

文章编号:1007-2780(2022)08-0948-11

电子纸用柔性薄膜晶体管的研究进展

高执文¹, 许 伟¹, 姚日晖¹, 魏小琴², 钟锦耀¹, 杨跃鑫¹,
符 晓¹, 刘泰江¹, 宁洪龙^{1*}, 彭俊彪¹

(1. 华南理工大学 材料科学与工程学院 发光材料与器件国家重点实验室, 广东 广州 510640;

2. 中国兵器工业第五九研究所, 重庆 400039)

摘要: 薄膜晶体管 (Thin Film Transistor, TFT) 作为像素中的开关元器件, 与存储电容一起组成电子纸显示器的驱动电路。本文按照柔性 TFT 有源层的不同进行分类: 有机薄膜晶体管 (Organic Thin Film Transistor, OTFT)、非晶硅薄膜晶体管 (Amorphous Silicon Thin Film Transistor, a-Si TFT)、金属氧化物薄膜晶体管 (Metal Oxide Thin Film Transistor, MOTFT), 介绍它们在柔性电子纸显示器中的研究进展, 着重关注器件的柔性、电学特性以及稳定性。最后进行了对比分析, 提出 MOTFT 有望凭借优良的电学特性、高光学透明性以及相对较低的工艺温度等优势成为驱动下一代柔性电子纸显示器的最佳候选者。

关 键 词: 电子纸; 柔性薄膜晶体管; 金属氧化物薄膜晶体管; 驱动

中图分类号: TN321.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2022-0102

Research progress of flexible thin film transistors for E-paper

GAO Zhi-wen¹, XU Wei¹, YAO Ri-hui¹, WEI Xiao-qin², ZHONG Jin-yao¹, YANG Yue-xin¹,
FU Xiao¹, LIU Tai-jiang¹, NING Hong-long^{1*}, PENG Jun-biao¹

(1. *State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;*

2. *Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China)*

Abstract: Thin film transistors (TFTs) are used as switching components in pixels, and together with the storage capacitors, form the driving circuit for electronic paper (E-paper) displays. In this paper, we classify the flexible TFTs according to their active layer: organic thin film transistor (OTFT), amorphous silicon (a-Si) TFT, metal oxide thin film transistor (MOTFT). Their research progress in flexible

收稿日期: 2022-03-30; **修订日期:** 2022-05-05.

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2021YFB3600604); 广东省重点领域研发计划 (No. 2020B010183002); 2021 年广东省科技创新战略专项资金 (“大专项 + 任务清单”) (No. 210908174533730); 国家自然科学基金 (No. 62174057); 中国兵器工业第五九研究所合作基金 (No. HDHDW5902020402)

Supported by National Key R&D Program of China (No. 2021YFB3600604); Key-Area Research and Development Program of Guangdong Province (No. 2020B010183002); Special Fund for Science and Technology Innovation Strategy of Guangdong Province in 2021 (“Big Special Project + Task List”) Project (No. 210908174533730); National Natural Science Foundation of China (No. 62174057); Southwest Institute of Technology and Engineering Cooperation Fund (No. HDHDW5902020402)

*通信联系人, E-mail: ninghl@scut.edu.cn

E-paper displays is presented, focusing on the flexibility, electrical properties and stability of the devices. Finally, the comparative analysis suggests that MOTFT is expected to be the best candidate to drive the next generation of flexible E-paper displays by virtue of the excellent electrical properties, high optical transparency and relatively low process temperature.

Key words: E-paper; flexible thin film transistors; metal oxide thin film transistors; drive

1 引言

柔性显示器因其超薄、轻便、耐用和舒适的特性有望成为下一代显示器。在众多柔性显示器中,可弯曲、形态多样的电子纸显示器凭借独特的优势脱颖而出,引起研究人员的关注。电子纸是一种类纸显示器,重量轻、便于携带,利用反射环境光进行显示,环境光越强,显示器亮度越高,具备独特的强光可读性,不易产生视觉疲劳,具有超高对比度、宽视角等优良显示特性^[1-3]。此外,电子纸显示器电池使用寿命更长,静态图像功耗也更低,是一款耐用且节能的新型绿色电子产品,更符合当代消费者需求^[4]。

