期望塑料衬底具有玻璃的类似基本特性,如透明度、尺寸稳定性、热稳定性、阻隔性、耐溶剂性、低热膨胀系数和表面平滑性。目前,常用聚合物柔性衬底的性能对比如表 1 所示。

由表 1 可以看出,这些聚合物具备柔性衬底的潜力,但是仍然不够完美,依然存在着种种缺陷。因此,研究者们一直不断改善这些柔性衬底,并研发出了新的聚合物衬底。Calil 等^[16]用 PEI 作为柔性衬底,其耐高温,水分子吸收率低,介电性能优良,在可见光范围内透明性较好,退化温度为 818 K,玻璃化转变温度是 491 K,能够应用于恶劣环境中。一种新型 SiO_2 /聚酰亚胺(PI)混合膜已成功用作高性能的衬底^[17], SiO_2 含量较高时($>60\%$),混合膜具有较高模量,高的玻璃转变温度($>400\text{ }^\circ\text{C}$),较低的热膨胀系数($28 \times 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$),在 550 nm 时,可见光透过率可以达到 90%。

表 1 常用聚合物柔性衬底的性能比较

Table 1 Comparison of polymer materials for flexible substrates

聚合物	透光率/%	尺寸稳定性	耐溶剂性	水分子吸收性	表面粗糙度	热膨胀系数/(10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹)
PET	90.4	良好	良好	良好	差	33
PEN	87.0	良好	良好	良好	差	20
PC	92.0	一般	差	一般	良好	75
PES	89.0	一般	差	一般	良好	54
PAR	92.0	一般	差	差	良好	70
PI	30~60	良好	良好	差	良好	8~20

Longyan Yuan 等^[18]通过火焰合成法在柔性碳纤维织物上生长碳纳米颗粒,这种含有碳纳米颗粒的碳纤维织物的热导率为 2.34 W/(m·K),电流密度为 108 mA/cm,比大部分聚合物衬底相应大 1 个数量级和 4 个数量级。Sang Chul Ryu 等^[19]研究了一种制备玻璃纤维增强复合薄膜衬底,具有良好的光学性和力学性能,优于 PET、PC 和 PES 衬底的 OLEDs。Kim 等^[20]通过磁控溅射 ITO 膜在含氟 PI/有机黏土纳米复合材料衬底上制备柔性 OLEDs,高温处理后其表现出较低的薄膜电阻,周期性弯曲后仍然性能稳定。Yuang-Tung Cheng 等^[21]将表面处理后的 PET-HC 作为柔性衬底,其具备优良的电介质性能、热性能、化学性能和力学性能,从而被广泛应用于电气和电子行业。Chul-Ho Lee 等^[22]在石墨薄膜沉积 GaN/ZnO 纳米棒制备柔性无机 LEDs,发出很强的蓝光,为在柔性塑料衬底沉积 GaN/ZnO 纳米棒提供合理的依据。

2.2 不锈钢衬底

不锈钢衬底一般应用于透过率要求不是很高的柔性发光显示。如果应用于大型显示器,其是一种很贵的材料,而应用于小型柔性显示中,则有着较大的前景。不锈钢衬底的耐高温性能(至少在 1 000 ℃ 以上)要远远高于塑料与玻璃,在制作柔性显示过程中使用金属箔片衬底不会存在耐热方面的问题。所以不锈钢衬底也是一种常见的选择,甚至包括化学惰性的钛箔片^[23]。不锈钢衬底与其他衬底性能的比较如表 2 所示。

由表 2 可以看出,不锈钢衬底相对塑料衬底,具有良好的导电性、优秀的水汽和氧气阻隔性、更高的弹性模量、较低的热膨胀系数并能够 R2R 大规模生产。LG 曾因金属箔片衬底的高热稳定性、

表 2 不锈钢衬底与其他衬底的性能比较

Table 2 Properties of stainless steel and other substrates

性 质	不锈钢	塑料(PI)	玻璃
厚度/ μm	100	100	100
渗透性	良好	较差	良好
R2R 加工	可以	可以	不行
热膨胀系数/(10 ⁻⁶ /℃)	10	16	5
弹性模量/GPa	200	5	70
导电性	高	无	无
热导性/(W·m ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	16	0.1~0.2	1
最高加工温度/℃	1000	350	600

