

有机薄膜晶体管的发展现状、机遇与挑战

冯林润^{1,2}, 唐伟¹, 郭小军¹

1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240
2. 英国 NeuDrive 有限公司, 英国柴郡 SK10 4TG

摘要 由于有机薄膜晶体管(OTFT)可采用低温低成本印刷工艺按需加工,及其良好的机械柔韧性和不断提升的器件性能,获得了学术界和产业界的密切关注,在包括柔性显示和传感器等诸多领域展现了巨大的应用潜力,但目前 OTFT 离大规模产业化还存在一定距离。结合市场实际需求,对 OTFT 现阶段的发展现状、机遇与存在的挑战进行总结。

关键词 有机薄膜晶体管;柔性显示;传感器;印刷电子

金属-氧化物-半导体场效应晶体管(metal-oxide-semiconductor field-effect transistors, MOSFET)自 1960 年在贝尔实验室问世以来,作为核心开关电子元件,推动整个半导体集成电路产业按照摩尔定律^[1]迅猛发展。MOSFET 是现代信息技术快速发展的重要组成部分,对人们的工作生活做出了巨大的贡献。近几十年来,随着显示技术开始在信息交互中扮演着越来越重要的角色,薄膜晶体管(thin-film transistor, TFT)技术得到了越来越多的关注。与 MOSFET 以微电子产业为核心不同, TFT 技术以平板显示行业为支撑,在大面积电子领域取得了广泛的应用。

薄膜晶体管 TFT 是一种关键半导体元件,能够实现包括逻辑开关、提供驱动电流和信号处理在内的多种功能,是

显示驱动背板及传感器阵列的重要组成部分^[2-3]。图 1 为常见的液晶平板显示(liquid crystal displays, LCDs)和有机发光二极管(organic light emitting diode, OLED)显示示意图, TFT 起着至关重要的驱动作用。TFT 所采用的半导体材料体系主要包括以下类型:非晶硅(amorphous silicon, a-Si)^[4]、低温多晶硅(low temperature poly-silicon, LTPS)^[5]、非晶金属氧化物(amorphous metal oxide semiconductor, AOS)^[6]及有机半导体^[7]。其中 a-Si TFT 技术路线由于良好的均一性和可加工性,被全球各大显示面板厂商(如韩国三星电子、韩国 LG、日本夏普、友达光电股份有限公司、京东方科技集团股份有限公司、深圳市华星光电技术有限公司等)采纳,在 LCD 领域占据了主导地位。近年来,随着 LCD 技术的不断发展和新型显

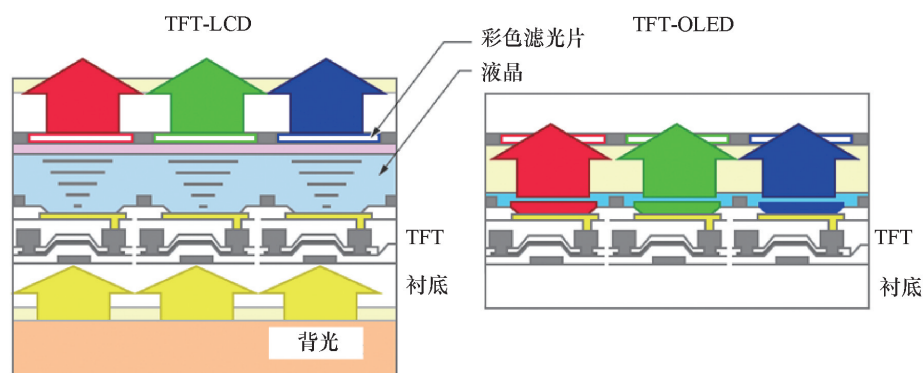


图 1 TFT-LCD 和 TFT-OLED 显示的界面结构示意图

Fig. 1 Illustration of the cross-sectional structure of the TFT-LCD and TFT-OLED displays

收稿日期:2017-06-25;修回日期:2017-08-01

作者简介:冯林润,博士,研究方向为有机薄膜晶体管,电子信箱:linrun.feng@neudrive.com;郭小军(通信作者),教授,研究方向为印刷柔性电子,电子信箱:x.guo@sjtu.edu.cn

引用格式:冯林润,唐伟,郭小军.有机薄膜晶体管的发展现状、机遇与挑战[J].科技导报,2017,35(17):37-45;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2017.17.004

示技术如 OLED 的后来居上,对 TFT 的迁移率和稳定性都提出了更高要求。以韩国三星电子为代表的面板厂商开发出了 LTPS TFT 技术,比 a-Si TFT 拥有更高的迁移率和更好的稳定性,在高端 LCD 和新型 OLED 显示中取得了应用。然而,由于 LTPS TFT 需要特殊的激光退火工艺,工艺成本较高,使其产线尺寸难以进一步扩大(<G6),限制了在低成本和大面积显示领域的应用。从 2004 年以来,以日本夏普为代表的面板厂商开发的 AOS TFT 技术由于较高的迁移率,以及可与 a-Si 比拟的可加工性,也被迅速采用于高分辨率 LCD 和大尺寸 OLED 显示。

与无机材料相比,有机材料分子之间的结合力通常为较弱的分子间范德华力(无机材料分子之间通常为共价键或者离子键),因此 OTFT 比无机 TFT 拥有更好的本征机械柔韧性^[8-9]。与此同时,有机材料具备来源丰富、可降解、可低温低成本溶液法大面积印刷/涂布工艺加工等重要优势,可以在包括塑料纸张等普通基板上加工制备^[10]。更进一步,与无机材料相比,有机材料分子结构设计灵活,器件结构灵活,可以真正实现按需制造,以灵活满足不同的应用场景。正因如此,作为一种开关半导体器件平台性技术,OTFT 被视为印刷电子的重要组成部分,能够应用于包括柔性显示和传感器在内的诸多领域^[11-13]。近年来,随着学术界和企业界的不断努力,围绕着 OTFT 材料、工艺、器件、电路和系统集成等工作取得了瞩目进展。OTFT 的迁移率已经远远超过了 a-Si TFT,基于 OTFT 的应用示例层出不穷。