电子纸显示器依照显示原理有多种分类,常见的有电泳式^[5-6]和电润湿式^[7-9]。前者利用带电粒子的电泳原理,即两种异性带电粒子在电场的驱动下,运动到显示器的两极,使得透明电极的一侧显示出一种带电粒子的色彩。而没有电场作用时,带电粒子悬停于液体中保持不动。该特性称为双稳态特性,电泳显示器也因此具有低功耗特性,因为只有需要在需要切换图像时消耗电能。后者借助控制电压来控制被包围的液体的表层,通过液体张力的变化,导致像素的变化。采用电润湿技术制造的电子纸像素转换非常迅速,同时具有结构简单、省电、可用于柔性显示等特点,其亮度和对比度远超过现有的其他电子纸显示技术。

显示器像素的驱动方式通常有无源选址驱动(Passive Matrix, PM)和有源选址驱动(Active Matrix, AM)两种。如采用无源矩阵驱动,需要较复杂的外围设计,故柔性化较难;而有源矩阵驱动的外围较简单且阵列性能较高,因此柔性电子纸显示器通常采用有源驱动方式。在这种驱动方式中,薄膜晶体管(Thin Film Transistor, TFT)作为像素的开关元器件,其性能十分重要^[10]。首先也是最重要的是其应具有优良的柔性,这要求在制备过程中应避免高温工艺,以与

柔性基板兼容。其次,在电子纸的使用过程中,弯曲带来的机械应力和电子纸更新内容时产生的电应力都会对器件产生影响,这就要求 TFT 器件具有优秀的稳定性和耐久性,在重复机械应力和电应力下仍能稳定工作。在显示器驱动背板的 TFT 阵列中, TFT 还应当具有优良的均匀性以保证显示器能够正常工作。对于利用反射光的电子纸显示器来说,光路中的遮光部分如 TFT 结构会对最终产品的显示效果有着不利影响^[11],因此 TFT 的光学透明性也非常重要。

因此,介绍柔性 TFT 驱动背板的研究进展是一项非常有意义的工作。电子纸显示器中主要的 TFT 按有源层材料可分为 3 种:有机薄膜晶体管(Organic Thin Film Transistor, OTFT)、非晶硅薄膜晶体管(Amorphous Silicon Thin Film Transistor, a-Si TFT)、金属氧化物薄膜晶体管(Metal Oxide Thin Film Transistor, MOTFT)。有机薄膜晶体管迁移率通常为 $0.1 \sim 10 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,制造成本和工艺复杂度偏高,工艺温度为室温至 250°C ;非晶硅薄膜晶体管迁移率一般为 $0.5 \sim 1 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,制造成本和工艺复杂度均相对较低,但工艺温度一般较高,为 $250 \sim 350^\circ\text{C}$;金属氧化物薄膜晶体管的迁移率一般高达 $10 \sim 100 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,工艺复杂度低,工艺温度为室温至 350°C 。本文从柔性、性能均匀性、稳定性、电性能等多方面详细介绍了它们在电子纸显示器中的研究进展,最后进行了对比总结,提出 MOTFT 凭借其独有的高迁移率、低加工温度以及独特的透明性可能在未来成为电子纸显示器驱动柔性背板的最佳选择。

2 OTFT 在电子纸显示器中的应用

2004 年, Gelinck 等人展示了一款 $25 \mu\text{m}$ 厚聚酰亚胺(PI)上柔性并五苯 TFT 驱动的单色电泳显示器(Electrophoretic display, EPD)。在 TFT