较低的成本和热膨胀系数而集中发展该衬底^[24]。然而,表面粗糙的箔片无法作为柔性衬底直接使用,否则会影响柔性显示的性能,降低其寿命。因此粗糙度是不锈钢取代聚合物或者玻璃衬底成为未来柔性显示器的关键因素。为了提高箔片表面光滑度,通常采用的方法有 2 种:加一层平坦化层或者加一层钝化层。OLEDs 要求表面粗糙度小于 5 nm。一般用有机物、无机物、或者有机-无机混合物作为平坦化层。有机物用量较高时,可以形成较厚的无缝薄膜,但在后期加工中受限于温度,因此平坦化层厚度控制在 1.5 μm 左右。近年来发展起来的无应力脉冲电化学抛光技术^[25]可以降低金属表面的粗糙度以及防止平坦化时施加的应力所造成的伤害。在不锈钢衬底加的钝化层,一般为无机物,如氮化硅、氧化硅等,可以阻隔加工时的化学药剂的渗透。

2.3 超薄玻璃衬底

玻璃是硬质材料,用来作为柔性衬底,需要实现将其薄化,才可能具有可挠曲性。目前已做成

的超薄玻璃厚度小于 $50\text{ }\mu\text{m}$,表现出较好的热稳定性和化学性,良好的可弯曲性,可见光透过性,水汽和氧气的阻隔性,较高的表面光滑度,而且绝缘,是理想的柔性显示衬底材料。但是超薄的玻璃韧性较差,经过周期性弯曲后容易出现裂缝。另外,超薄玻璃的边缘部位在切割操作时也比较容易产生微裂痕缺陷。Andreas Weber 等^[26]研究了薄玻璃-聚合物系统衬底,具有良好的热稳定性,力学性能和化学性能,能够达到柔性 OLED 显示器要求的柔性度和渗透性的标准,可以实现流水线生产柔性弯曲的 OLED 显示器。

2.4 纸质衬底

在过去几年中,柔性纸质衬底的电子制备开始引起了人们的关注。因为其便宜、轻薄、可以弯曲折叠、能够循环使用,所以作为柔性显示衬底,纸质也是一种不错的选择。与塑料衬底相比较,纸质衬底在加热后,热膨胀性比较小。在柔性纸质衬底上印电子元件的想法不是新鲜的,20 世纪

60 年代 Brody 和 Page^[27]在真空室用模板印刷方法将无机薄膜晶体管沉积在纸衬底上。考虑到纸质是纤维素结构,表面比较粗糙,化学性和机械阻隔性比较差,容易吸附一些小分子物质进入多孔结构。为了制备柔性显示,改善纸质衬底接触面的光滑性是非常重要的。当印刷电子元件对衬底表面平滑性和吸附性的要求较低时,在转换过程中,可将不同功能性的涂料应用于纸张表面。通过涂层,表面能够防止不同液体的渗透。最近文献^[28-29]报道了在柔性塑料衬底,甚至在纸质衬底上喷墨印刷 OTFTs。Do-Yeol 等^[30]研发了以复印纸为衬底的柔性 OLEDs,在驱动电压 13 V 时发光强度可以达到 $2\text{ }200\text{ cd/m}^2$ 。Jin-Young Kim 等^[31]为了制备优异性能的 PEL 装置,首选平滑的纸质为衬底;为了粘着和分离,选择了贴纸;最后为了一次性显示的可能性,选择杂志和报纸作为衬底,3 种不同类型纸质衬底发光装置如图 3 所示。

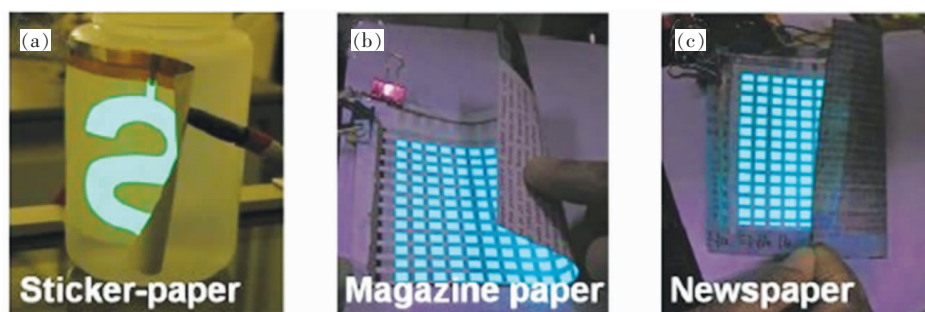


图 3 不同类型纸衬底的发光^[31]