然而,迄今为止,与无机 TFT 已经大规模量产相比,OTFT 离大规模产业化还有距离。本文将结合市场实际需求,总结现阶段 OTFT 的发展现状、机遇与挑战。

1 OTFT 的发展机遇

显示行业作为信息交互的重要依托,是除半导体芯片之外的又一个重要高端制造行业,在全世界范围尤其是中国得到了爆发式的增长。从 2004 年中国大陆第一条 G5 显示器生产线投产开始,迄今为止,中国大陆新型显示产业已累计投资约 4800 亿美元。预计到 2020 年,仅中国大陆的 G5.5 以上生产线就会超过 30 条。随着人们对显示屏幕的便携性、佩戴舒适性、不易碎等各种特性的需求日益增长,柔性显示已经被视为平板显示行业不可逆的发展趋势。根据环球透视机构(IHS)预测,2020 年仅柔性显示市场可以达到 400 亿美元^[14],如图 2 所示。

另一方面,与传统的真空薄膜加工工艺相比,印刷工艺具备低成本、低温与塑料衬底兼容、可大面积加工、按需制造等显著优势,在包括柔性显示、传感器等体量巨大的市场具有重要的应用价值。Global Industry Analysts 公司预测,2020 年印刷柔性传感器市场能够达到 100 亿美元^[15]。

由于强大的市场驱动力和技术本身的重要奠基性,2016 年 7 月 28 日,《“十三五”国家科技创新规划》印发,提出将柔性显示/印刷显示等相关技术作为《“十三五”国家科技创新规



图2 全球柔性显示市场预测(来源:IHS)

Fig. 2 Market forecast for the global flexible display (source: IHS)

划》的重点发展方向。紧随其后,科学技术部于 2016 年 11 月设立了战略性先进电子材料重点专项——“印刷 OLED 显示关键材料与器件技术”及“印刷 TFT 材料与器件”项目。由深圳市华星光电技术有限公司和天马微电子集团牵头成立的广东聚华印刷显示技术有限公司也于 2017 年 1 月应运而生。京东方科技集团股份有限公司也于 2017 年 2 月在合肥建立印刷显示技术平台。

在大面积电子(包括显示和传感)领域,TFT 是必须的基础元器件。在目前的 TFT 技术路线中,OTFT 拥有最好的柔韧性及最适合印刷工艺加工的材料特性。结合技术本身固有优势、市场需求、资本力量和政府层面的强有力支持,OTFT 这一新兴技术平台已经有了非常好的产业化基础。有理由相信,OTFT 已经迎来了千载难逢的发展机遇,随着中国在显示行业扮演着越来越重要的龙头角色,OTFT 技术在中国的发展将会是技术本身和整个显示行业革新的关键所在。

2 OTFT 发展现状

分别针对 OTFT 材料、工艺与器件、应用示例和量产情况等方面介绍 OTFT 的发展现状。

2.1 材料

OTFT 按照栅极的位置(顶栅和底栅)及源漏电极和半导体层之间的相对位置(半导体层在电极上面称为底接触,半导体层在电极下面称为顶接触),主要包括如图 3 所示 4 种常见结构。任意结构的 OTFT 都由衬底,栅、源、漏电极,绝缘层和有机半导体层等关键部分组成。

2.1.1 有机半导体层材料

有机半导体是 OTFT 最重要的组成部分之一,承担着载流子传输的核心作用,是决定 OTFT 器件性能的主要因素。有机半导体按照材料类别主要分为小分子半导体和聚合物半导体,按照传输载流子类型分为 p 型半导体和 n 型半导体。在早期阶段,学术界的研究是带来有机半导体材料快速发展的主要驱动力。可以印刷工艺加工的有机半导体材料按照不同类型主要有以下 4 种:1) p 型小分子半导体材料,如 6,13-bis (triisopropyl- silylethynyl) pentacene (TIPS- pentacene)^[16]、2,8- difluoro- 5,11- bis (triethylsilylethynyl) anthradi-

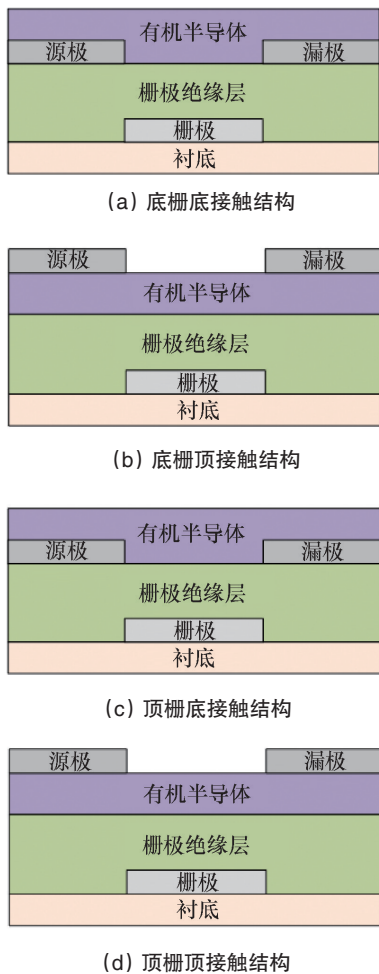


图3 4种常见的OTFT结构示意图

Fig. 3 Four typical OTFT device structures

thiophene (diF-TESADT)^[17]和 2,7-Dioctyl^[11]benzothieno[3,2-b]^[11]benzothiophene (C8-BTBT)^[18]等; 2) p型聚合物半导体材料, 如 poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) (P3HT)^[19]、polyquaterthiophenes (PQTs)^[20]和 indacenodithiopheneco-benzothiadiazole (IDT-BT)^[21]等; 3) n型小分子半导体材料, 如富勒烯 C60^[22]和 NDI3HU-DTYM2^[23]等; 4) n型聚合物半导体材料, 如 poly([N,N0-bis(2-octyldecyl)-naphthalene-1,4,5,8-bis(dicarboximide)-2,6-diyl]-alt-5,50-(2,20-bithiophene)) (P(NDI2OD-T2))^[24]等。目前, 有报道的OTFT的迁移率已经远超过a-Si水平(0.5~1 cm²·V⁻¹·s⁻¹), 最高达到几十 cm²·V⁻¹·s⁻¹量级^[25], 显示出了OTFT的巨大潜力。然而, 由于OTFT的电学特性并不完全符合场效应晶体管(field effect transistor, FET)的模型, 现阶段一些直接按照FET模型提取出的参数可能会存在远高于实际的情况^[26]。