背板制造完成后,层压一层电子墨水(E-ink)层以用作显示器的前板,其曲率半径可低至 1 cm 而不显著降低性能,具体见图 1^[12]。

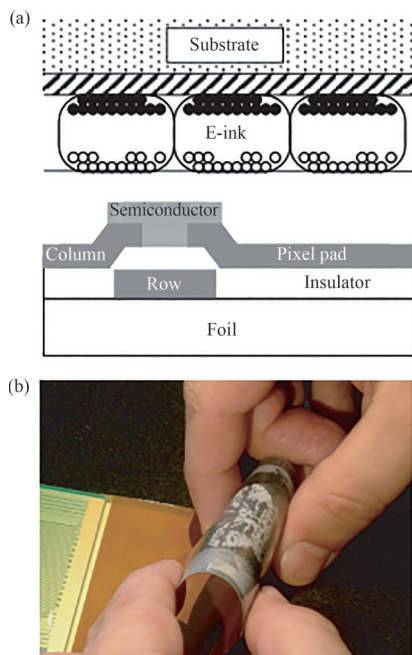


图 1 PI 基板上 OTFT 驱动的电子纸显示器。(a) 一个像素的横截面;(b) 电泳显示器弯曲到一个约 1 cm 的曲率半径^[12]。

Fig. 1 Electronic paper display driven by OTFT on PI substrate. (a) Cross-section of one pixel; (b) Electrophoretic display bent to a curvature radius of about 1 cm^[12].

2006 年, Burns 等人在 125 μm 厚的聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)基板上制备使用聚芴聚合物半导体有源层的 OTFT 有源驱动背板,并层压电子墨水成像膜制造了一款电子纸显示器^[13]。器件迁移率为 $0.03 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 开关电流比为 $10^5 \sim 10^6$, 输出特性如图 2(a) 所示。在含 4 800 个器件的阵列中测试了 100 个 TFT 的开关电流比的变化, 结果如图 2(b) 所示, 阵列的像素良率高于 99%, TFT 的开关电流比的变化小于 10%, 说明器件具有很好的均匀性。

Burns 等人还测定了 TFT 器件承受机械应力和电应力的稳定性。柔性显示器可以弯曲到 5 mm 的曲率半径而不显著降低器件性能, 具体如图 3 所示; 并且在 3 000 万次脉冲测试后(相当于 600 行电子纸显示器中的 50 万次刷新)器件仍然没有明显的性能下降。

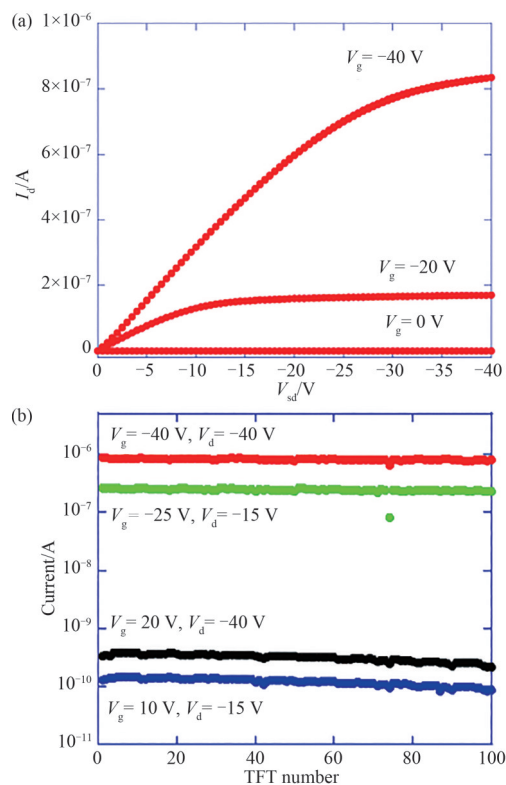
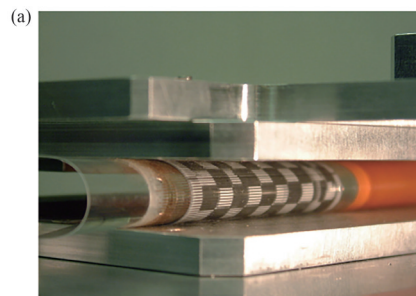


图 2 TFT 性能。(a) PET 上 TFT 的输出特性 ($L=10 \mu\text{m}$, $W=240 \mu\text{m}$); (b) 60×80 有源矩阵阵列上 100 个 TFT 通断电流的均匀性^[14]。

Fig. 2 TFT performance. (a) Output characteristics of TFT on PET ($L=10 \mu\text{m}$, $W=240 \mu\text{m}$); (b) Uniformity of 100 TFT ON and OFF currents across a 60×80 active-matrix array^[14].