Fig. 3 Light emission images of the EL devices on different paper substrates

最近一些研究者发现纸质的多孔性在一些电子应用中是有利的。多孔性的纸质在印刷时,与材料有着良好的黏性,有助于提高传感器灵敏度,纤维素结构的纸质被用在加载器中充当活性物质,称其为“电化学纸”或者“智能纸”^[32]。

2.5 生物复合薄膜衬底

柔性显示 R2R 加工技术至今还没有大规模应用的一个原因是传统聚合物塑料衬底的热膨胀系数比较高。大部分塑料的热膨胀系数在 $50\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ 左右,由于在衬底沉积功能层热处理时,膨胀系数的不匹配会造成装置性能的下降。细菌纤维素纳米纤维薄膜具有热膨胀系数低、可见光透过率高和柔性能良好的优点,因此近几年也被用来作为柔性显示的衬底,在有机光电子领域

的应用中引起了广泛的关注。M. Nogi 等^[33]以丙烯酸树脂和 BC 纳米纤维为基质制得了 0.7 mm BC 纳米复合膜,热膨胀系数低,在 600 nm 时透过率为 81% 。C. Legnani 等^[34]在细菌纤维膜表面依次沉积 SiO_2 缓冲层和 ITO 导电层,并以此为衬底,做出了柔性 OLEDs,其亮度可以达到 $1\text{ }200\text{ cd/m}^2$ 。S. Ummartyotina 等^[35]将聚氨酯基树脂和细菌纤维素制成纳米复合薄膜作为柔性 OLED 衬底,该装置的最高电流效率为 0.085 cd/A ,功率效率达到 0.021 lm/W

3 柔性衬底的缺陷及改善

柔性显示面临的最大的挑战是装置的寿命和稳定性。在制备过程中产生的热应力,加上电气应

力,会导致系统性能的快速衰退,从而破坏了显示的整体可靠性。衬底和密封技术是柔性显示的关键推动者。不像玻璃衬底,由于柔性衬底密度相对较低、质量轻,无法提供有效的阻隔性能,防止水汽和氧气的渗透,从而造成显示装置的氧化和金属电极剥落,有机层发生化学改变,降低显示的性能,缩短其寿命。

另外塑料衬底的表面比较粗糙,显示装置在弯曲时,这些缺陷也会导致裂缝,对 OLEDs 的性能也是有影响的。因此,为了延长柔性显示的寿命,需要对柔性衬底进行改善。

3.1 柔性衬底透明导电氧化物薄膜的改善

透明导电氧化物因为具有较高的电导率、透过率和功函数,经常被用来作为显示装置中的电极。目前,几乎所有类型显示器的共同组成部分即是柔性阳极。作为透明导电电极的主要材料是涂布在 PET 上的 ITO,其优势是价格便宜、透过率高、电阻率低等。但是对于 ITO 而言,In 是稀有元素,世界储量较少而且薄膜中 In_2O_3 的含量比较高,所以成本也比较大。另外,由于 ITO 比较脆,在经过周期性多次弯曲或者压缩后,容易产生裂缝,使显示的导电性失败。再加上低温沉积在相匹配的塑料衬底时,ITO 表现出相对高的表面电阻和粗糙度。因此,有必要研发一些新型柔性透明电极材料替代 ITO 电极,比如 CNTs^[36]、石墨^[37] 和网状结构的金属纳米线^[38]。Mansu Kim 等^[39] 通过 EDOT 的原位聚合,在 PES 衬底上沉积导电和透明的 PEDOT:FTS 膜,然后将 DMAc 引入到 EDOT 单体和氧化剂的聚合混合物中,制备出 DMAc-PEDOT:FTS 阳极电极膜,有较高的功函数(4.67 eV),在电流密度 260 mA/cm² 时,光效率为 1.75 cd/A,最大发光亮度可达 4 500 cd/m²。Xiao-Yan Zeng 等先通过空气辅助的多元醇的方法制备 AgNW,然后再真空过滤和转移沉积在 PET 衬底上,制备了结构为 AgNWs-PVA/PEDOT:PSS/NPB/Alq₃/LiF/Al 的柔性发光装置,与 ITO 相比表现出更高的功率效率,热稳定性和力学性能^[40]。Ching-Ming Hsu 等^[41] 报道在 ITO 里掺杂 Pt 作为阳极,提高了 ITO 表面功函数,降低 ITO 的表面粗糙度,电流效率更高。Yong Chan Cho 等^[42] 研发了以 PES 为衬底 Al 掺杂 ZnO(AZO)的导电薄膜,通过改变 Al 掺杂的浓度,降低 AZO 薄膜的表面粗糙