除了学术界之外, 近几年来以欧洲公司为核心力量的产业界也已经具备了大规模量产高性能有机半导体材料的能力。如英国 NeuDrive 公司的 FlexOSTM、巴斯夫股份公司 BASF 的 P5100、德国默克集团的 Lisicon 系列和 Smartkem 的 TruFlex。以 NeuDrive 的 FlexOSTM 为例, 在沟道长度小于 10

μm 情况下, 迁移率接近 5 cm²·V⁻¹·s⁻¹, 目前每个月可以稳定供应几百升 FlexOSTM, 并且具有继续扩张材料产能的能力。

2.1.2 绝缘层材料

绝缘层是 OTFT 的另外一个重要组成部分, 处在栅极和沟道层(半导体层绝缘层界面)之间主要起绝缘作用, 从而让栅极起到控制载流子密度的作用。早期主要采用真空工艺加工的无机绝缘层材料, 如二氧化硅^[27]、氮化硅^[28]、氧化铝^[29]等。虽然真空加工的无机绝缘层材料拥有很好的绝缘性能, 但是从工艺成本、柔韧性和充分发挥 OTFT 技术独特优势等角度讲, 溶液法的聚合物绝缘层材料更适合 OTFT 工业化生产的材料选择。常见的溶液法聚合物绝缘层材料包括: 氟化绝缘层 (CYTOP)^[30]、聚苯乙烯 (polystyrene, PS)^[31]、聚乙烯醇 (poly(vinyl alcohol), PVA)^[32]、聚甲基丙烯酸甲酯 (polymethylmethacrylate, PMMA)^[30]、苯并环丁烯 (benzocyclobutene, BCB)^[33]、聚乙烯醇肉桂酸酯 (poly(vinyl cinnamate), PVC)^[34]和光刻胶 SU8^[35]等。然而, 上述绝缘层材料的介电常数通常较低 ($k < 10$), 为了增大栅极电容从而降低 OTFT 的工作电压, 一些高介电常数的绝缘层材料, 如 cyanoethylpullulan (CYE-PL, $k=12$)^[36]和铁电材料 poly(vinylidene fluoridetrifluoroethylene-chlorofluoroethylene)[P(VDF-TrFE-CFE), $k > 60$]^[37]也被用于 OTFT。为了避免高介电常数绝缘层的极化作用影响沟道载流子传输和器件偏压稳定性^[30], 在高介电常数绝缘层与半导体层之间添加一层低介电常数的绝缘层构成双层绝缘层体系用以改善器件性能也已经得到了应用和有效验证^[38]。

除了上述绝缘层材料之外, NeuDrive BASF、Merck 等主要 OTFT 厂商也拥有自己的配套绝缘层材料体系, 用来匹配其半导体产品, 从而提供最优的 OTFT 器件性能。

2.1.3 电极材料

OTFT 的栅电极可以采用常见的导电金属和导电聚合物, 栅极在不同偏压条件下实现调控沟道层载流子浓度的功能。与栅电极相比, OTFT 的源漏电极直接和半导体层接触, 分别控制载流子的注入和收集, 对器件性能起着至关重要的作用。常见的源漏电极包括金^[16]、银^[32]、铜^[39]、钼^[40]和氧化铟锡^[41]等, 为了改善源漏电极和半导体层的接触, 通常源漏电极的表面会修饰一层功能性单分子自组装薄膜^[42]。

2.1.4 衬底材料

与无机 TFT 相比, OTFT 最大的优势在于除了可以在传统玻璃衬底上制备之外, 由于可低温溶液法印刷工艺制备, 能够在包括低成本塑料聚对苯二甲酸乙二酯 PET^[43]、聚对苯二甲酸乙二醇酯 PEN^[44], 甚至在纸张^[45]和纸币^[46]在内的各种柔性衬底上制备。

除了上述材料之外, 结合具体应用情况, 有时也会需要如缓冲层和封装层等其他配套材料。

OTFT 的制备会涉及多层材料和多次溶液法工艺, 在选择器件结构和材料体系时候, 需要保证相邻层之间的溶剂正交性(不会相互影响)。因此, OTFT 的研究和产业化并不是单独针对某一材料和工艺, 而应该是具有实用价值的一整套

材料和工艺。由于有机分子本身的结构可设计性以及相对于易于合成, OTFT技术积累了丰富的材料体系, 为产业化做好了充分的前期准备。

2.2 工艺与器件

从设备成本和工艺成本考量, 最理想的 OTFT 加工工艺是采用全印刷工艺“按需制造”。然而, 由于现阶段印刷工艺在加工精度和重复对位精度上与传统微纳加工(如光刻)工艺的差距, 用印刷工艺加工类如显示等高端应用(对 TFT 尺寸、性能和可靠性都有很高的要求)还有一段距离。因此, 针对显示等应用场景, 现阶段是以印刷工艺为最终目标, 与此同时借用已有的成熟的传统工艺来尽快将 OTFT 技术集成产品, 推向市场, 体现出技术本身所能带来的附加价值(如便携、柔性)。在另一方面, 针对传感器等低成本应用, 对 TFT 各方面的需求并没有如此严格, 全印刷的 OTFT 器件已经可以胜任。