同年, Moriya 等人同样使用基于聚芴聚合物(F8T2)半导体 TFT 开发了一款 60.96 mm (2.4 in) 的驱动背板用于制作微胶囊电泳显示器, 其创新点在于整个显示器制作过程中的工艺温度极低, 最高温度仅有约 80°C ^[15]。在 -40 V 的栅极偏压下, 器件场效应迁移率为 $0.002 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 0 V 和 -40 V 之间的开关电流比为 2×10^6 , 适度卷曲或暴露于空气中 1 500 h 都不会影响器件开关比等性能, 具有可靠的稳定性, 具体如图 4 所示。



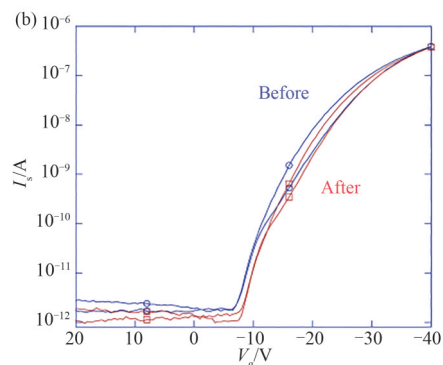


图3 (a)柔性显示器弯曲至5 mm曲率半径时运行的照片;(b)弯曲至5 mm曲率半径前后的TFT性能^[14]。

Fig. 3 (a) Photograph of flexible display in operation while being bent to a radius of curvature of 5 mm; (b) TFT performance before and after flexing to a radius of curvature of 5 mm^[14].

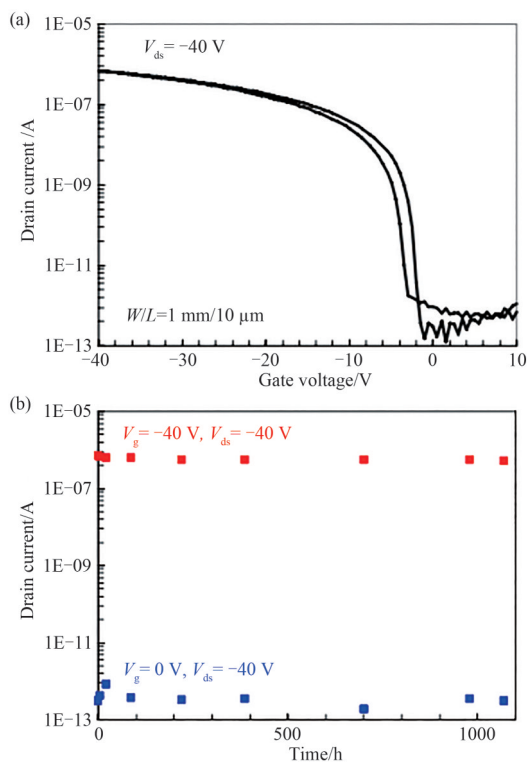


图4 (a)聚合物薄膜晶体管的转移特性;(b)开态电流和关态电流随暴露在空气中的时间的变化^[15]。

Fig. 4 (a) Transfer characteristics of polymer TFT; (b) Change of the on-current and off-current as function of exposure time to air^[15].

两年后, Kim 等人在 200 μm 厚的聚醚砜(PES)基板上制备了 TIPS 并五苯 OTFT, 迁移率为 $0.06 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 并成功驱动电子纸显示器^[16]。相似的研究还有同年 Lee 等人报道的在

200 μm 厚的聚萘二甲酸乙二醇酯(PEN)基板上制造的 152.4 mm (6 in) 高可靠性五苯 TFT 背板^[17]。器件迁移率为 $(0.21 \pm 0.03) \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 电流开关比高达 $(3.66 \pm 2.72) \times 10^7$ 。在 152.4 mm (6 in) 的阵列区域内器件性能差异不到 10%, 显示器在连续运行 5 周的过程中器件迁移率和开关比基本保持不变, 表明背板具有可靠的稳定性和耐用性。2009 年, Hu 等人在 PEN 基板上制作了 119.38 mm (4.7 in) OTFT-EPD, 所有工艺温度均低于 150 $^{\circ}\text{C}$ ^[18]。OTFT 器件迁移率为 $0.01 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 开关比为 5×10^5 , 亚阈值摆幅 1.3 V/dec。为了测试器件的均匀性, 测量了 250 个 OTFT 的性能, 所有器件的开关比均在 10^5 之上, 迁移率的变化范围为 $\pm 0.002 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 表明基板上的 OTFTs 具备优良的均匀性, 具体如图 5 所示。此外, OTFT-EPD