度,进而改善其润湿性,提高薄膜与柔性衬底的黏着性。Axel Schindler 等^[43] 将 SWNT 粉末溶于含十二烷基磺酸钠的溶液中,利用喷涂的方法在 PEN、PES 等柔性衬底上制备了透明导电薄膜晶体管,透过率为 80%。

另外,作为有效的 OLEDs 低功函数,如 Mg、Al 等金属被用来做阴极,这些阴极材料因弯曲后容易剥落,会降低显示装置性能。Lian Duan 等^[44] 成功制备了 Al/Alq₃/Al 作为阴极,反复弯曲后表现出良好的电阻性,Al/Alq₃/Al 装置在发光面没有黑斑和裂缝,阴极力学稳定性增加,柔性 OLEDs 的寿命得到改善。

3.2 单层阻隔层沉积的改善

商业 OLED 显示器为了保证长久的工作寿命,一般要求在室温(25 ℃)时渗透率小于 10⁻⁶ g/(m²·d),而通常塑料衬底在室温时的渗透率是 10⁻¹~10⁰ g/(m²·d)。相对于商业 FOLED 产品的寿命要求,塑料衬底的渗透率没有达到标准。在以前的很多文献报道中,传统方法是在惰性环境下密封装置,玻璃盖用 UV 固化环氧树脂固定,装置里还放有干燥剂以便吸附残留的水分,从而延长显示寿命。但是这些材料都是硬质的,不适合柔性显示,另外密封过程繁琐,成本又高。为了降低成本,使显示器能够柔性化,在柔性衬底沉积一层阻隔层,直接与活性层接触,降低水汽和氧气的渗透率,延长柔性显示的工作寿命。图 4 为柔性衬底沉积阻隔层简单结构图。

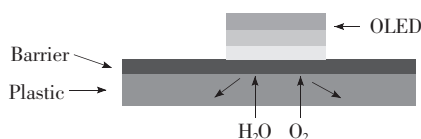


图 4 柔性衬底沉积阻隔层简单结构图

Fig. 4 Deposited barrier layer on flexible substrates

单层薄膜阻隔层一般是由 MgO、Al₂O₃ 或者 SiO₂ 等构成。很多氧化物像 SiO₂ 一样有着较好的阻隔性,能够在一定程度上降低氧气和水汽的渗透,但是阻隔性能不够理想。传统的薄膜单层阻隔最多可以将柔性衬底的阻隔氧气传输速率(OTR)性能提高 2~3 个数量级。沉积阻隔层的方法有:等离子体增强化学气相沉积(PECVD)、溅射或者蒸发等。然而这些薄膜沉积在塑料衬底上,经常会产生缺陷,如针孔和裂缝,这些缺陷就

成为气体渗透的直接穿透渠道。Chen-Ming Chen 等^[45]在金属电极上沉积 LiF 作为保护层,通过紫外照射制备密封黏合剂旋涂在 LiF 层上,其装置工作寿命明显延长。

3.3 多层阻隔层沉积的改善

在柔性显示中,单层阻隔的改善很难有效维持显示装置的工作长久性,特别是氧化物或者氮化物。在拉伸应力下,这些材料也会有裂缝,容易让水汽和氧气渗透。在这方面,多层阻隔就表现出更加坚固耐用的性能。多层结构可以有效地降低各层材料之间的相互影响,有机膜可以防止阻隔层的机械损伤。Yongjin Kim 等^[46]制备 SiN_x (100 nm)/ Al_2O_3 (50 nm)/聚对二甲苯多层阻隔层,其水汽渗透率为 $2.6 \times 10^{-5} \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。Yun Cheol Han 等^[47]通过溶胶凝胶法合成聚合脂环族环氧树脂混合材料与 MgO 构成复合层,水蒸气传输速率为 $4.9 \times 10^{-5} \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。F. L. Wong 等^[48]通过磁控共溅射 CaO 和 Al_2O_3 形成共氧化层,与 CF_x 交替构成多层阻隔层,该显示工作时间超过 18 000 h。J. Meyer 等^[49]通过 ALD 技术沉积 Al_2O_3 和 ZrO_2 ,其装置连续工作 10 000 h 后,装置亮度仍然可以达到初始亮度的 95%。