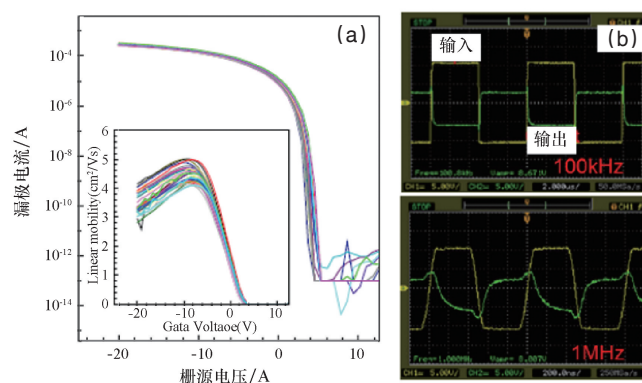
2.2.1 传统加工工艺与器件

得益于成熟的产业链和工艺积累, 传统显示行业每年在玻璃基板上要加工超过 1.5 亿 m^2 的显示背板。在不久的将来, OTFT 可以利用已有的传统显示行业产线和能够兼容的工艺, 用来大批量加工基于柔性塑料的显示背板和其他相关应用产品。现阶段, 据不完全统计, 拥有 OTFT 背板中试能力的实验线(结合传统微纳加工工艺)在全球范围内主要包括: FlexEnable 公司的 14 英寸方形, Sony 公司的 6 英寸圆形, LG 公司显示的 370 mm \times 470 mm 实验线, Samsung 公司的 300 mm \times 400 mm 的实验线和英国国家印刷电子中心(CPI)的 370 mm \times 470 mm 实验线。截至目前, 采用 FlexEnable 工艺在德国德勒斯顿建立的 Plastic Logic G3.5(650 mm \times 780 mm)生产线是全世界唯一一条具有小规模量产能力的 OTFT 生产线。目前, 借鉴传统显示行业工艺用于 OTFT 制造的包括: 溅射、光刻、湿法刻蚀、干法刻蚀、旋涂和狭缝涂布等。得益于传统工艺良好的精度、对准度和可重复性等优势, OTFT 在这些中试线上都取得了优良的器件性能和均一性。以 NeuDrive 的 FlexOSTM 为例, 在 CPI 的实验条件下, 制备出来的高性能 OTFT 器件和高速 OTFT 电路如图 4, 平均迁移率达到 $4.4 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.2.2 全印刷工艺与器件

除了应用于显示之外, OTFT 的独特技术优势使其在包括低成本传感器等领域具有广泛的应用空间。在物联网时代, 各种低成本传感器在包括智能标签和医疗监测等领域应用需求量非常大, 印刷工艺由于具有“按需制造”、可规模化、低成本等重要优势被视为传感器领域的 OTFT 的首选加工方式。很多已经发表的工作采用了印刷工艺分别制备 OTFT 器件的电极、半导体层或绝缘层^[47-50], 为了充分发挥印刷工艺的优势, 采用全印刷工艺制备 OTFT 器件将是未来的重要发展方向。截至目前, 全印刷工艺制备的 OTFT 器件还处于实验室研究阶段, 而大部分报道的全印刷工艺 OTFT 器件的工作电压都很高^[51-54], 不适合传感器等领域的实际应用。

上海交通大学印刷电子与柔性集成实验室与剑桥大学



(a) 使用 FlexOSTM 制备的 OTFT 的转移特性曲线, 沟道长度 $7 \mu\text{m}$, VDS 电压为 -2 V , 迁移率与栅极电压的关系特性曲线如插图所示, 30 个器件的平均迁移率为 $4.4 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 标准差小于 7%; (b) 使用 FlexOSTM 制备的 OTFT 环形振荡器电路在 100 kHz 和 1 MHz 工作频率下的瞬态特性曲线, 电源供电电压为 -20 V

图 4 英国 NeuDrive 公司制备的 OTFT 器件电路 (来源: NeuDrive)

Fig. 4 OTFT devices and circuits fabricated by NeuDrive Ltd Co UK

剑桥大学 Hetero-Genesys 实验室合作, 通过优化工艺和使用小分子聚合物共混半导体体系降低半导体层/绝缘层界面缺陷态密度^[32], 于 2016 年在柔性衬底 PEN 上首次制备出了基于全印刷工艺(这里采用的是喷墨印刷工艺)的低电压($<3 \text{ V}$) OTFT 器件^[55]。在这个工作中, 他们仅采用一台实验型喷墨打印机 Dimatix DMP-2831 加工所有材料(包括电极、绝缘层、半导体层和封装层), 在普通大气环境下完成了器件制备, 得到的 OTFT 样品照片和显微镜照片如图 5 所示。制备的 OTFT 器件采用银作为电极, 聚(4-乙基苯酚)PVP 作为绝缘层, TIPS-pentacene 和 PS 的共混体系作为半导体层, CYTOP 作为封装层。得到的 OTFT 器件的电学特性曲线如图 6 所示, 工作电压低至 3 V , 亚阈值摆幅为 0.16 V /漏极电流 10 倍量级增长迁移率达到 $0.26 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 开关比达到 10^5 。这项工作充分

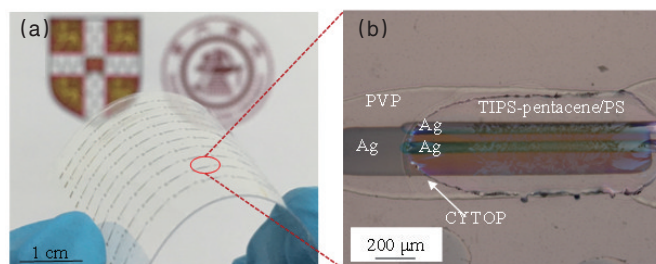


图 5 在 PEN 衬底上用全喷墨印刷工艺制备的 OTFT 器件的样品照片 (a) 和显微镜照片 (b)^[55]

Fig. 5 Photo image (a) and the microscopy image (b) of the fabricated OTFT sample with all inkjet printing processes