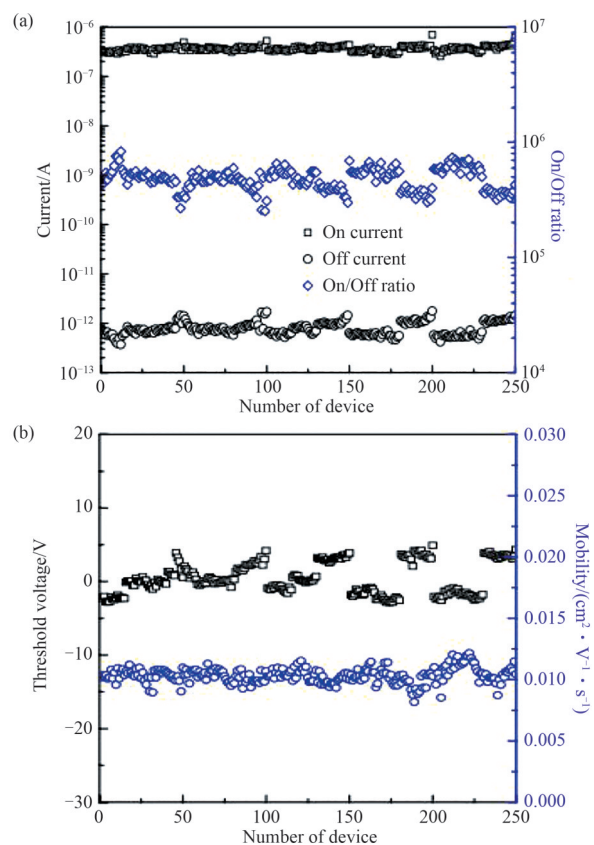


图5 (a)从 250 个聚合物 OTFT 测得的开态电流、关态电流和开关比特性;(b)从 250 个聚合物 OTFTs 测量的阈值电压和迁移率变化^[18]。

Fig. 5 (a) On current, off current, and on/off ratio characteristics measured from 250 polymer OTFTs; (b) Threshold voltage and mobility variation measured from 250 polymer OTFTs^[18].

在商业界也已经有一些代表产品,如 Plastic Logic Ltd(PLL)公司于2010年推出的商务专用电子阅读器产品 QUE,便搭载了 OTFT 有源驱动背板^[10]。

2011 年, Feng 等人对比分析了 OTFT 的两种结构: 顶栅底接触 (Bottom-contact top gate, BCTG) 式和底栅底接触 (Bottom-contact bottom gate, BCBG) 式^[19]。通过改变像素电极和 OTFT 之间的层间电介质 (Interlayer dielectric, ILD) 厚度, 绘制出两种结构的模拟转移特性曲线, 具体如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 对于 BCBG

OTFT, 像素电极的存在会导致转移特性曲线随漏极偏压增加向着正方向移动, 且偏移的幅度随着 t_{ILD} (Thickness of ILD) 的增加而减小; 而 BCTG OTFT 的转移特性则不受像素电极的影响, 这得益于顶栅结构对沟道的电屏蔽作用。

他们还给出栅漏寄生电容 C_{gd} 随 V_{gd} 的变化曲线, 可以看出, BCBG 结构的 C_{gd} 整体小于 BCTG 结构, 这是由于后者的像素电极与栅极电极之间会形成附加电容, 可以通过增加 ILD 厚度降低 C_{gd} , 具体如图 7 所示。