通过热加工工艺在衬底沉积多层不同功能材料,由于热循环可能会造成每层材料的热膨胀系数的不匹配,在碰到应力时也容易出现裂缝,降低柔性显示的工作性能。

4 喷墨印刷及 R2R 技术应用于柔性衬底

从报纸行业借鉴来的印刷技术被认为可适用于生产大量的柔性电子产品,尤其是数码喷墨印刷已被用来作为一种低成本的生产技术,在过去几年里,逐渐引起了人们的兴趣。传统的薄膜沉积技术如溅射或者蒸发,这些加工技术影响着材料微结构,从而使电性能和力学性能不稳定。另外由于传统加工条件的不同,材料的选择也会

受到一定的限制。

喷墨印刷技术的优点如制备步骤简单、成本较低、不需要化学加工、可以通过溶液在指定的表面区域沉积一小块功能材料,在薄膜沉积的同时还可以实现图案化,这样减少了材料的浪费。IJP 的另外一个特性优势是对衬底的缺陷不很敏感,允许在不同功能的薄膜上无接触沉积图案化,低成本和可扩展性大规模生产薄膜。当然,IJP 也有一些缺点,如:要时刻保持喷头清洁、印刷膜的厚度依赖于下落的液滴、干燥过程也会降低厚度的均匀性等。

对于大面积生产柔性电子产品,提高经济效益,卷对卷是个相对完美的技术。R2R 制造过程就是在卷曲的柔性衬底上创造微观结构。R2R 加工相对于传统的分批加工有着明显的优势,可以更高水平的自动化运行,降低了辅助操作时间和污染水平,从而增加了生产量。Yong-Seok Park 等^[50]在室温下,通过 R2R 技术在 PET 衬底沉积 IZO,表面电阻 $17.25 \Omega/\square$,在 550 nm 时光学透过率为 89.45%,柔性比 ITO 更好。

柔性电子研究发展多年,大规模生产应用 R2R 技术进入市场仍然有很多技术问题。比如柔性衬底的处理和调整、有机材料膜形成质量、柔性导体导电性和功函数、印刷质量、灵活操作、初期质量和价格等。

5 结 论

柔性显示代表着新一类的显示器,便宜、轻便、牢固耐用、高效、能够 R2R 大规模应用生产。另外,柔性显示器开辟了新的领域,如非平面显示器,飞机或者士兵面罩上的显示,在未来的显示行业中必将会成为最终的选择。然而柔性显示完全大规模进入市场,仍然有很多基础问题需要解决。将革新的印刷和密封技术合并制备柔性显示,相信在不久的将来折叠式纸质柔性显示必将走进我们的生活。

参 考 文 献:

- [1] Ju S, Li J, Liu J, *et al.* Transparent active matrix organic light-emitting diode displays driven by nanowire transistor circuitry [J]. *Nano. Lett.*, 2008, 8(4):997-1004.
- [2] Bae S, Kim H, Lee Y, *et al.* Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes [J]. *Nature Nanotechnology*, 2010, 5(8):574-578.