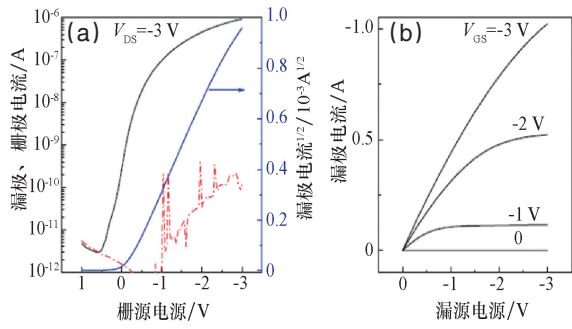


图6 在PEN上用全印刷工艺制备的OTFT器件的转移特性曲线(a)和输出特性曲线(b)^[55]

Fig. 6 Transfer characteristics (a) and the output characteristics (b) for the OTFT fabricated with all inkjet printing processes on PEN substrate

显示了全印刷工艺制备OTFT的潜力,在低成本传感器领域具有重要的应用前景。

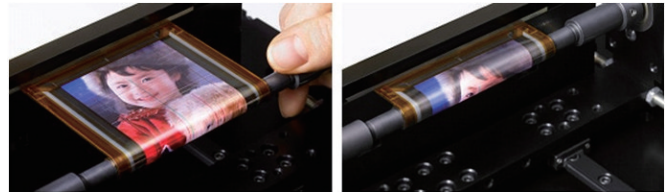
伴随着近来印刷设备和工艺的迅猛发展,有理由相信全印刷工艺制备的OTFT传感器会以类似印刷报纸的方式较快地进入市场。而在不久的将来,基于印刷OTFT的显示技术也会成走进大众生活中。

2.3 应用示例

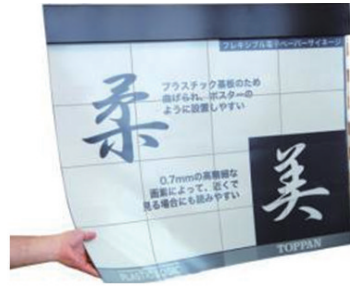
随着OTFT从材料和工艺各方面的日渐成熟,基于OTFT的应用示例也层出不穷,下面结合显示和传感两个最重要的应用领域介绍典型OTFT的应用示例。

由于OTFT是一种具有平台属性的核心半导体器件技术,在显示领域能够应用于如OLED、电子纸和LCD等的各种显示技术。在2010年国际信息显示会议(SID)上,Sony公司展示了基于OTFT驱动的121每英寸像素数(ppi)的4.1英寸柔性OLED显示屏,如图7(a)^[56]所示。如图7(b)^[57]所示,2013年,Plastic Logic公司成功研发了采用OTFT背板的42英寸柔性电子纸显示屏。2017年,FlexEnable公司则成功研发出了基于OTFT背板的12.1英寸的柔性LCD显示屏^[58]。从上面可以看出OTFT在柔性显示领域能够胜任各种显示形式(无论OLED、LCD,还是E-paper),展现了良好的应用前景。

除了显示之外,OTFT用于传感器的应用示例也层出不穷。如图8所示,上海交通大学PEFI课题组通过结合全溶液法制备的低电压OTFT传感标签(通过OTFT半导体层和氨气之间的直接作用感应氨气)和硅基读取电路,成功实现了手持式的氨气传感系统。图8(a)给出了氨气传感系统的电路示意图,左侧为OTFT传感标签,右侧为硅基读取电路。首先,通过负载电阻RL将OTFT的电流信号转换成输出电压信号V_{out}。当OTFT传感标签暴露在氨气氛围下时,由于在固定偏压条件下OTFT的电流会发生变化,V_{out}将对应变化,因此可以通过检测V_{out}示数的变化实现对氨气的检测功能。基于OTFT的传感系统的实物图和电学测试结果分别如图8(b)和图8(c)所示,实现了基于OTFT的氨气传感器。



(a) Sony公司所展示的OTFT驱动的柔性OLED屏幕样机^[56]

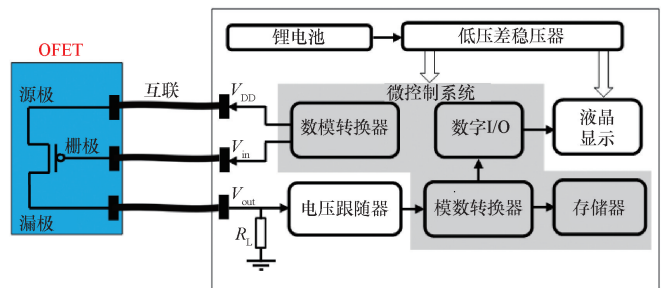


(b) Plastic Logic展示的OTFT驱动的柔性电子纸屏幕^[57]



(c) FlexEnable展示的OTFT驱动的柔性液晶屏幕^[58]

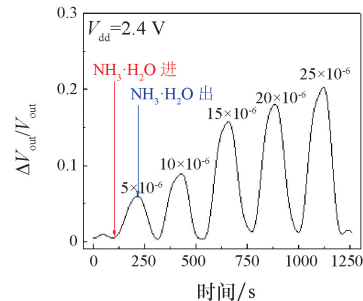
图7 主要相关企业的基于OTFT的柔性显示样机
Fig. 7 Flexible displays based on OTFTs from various companies



(a) 包含OTFT传感标签和硅基读取电路的测试系统的电路示意



(b) 基于OTFT的氨气测试系统的实物照片

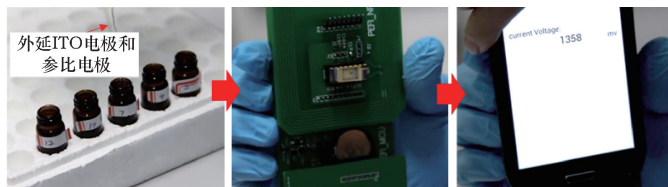


(c) 浓度从 5×10^{-6} 到 25×10^{-6} 变化时,测试的 V_{out} 的相对变化量与时间的关系特性曲线^[34]

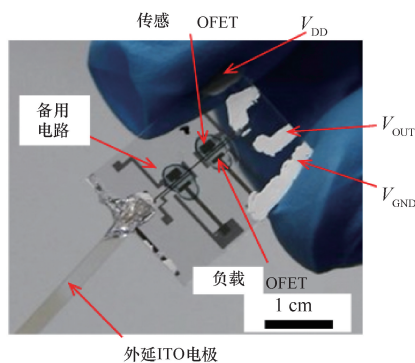
图8 基于OTFT的氨气传感系统示例
Fig. 8 Demo of OTFT NH₃ sensing system

除了上述基于 OTFT 的氨气传感器,上海交通大学 PEFI 课题组更进一步展示了基于 OTFT 的 pH 传感器,实现了与智能手机之间的通信读取数据。图 9 给出了测试流程示意图,制备的 OTFT 传感器标签,以及利用移动式测试系统测试得到的 V_{out} 与 pH 值之间良好的线性关系,可以很好地实现 pH 值测试功能。

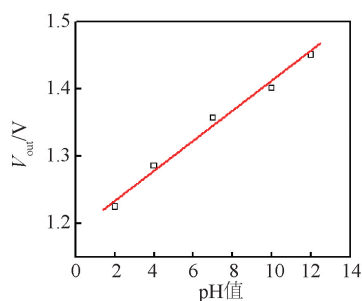
借助于 OTFT 传感和检测系统(而不是单一器件)的验证,上述 OTFT 传感器应用示例证明了 OTFT 具有成为一个具有商业竞争力传感器技术平台的潜力。



(a) 基于 OTFT 的手持式 pH 值传感器,且使用智能手机读数的测试流程示意



(b) 制备的 OTFT 传感器标签照片



(c) 测试得到的 V_{out} 与得到的 pH 值之间的关系特性曲线

图 9 基于 OTFT 的 pH 传感器系统示例

Fig. 9 Demo of OTFT pH sensor system

2.4 量产情况

截至目前,全世界范围内唯一具有 OTFT 小批量量产能力的是 Plastic Logic 公司。在德国德勒斯顿建立的 G3.5(650 mm×780 mm)生产线。Plastic Logic 公司从 2000 年成立至今,经过不断的摸索,拥有了基于 OTFT 技术小批量量产电子纸显示产品的能力。然而,由于地理位置所带来的生产成本过高的限制,以及新技术市场推广固有的阻力,目前 Plastic Logic 公司的 OTFT 电子纸产品并没有占据一定的市场份额。

2016 年 10 月 popSLATE 公司与 Plastic Logic 公司合作推出了一款用于苹果手机的电子纸显示产品,如图 10 所示,是目前第一款直接面对普通消费者销售的基于 OTFT 的产品,发布之后受到大众欢迎。



图 10 popSLATE 与 Plastic Logic 合作推出的一款用于苹果手机的电子纸显示产品照片

Fig. 10 Photographs of E-paper display products for iPhone from popSLATE and Plastic Logic

如何将 OTFT 技术尽快大规模量产,是目前产业界所有 OTFT 企业的关注重点。随着中国在显示行业的崛起和政府强有力的支持,以及综合人力资源、工艺成本和市场容量等诸多有利因素,OTFT 的大规模量产很有可能首先会发生在我国。2017 年 8 月,英国 FlexEnable 公司和信利半导体有限公司成功签署了关于 OTFT-LCD 的技术转移合同,更进一步验证了 OTFT 在中国的发展时机已经到来,需要更多的学术界/产业界的同僚的投入。

3 OTFT 的发展挑战

为了进一步促进 OTFT 技术的大规模产业化,更有针对性的克服现阶段存在的困难。结合实际情况提出现阶段 OTFT 发展的 4 点关键挑战。

1) 虽然 OTFT 材料体系选择多样,但是目前还是缺乏整套的能够和大规模溶液法/印刷工艺兼容,且能够保证器件性能、均一性和稳定性的材料体系。现阶段 OTFT 业界(尤其是学术界)过分重视半导体材料,而不够重视其他配套材料,然而在量产过程中,需要半导体层、绝缘层、电极、电极修饰层、封装层、缓冲层等材料体系一起配合加工,而且要求能够保证器件各方面的指标,才能发挥 OTFT 的作用。

2) 缺乏标准化的 OTFT 材料、器件、工艺。目前 OTFT 业界各自为战,在世界范围内缺乏标准的 OTFT 材料、器件、工艺平台,导致很多科研工作者尤其是电路设计与系统集成等方向的工作者无法贡献出自己的力量。为了产业化需要,OTFT 必须建立起一个标准化的技术平台,集众家之所长,吸引更多力量的加入。

3) 需要得到 OTFT 器件性能和大面积低成本溶液法/印刷工艺之间更好的平衡。为了充分发挥 OTFT 的优势,需要考虑如何利用合适的材料体系,利用尽可能低的工艺成本,制备出能够满足应用需求的器件,达到最优的平衡状态。

4) 应用场景和所对应的终端产品必须明确。OTFT技术已经通过各种应用示例和小批量量产证明了自己具有良好的商业化前景,拥有了改变电子产品物理形态的能力。然而,目前OTFT的“杀手级应用”还不是特别明确,只有找到了其他技术无可取代的应用场景和成功将新技术转变成终端产品,才能吸引更多社会力量的关注和打造改变产业链现有格局的能力。因此,找准产品定位,也是OTFT下一步发展的重中之重。

4 结论与展望

本文对OTFT的发展机遇、现状与挑战进行了系统的总结。可以看出,作为一种新型薄膜晶体管半导体器件,OTFT技术已经取得了举世瞩目的进展,已经迈开了从实验室走向产业化的坚定步伐。然而,为了进一步将OTFT的优势充分发挥出来,实现大规模产业化,还面临着不小的挑战。得益于OTFT独特的良好的本征柔韧性和可低成本溶液法/印刷工艺加工的优势,有理由相信好的技术最终一定会在市场上体现其价值。期待在不久的将来,随着市场需求的不断增强,众多业内工作者的不懈努力,配合资本力量和政府力量的大力支持,OTFT技术能够承担起其历史责任,成为整个柔性电子/柔性显示领域的一股核心新驱力量,开始创造一个广阔的“柔性的世界”。

参考文献 (References)