- [3] Sekitani T, Nakajima H, Maeda H, *et al.* Stretchable active-matrix organic light-emitting diode display using printable elastic conductors [J]. *Nature Materials*, 2009, 8(6):494-499.
- [4] Someya T. Flexible electronics: Tiny lamps to illuminate the body [J]. *Nature Materials*, 2010, 9(11):879-880.
- [5] Eritt M, May C, Leo K, *et al.* OLED manufacturing for large area lighting applications [J]. *Thin Solid Films*, 2010, 518(11):3042-3045.
- [6] Someya T, Kato Y, Sekitani T, *et al.* Conformable, flexible, large-area networks of pressure and thermal sensors with organic transistor active matrixes [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102(35):12321-12325.
- [7] Logothetidis S, Laskarakis A. Towards the optimization of materials and processes for flexible organic electronics devices [J]. *The European Physical Journal Applied Physics*, 2009, 46(1):12502(1-9).
- [8] Hanada T, Negishi T, Shiroishi I, *et al.* Plastic substrate with gas barrier layer and transparent conductive oxide thin film for flexible displays [J]. *Thin Solid Films*, 2010, 518(11):3089-3092.
- [9] Hill P. iSuppli flexible displays report [R]. *Flex. Substr.*, 2006, 2(5):21-25.
- [10] Choi M C, Kim Y, Ha C S. Polymers for flexible displays: From material selection to device applications [J]. *Progress in Polymer Science*, 2008, 33(6):581-630.
- [11] Choi M C, Hwang J C, Kim C, *et al.* New colorless substrates based on polynorbornene-chlorinated polyimide copolymers and their application for flexible displays [J]. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 2010, 48(8):1806-1814.
- [12] Jin H S, Chang J H, Kim J C. Synthesis and characterization of colorless polyimide nanocomposite films containing pendant trifluoromethyl groups [J]. *Macromolecular Research*, 2008, 16(6):503-509.
- [13] Yeh Y, Cheng C, Ho K, *et al.* 7-inch Color VGA flexible TFT LCD on colorless polyimide substrate with 200 °C a-Si:H TFTs [J]. *SID International Symposium Digest of Technical Papers*, 2007, 38(2):1677-1679.
- [14] Long K, Kattamis A, Cheng I C, *et al.* Stability of amorphous-silicon TFTs deposited on clear plastic substrates at 25 °C to 28 °C [J]. *Electron Device Letters, IEEE*, 2006, 27(2):111-113.
- [15] Shiyonovskaya I, Khan A, Green S, *et al.* Single-substrate encapsulated cholesteric LCDs: Coatable, drapable, and foldable [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2006, 14(2):181-186.
- [16] Calil V L, Legnani C, Moreira G F, *et al.* Transparent thermally stable poly(etherimide) film as flexible substrate for OLEDs [J]. *Thin Solid Films*, 2009, 518(5):1419-1423.
- [17] Liu J M, Lee T M, Wen C H, *et al.* High performance organic-inorganic hybrid plastic substrate for flexible display and electronics [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2011, 19(1):63-69.
- [18] Yuan L, Tao Y, Chen J, *et al.* Carbon nanoparticles on carbon fabric for flexible and high-performance field emitters [J]. *Advanced Functional Materials*, 2011, 21(11):2150-2154.
- [19] Ryu S C, Kim J W, Vu Q H, *et al.* Fabrication of glass fiber reinforced composite films for flexible organic light emitting diode devices [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2009, 514(1):1-13.
- [20] Kim J H, Choi M C, Kim H, *et al.* Colorless polyimide/organoclay nanocomposite substrates for flexible organic light-emitting devices [J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2010, 10(1):388-396.
- [21] Morent R, De Geyter N, Leys C, *et al.* Study of the ageing behaviour of polymer films treated with a dielectric barrier discharge in air, helium and argon at medium pressure [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2007, 201(18):7847-7854.
- [22] Lee C H, Kim Y J, Hong Y J, *et al.* Flexible inorganic nanostructure light-emitting diodes fabricated on graphene films [J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(40):4614-4619.
- [23] Zardetto V, Brown T M, Reale A, *et al.* Substrates for flexible electronics: A practical investigation on the electrical, film flexibility, optical, temperature, and solvent resistance properties [J]. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 2011, 49(9):638-648.
- [24] Paek S H, Park Y I, Park C H, *et al.* Distinguished paper: Flexible display technology for mass production using improved etching technology [J]. *SID Symposium Digest*, 2010, 41(1):1047-1049.
- [25] Zhao Z Y, Zhou G T, Zhang S Z, *et al.* Technology of pulse electrochemical polishing of stainless steel [J].

- Applied Mechanics and Materials*, 2011, 44(1):3031-3035.
- [26] Weber A, Deutschbein S, Plichta A, *et al.* Thin glass-polymer systems as flexible substrates for displays [J]. *Society for Information Display 2002 International Symposium*, 2002, 33(1):53-55.
- [27] Brody T P. The thin film transistor-A late flowering bloom [J]. *Electron Devices, IEEE Transactions on*, 1984, 31(11):1614-1628.
- [28] Ko S H, Pan H, Grigoropoulos C P, *et al.* All-inkjet-printed flexible electronics fabrication on a polymer substrate by low-temperature high-resolution selective laser sintering of metal nanoparticles [J]. *Nanotechnology*, 2007, 18(34):345202(1-8).
- [29] Ko S H, Chung J, Pan H, *et al.* Fabrication of multilayer passive and active electric components on polymer using inkjet printing and low temperature laser processing [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 134(1):161-168.
- [30] Yoon D Y, Moon D G. Bright flexible organic light-emitting devices on copy paper substrates [J]. *Current Applied Physics*, 2011, 4(1):1-4.
- [31] Kim J Y, Park S H, Jeong T, *et al.* Paper as a substrate for inorganic powder electroluminescence devices [J]. *Electron Devices, IEEE Transactions on*, 2010, 57(6):1470-1474.
- [32] Töbörk D, Österbacka R. Paper electronics [J]. *Adv. Mater.*, 2011, 23(17):1935-1961.
- [33] Nogi M, Yano H. Transparent nanocomposites based on cellulose produced by bacteria offer potential innovation in the electronics device industry [J]. *Adv. Mater.*, 2008, 20(10):1849-1852.
- [34] Legnani C, Vilani C, Calil V, *et al.* Bacterial cellulose membrane as flexible substrate for organic light emitting devices [J]. *Thin Solid Films*, 2008, 517(3):1016-1020.
- [35] Ummartyotin S, Juntaro J, Sain M, *et al.* Development of transparent bacterial cellulose nanocomposite film as substrate for flexible organic light emitting diode (OLED) display [J]. *Industrial Crops and Products*, 2011, 35(1):92-97.
- [36] Lee J H, Shin D W, Makotchenko V G, *et al.* One-step exfoliation synthesis of easily soluble graphite and transparent conducting graphene sheets [J]. *Adv. Mat.*, 2009, 21(43):4383-4387.
- [37] Kim K S, Zhao Y, Jang H, *et al.* Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes [J]. *Nature*, 2009, 457(7230):706-710.
- [38] De S, Higgins T M, Lyons P E, *et al.* Silver nanowire networks as flexible, transparent, conducting films: Extremely high DC to optical conductivity ratios [J]. *ACS. Nano*, 2009, 3(7):1767-1774.
- [39] Kim M, Lee Y S, Kim Y C, *et al.* Flexible organic light-emitting diode with a conductive polymer electrode [J]. *Synthetic Metals*, 2011, 161(21-22):2318-2322.
- [40] Zeng X Y, Zhang Q K, Yu R M, *et al.* A new transparent conductor: silver nanowire film buried at the surface of a transparent polymer [J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(40):4484-4488.
- [41] Hsu C M, Huang C Y, Cheng H E, *et al.* Flexible organic light-emitting diodes consisting of a platinum doped indium tin oxide anode [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, 42(10):105301(1-5).
- [42] Cho Y C, Cha S Y, Shin J M, *et al.* The conversion of wettability in transparent conducting Al-doped ZnO thin film [J]. *Solid State Communications*, 2009, 149(15-16):609-611.
- [43] Schindler A, Brill J, Fruehauf N, *et al.* Solution-deposited carbon nanotube layers for flexible display applications [J]. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 2007, 37(1):119-123.
- [44] Duan L, Liu S, Zhang D Q, *et al.* Improved flexibility of flexible organic light-emitting devices by using a metal/organic multilayer cathode [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2009, 42(1):075103(1-4).
- [45] Chen C M, Chung M H, Hsieh T E, *et al.* Ultraviolet-assisted synthesis of encapsulating adhesives and their application for lifetime improvement of organic light emitting diodes [J]. *Current Applied Physics*, 2009, 9(4):746-749.
- [46] Kim Y, Kim N, Kim H, *et al.* The development of thin film barriers for encapsulating organic electronics [C]// *Electronic Components and Technology Conference*, Lake Buena Vista, US; Institute of Electrical and Electronics Engineering Inc., 2011:2101-2106.

- [47] Han Y C, Jang C, Kim K J, *et al.* The encapsulation of an organic light-emitting diode using organic-inorganic hybrid materials and MgO [J]. *Organic Electronics*, 2011, 12(4):609-613.
- [48] Wong F, Fung M, Ng C, *et al.* Co-sputtered oxide thin film encapsulated organic electronic devices with prolonged lifetime [J]. *Thin Solid Films*, 2011, 520(3):1131-1135.
- [49] Meyer J, Schneidenbach D, Winkler T, *et al.* Reliable thin film encapsulation for organic light emitting diodes grown by low-temperature atomic layer deposition [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(23):233305(1-3).
- [50] Park Y S, Kim H K, Jeong S W, *et al.* Highly flexible indium zinc oxide electrode grown on PET substrate by cost efficient roll-to-roll sputtering process [J]. *Thin Solid Films*, 2010, 518(11):3071-3074.

科技参考文献著录的规则

根据中华人民共和国国家标准“文后参考文献著录规则”(GB/T7714-2005),《液晶与显示》编辑部希望广大作者在向本刊投稿时注意参考文献的著录。

1. 文后参考文献书写格式

期刊:[序号]作者. 文献题名[文献类型标志]. 连续出版物题名:其他题名信息, 年份, 卷号(期号):起止页码[引用日期]. 获取和访问路径.

例:[1]凌志华. STN-LCD 技术的发展[J]. 液晶与显示, 2002, 17(4):233-242.

例:[2]李晓东, 张庆红, 叶瑾琳. 气候学研究的若干理论问题[J]. 北京大学学报:自然科学版, 1999, 35(1):101-106.