- [1] Moore's law[EB/OL]. [2017-05-31]. https://en.wikipedia.org/wiki/Moore%27s_Law.
- [2] Nathan A, Ahnood A, Lai J, et al. Large area electronics[M]//Burghartz J. Guide to State-of-the-Art Electron Devices. New York: Wiley-IEEE Press, 2013: 328.
- [3] Street R A. Thin-film transistors[J]. *Advanced Materials*, 2010, 21(20): 2007-2022.
- [4] Kuo Y. Thin film transistors: Amorphous silicon thin film transistor[M]. The Netherlands: Springer, 2004.
- [5] Brotherton S D. Introduction to thin film transistors: Physics and technology of TFTs[M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2013.
- [6] Nomura K, Ohta H, Takagi A, et al. Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors[J]. *Nature*, 2004, 432(4016): 488-492.
- [7] Arias A C, Mackenzie J D, McCulloch I, et al. Materials and applications for large area electronics: Solution-based approaches[J]. *Chemical Reviews*, 2010, 110(1): 3-24.
- [8] Yi H T, Payne M M, Anthony J E, et al. Ultra-flexible solution-processed organic field-effect transistors[J]. *Nature Communications*, 2011, 3(4): 1259.
- [9] Fukuda K, Takeda Y, Yoshimura Y, et al. Fully-printed high-performance organic thin-film transistors and circuitry on one-micron-thick polymer films[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4147.
- [10] Sirringhaus H. Organic field-effect transistors: The path beyond amorphous silicon[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(9): 1319-1935.
- [11] Klauk H. Organic thin-film transistors[J]. *Chemical Society Reviews*, 2010, 39(7): 2643-2666.
- [12] Guo Y, Yu G, Liu Y. Functional organic field-effect transistors[J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(40): 4427-4447.
- [13] Lin P, Yan F. Organic Thin-film transistors for chemical and biological sensing[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(1): 34-51.
- [14] Flexible display market to reach nearly 800 million unit shipments by 2020[EB/OL]. [2017-06-05]. <https://technology.ihs.com/436047/flexible-display-market-to-reach-nearly-800-million-unit-shipments-by-2020>.
- [15] Printed and flexible sensors market trends[EB/OL]. [2015-09-30]. http://www.strategyr.com/MarketResearch/Printed_and_Flexible_Sensors_Market_Trends.asp.
- [16] Park S K, Jackson T N, Anthony J E, et al. High mobility solution processed 6,13-bis(triisopropyl-silylethynyl) pentacene organic thin film transistors[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(6): 063514.
- [17] Park S K, Mourey D A, Subramanian S, et al. High-mobility spin-cast organic thin film transistors[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(4): 043301.
- [18] Izawa T, Miyazaki E, Takimiya K. Molecular ordering of high-performance soluble molecular semiconductors and re-evaluation of their field-effect transistor characteristics[J]. *Advanced Materials*, 2010, 20(18): 3388-3392.
- [19] Chang J F, Sun B Q, BBreiby D W, et al. Enhanced mobility of poly(3-hexylthiophene) transistors by spin-coating from high-boiling-point solvents[J]. *Chemistry of Materials*, 2004, 16(23): 4772-4776.
- [20] Ong B S, Wu Y, Liu P, et al. High-performance semiconducting polythiophenes for organic thin-film transistors[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2004, 126(11): 3378-3379.
- [21] Zhang X, Bronstein H, Kronemeijer A J, et al. Molecular origin of high field-effect mobility in an indacenodithiophene-benzothiadiazole copolymer[J]. *Nature Communications*, 2013, 4(7): 2238.
- [22] Haddon R C, Perel A S, Morris R C, et al. C60 thin film transistors[J]. *Applied Physics Letters*, 1995, 67(1): 121-123.
- [23] Zhang F, Di C A, Berdunov N, et al. Ultrathin film organic transistors: precise control of semiconductor thickness via spin-coating[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(10): 1401-1407.
- [24] Bucella S G, Luzio A, Gann E, et al. Macroscopic and high-throughput printing of aligned nanostructured polymer semiconductors for MHz large-area electronics[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8394.
- [25] Yuan Y, Giri G, Ayzner A L, et al. Ultra-high mobility transparent organic thin film transistors grown by an off-centre spin-coating method [J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 3005.
- [26] Bittle E G, Basham J I, Jackson T N, et al. Mobility overestimation due to gated contacts in organic field-effect transistors[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10908.
- [27] Giri G, Verploegen E, Mannsfeld S C, et al. Tuning charge transport in solution-sheared organic semiconductors using lattice strain[J]. *Nature*, 2011, 480(7378): 504-508.
- [28] Li F M, Nathan A, Wu Y, et al. Organic thin-film transistor integration using silicon nitride gate dielectric[J]. *Applied Physics Letters*,