例:[3]邵喜斌, 王丽娟, 李梅. a-Si:H TFT 亚阈值区 SPICE 模型的研究[J/OL]. 液晶与显示, 2005, 20(4):267-272. [2005-10-18]. http://www.wanfangdata.com.cn/src/szhqk/wf_szhqk_browser.Asp.

专著:[序号]作者. 题名[文献类型标志]. 析出文献其他责任者//专著主要责任者. 专著题名:其他题名信息. 版本项(第1版略). 出版地:出版者, 出版年:析出文献的页码[引用日期]. 获取和访问路径.

例:[4]周其凤, 王新久. 液晶高分子[M]. 北京:科学出版社, 1994:27-38.

例:[5]日本学术振兴会第142委员会. 液晶器件手册[M]. 黄锡珉, 黄辉光, 李之熔, 译. 北京:航空工业出版社, 1992.

例:[6]母国光. 白光光学信息处理及彩色摄影术[M]//陈星旦. 光学与光学工程, 北京:科学出版社, 2005:62-72.

例:[7]赵耀东. 新时代的工业工程师[M/OL]. 台北:天下文化出版社, 1998[1998-09-26]. [http://www.ie.nthu.edu.tw/inf/ie.newie.htm\(Big5\)](http://www.ie.nthu.edu.tw/inf/ie.newie.htm(Big5)).

例:[8]陈兵, 徐寿颐. 新型烷基环己基炔类液晶的合成与性质[C]//2002年中国平板显示会议论文集. 深圳:深圳天马微电子股份有限公司, 2002:167-168.

例:[9]闫石. 液晶光控取向膜材料的研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2001.

例:[10]全国文献工作标准化技术委员会第七分委员会. GB/T5795-1986 中国标准书号[S]. 北京:中国标准出版社, 1986.

专利:[序号]专利所有者. 专利题名:专利国别, 专利号[文献类型标志]. 公告日期或公开日期[引用日期]. 获取和访问路径.

例:[11]吕永积, 王群伟, 邵佑军, 等. 平板真空摄像器件:中国, ZL95241185.7[P]. 1997-08-09.

(下转 P676)

参考文献:

- [1] 许化民. 单级功率因数校正技术 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2001.
- [2] Lee B H. A new single-stage PFC AC/DC converter with link-capacitor voltage [J]. *J. Power Electronics*, 2007, 7(4): 328-334.
- [3] 李渊. LED 可调光自动控制系统设计 [J]. *液晶与显示*, 2011, 26(1): 96-99.
- [4] 余娇. 小功率 LED 日光灯控制器设计 [D]. 西安: 陕西科技大学, 2011.
- [5] 刘琦. 可单组调光的 LED 驱动设计 [J]. *机电工程*, 2011, 28(8): 992-995.

(上接 P607)

例:[12]西安电子科技大学. 光折变自适应光外差探测方法:中国,01128777.2[P/OL]. 2002-03-06[2002-05-28]. <http://211.152.9.47/sipoasp/zljs/hyis-yx-new.asp?recid=01128777.2&leixin=0>.

电子文献:[序号]主要责任者. 题名:其他题名信息[文献类型标志]. 出版地:出版者,出版年(更新或修改日期)[引用日期]. 获取和访问路径.

例:[13]PACS-L: the public-access computer systems forum[EB/OL]. Houston,Tex: University of Houston Libraries, 1989[1995-05-17]. [http:// info. lib. edu/pacsl. html](http://info.lib.edu/pacsl.html).

例:[14]Online Computer Library Center, Inc. History of OCLC [EB/OL]. [2000-01-08]. <http://www.oclc.org/about/history/default.htm>.

2. 文后参考文献应在正文中引用该文献处进行标注。
3. 关于作者姓名,姓在前,名在后(拉丁文只用缩写);作者 3 人以下应全部列出,4 人以上仅列出前 3 人,其后加“等”(外文加“et al”)。
4. 注意参考文献标注的标点符号、次序,并不得缺项。
5. 参考文献著录不规范的有可能影响文章的录用。

注:文献类型和电子文献载体标志代码:

文献类型和标志代码

文献类型	标志代码	文献类型	标志代码
普通图书	M	报告	R
会议录	C	标准	S
汇编	G	专利	P
报纸	N	数据库	DB
期刊	J	计算机程序	CP
学位论文	D	电子公告	EB

电子文献载体和标志代码

载体类型	标志代码
磁带(magnetic tape)	MT
磁盘(disk)	DK
光盘(CD-ROM)	CD
联机网络(online)	OL