- 2007, 90(13): 20–26.
- [29] Kim S H, Sun H L, Kim Y G, et al. Ink-jet-printed organic thin-film transistors for low-voltage-driven CMOS circuits with solution-processed AlOX gate insulator[J]. IEEE Electron Device Letters, 2013, 34(2): 307–309.
- [30] Veres J, Ogier S D, Leeming S W, et al. Low-k insulators as the choice of dielectrics in organic field-effect transistors[J]. Advanced Functional Materials, 2003, 13(3): 199–204.
- [31] Huang W, Fan H, Zhuang X, et al. Effect of UV/ozone treatment on polystyrene dielectric and its application on organic field-effect transistors[J]. Nanoscale Research Letters, 2014, 9(1): 479.
- [32] Feng L, Tang W, Xu X, et al. Ultralow-voltage solution-processed organic transistors with small gate dielectric capacitance[J]. IEEE Electron Device Letters, 2013, 34(1): 129–131.
- [33] Chua L L, Zaumseil J, Chang J F, et al. General observation of n-type field-effect behavior in organic semiconductors[J]. Nature, 2005, 434(7030): 194–199.
- [34] Feng L, Tang W, Zhao J, et al. Unencapsulated air-stable organic field effect transistor by all solution processes for low power vapor sensing[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 20671.
- [35] Tang W, Feng L, Yu P, et al. Highly efficient all-solution-processed low-voltage organic transistor with a micrometer-thick low-k polymer gate dielectric layer[J]. Advanced Electronic Materials, 2016, 2(5): 1500454.
- [36] Parashkov R, Becker E, Ginev G, et al. All-organic thin-film transistors made of poly(3-butylthiophene) semiconducting and various polymeric insulating layers[J]. Journal of Applied Physics, 2004, 95(3): 1594–1596.
- [37] Li J, Sun Z, Yan F. Solution processable low-voltage organic thin film transistors with high-k relaxor ferroelectric polymer as gate insulator [J]. Advanced Materials, 2012, 24(1): 88–93.
- [38] Tang W, Li J, Zhao J, et al. High performance solution-processed low-voltage polymer thin-film transistors with low-k/high-k bilayer gate dielectric[J]. Electron Device Letters IEEE, 2015, 36(9): 950–952.
- [39] Di C A, Yu G, Liu Y, et al. High-performance low-cost organic field-effect transistors with chemically modified bottom electrodes[J]. Journal of the American Chemical Society, 2006, 128(51):16418–16419.
- [40] Long D X, Xu Y, Kang S J, et al. Solution processed vanadium pentoxide as charge injection layer in polymer field-effect transistor with Mo electrodes[J]. Organic Electronics, 2015, 17: 66–76.
- [41] Hong M P, Kim B S, Lee Y U, et al. Recent progress in large sized & high performance organic TFT array[J]. Sid Symposium Digest of Technical Papers, 2012, 36(1): 23–25.
- [42] Wen Y, Liu Y, Guo Y, et al. Experimental techniques for the fabrication and characterization of organic thin films for field-effect transistors[J]. Chemical Reviews, 2011, 111(5): 3358–3406.
- [43] Yan H, Chen Z, Zheng Y, et al. A high-mobility electron-transporting polymer for printed transistors[J]. Nature, 2009, 457(7230): 679–686.
- [44] Feng L, Tang W, Zhao J, et al. All-solution-processed low-voltage organic thin-film transistor inverter on plastic substrate[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014, 61(4): 1175–1180.
- [45] Peng B, Chan P K L. Flexible organic transistors on standard printing paper and memory properties induced by floated gate electrode[J]. Organic Electronics, 2014, 15(1): 203–210.
- [46] Ute Z, Tatsuya Y, Kazuo T, et al. Organic electronics on banknotes. [J]. Advanced Materials, 2011, 23(5): 654–658.
- [47] Tang W, Feng L, Zhao J, et al. Inkjet printed fine silver electrodes for all-solution-processed low-voltage organic thin film transistors[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2014, 2(11): 1995–2000.
- [48] Tang W, Feng L, Jiang C, et al. Controlling the surface wettability of the polymer dielectric for improved resolution of inkjet-printed electrodes and patterned channel regions in low-voltage solution-processed organic thin film transistors[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2014, 2(28): 5553–5558.
- [49] Kim Y H, Yoo B, Anthony J E, et al. Controlled deposition of a high-performance small-molecule organic single-crystal transistor array by direct ink-jet printing[J]. Advanced Materials, 2012, 24(4): 497–502.
- [50] Kjellander B K C, Smaal W T T, Anthony J E, et al. Inkjet printing of TIPS-PEN on soluble polymer insulating films: A route to high-performance thin-film transistors[J]. Advanced Materials, 2010, 22(41): 4612–4616.
- [51] Chung S, Kim S O, Kwon S K, et al. All-inkjet-printed organic thin-film transistor inverter on flexible plastic substrate[J]. IEEE Electron Device Letters, 2011, 32(8): 1134–1136.
- [52] Sowade E, Mitra K Y, Ramon E, et al. Up-scaling of the manufacturing of all-inkjet-printed organic thin-film transistors: Device performance and manufacturing yield of transistor arrays[J]. Organic Electronics, 2016, 30: 237–246.
- [53] Tseng H Y, Subramanian V. All inkjet-printed, fully self-aligned transistors for low-cost circuit applications[J]. Organic Electronics, 2011, 12(2): 249–256.
- [54] Medina-Sánchez M, Martínez-Domingo C, Ramon E, et al. An inkjet-printed field-effect transistor for label-free biosensing[J]. Advanced Functional Materials, 2015, 24(40): 6291–6302.
- [55] Feng L, Jiang C, Ma H, et al. All ink-jet printed low-voltage organic field-effect transistors on flexible substrate[J]. Organic Electronics, 2016, 38: 186–192.
- [56] Sony develops a "rollable" oled display that can wrap around a pencil[EB/OL]. [2017-06-20]. <https://www.sony.net/SonyInfo/News/Press/201005/10-070E/>.
- [57] Plastic Logic to bring tiled 42" OTFT flexible e-paper displays to the market[EB/OL]. [2017-06-20]. <https://www.oled-info.com/plastic-logic-bring-42-otft-flexible-e-paper-displays-market>.
- [58] Press release: FlexEnable's new 12.1" plastic LCD platform delivers large area flexible displays for next generation product designs[EB/OL]. [2017-06-20]. <http://www.flexenable.com/newsroom/new-plastic-led-platform-delivers-large-area-flexible-displays/>.

Current status, opportunities, and challenges of organic thin-film transistors

FENG Linrun^{1,2}, TANG Wei¹, GUO Xiaojun¹

1. Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
2. NeuDrive Limited, Cheshire SK10 4TG, UK

Abstract Organic thin-film transistors (OTFTs) have received worldwide academic and industrial attention owing to their attractive features of low cost, low temperature drop-on-demand printable processes, superior intrinsic mechanical flexibility, and sustainable performance improvement. These features of OTFT bring them great potential for a wide range of new applications including flexible display and sensors. However, even with significant technological advances, there is still a gap for the OTFT technology to be widely commercially adopted. Based on actual application demand, this paper provides a comprehensive review of the OTFT development, and discuss its current status, opportunities and challenges.

Keywords organic thin-film transistor; flexible display; sensor; printed electronics

(责任编辑 刘志远)