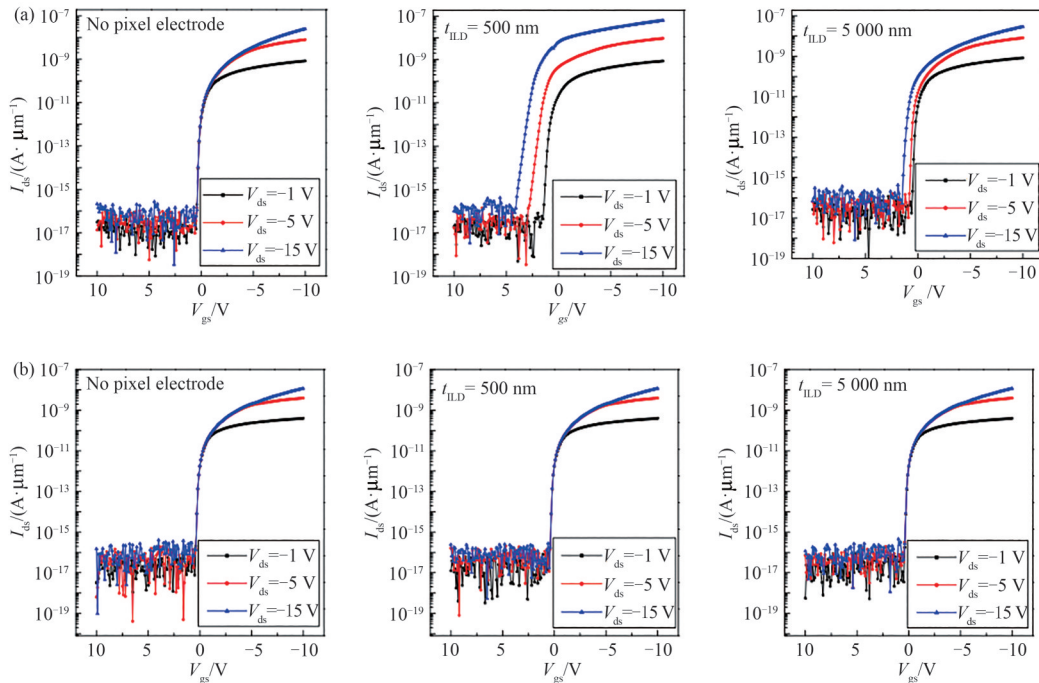


图 6 BCBG 结构(a)和 BCTG 结构(b)中 OTFT 的模拟转移特性^[19]

Fig. 6 Simulated transfer characteristics of the OTFTs in BCBG structure (a) and BCTG structure (b)^[19]

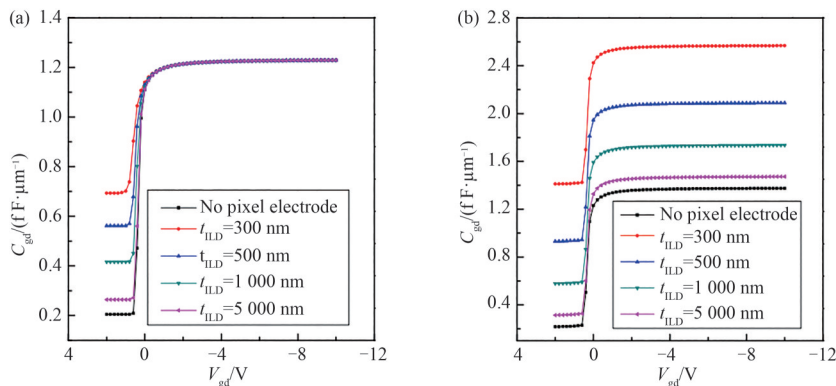


图 7 模拟栅漏寄生电容(C_{gd})作为 V_{gd} 的函数。(a)BCBG 结构;(b)BCTG 结构^[19]。

Fig. 7 Simulated gate drain parasitic capacitance (C_{gd}) as a function of V_{gd} . (a) BCBG structure; (b) BCTG structure^[19].

因此,当采用OTFT作为电子纸显示器的开关时,需针对不同结构做出改良措施:BCTG OTFT需针对更大的寄生电容 C_{gd} 设计更厚的ILD层缓解,无需考虑像素电极干扰;而对于BCBG OTFT, C_{gd} 要小得多,但设计时需要更宽的栅极电压摆幅来补偿转移特性的偏移。2014年, Park等人展示了88.9 mm (3.5 in)具有良好弯曲性的OTFT-EPD^[20]。OTFT器件制备工艺温度低于140 °C,并在曲率半径为4 mm的100 000次极端循环弯曲应力下保持稳定的电性能,表现出优异的柔性。这一研究结果为我们展示了溶液处理OTFT在柔性电子元件中的巨大应用潜力。一年后,在之前研究的基础上, Park等人继续从工业适用性的角度详细介绍了OTFT背板的制备工艺,将柔性电泳显示器的尺寸扩展到152.4 mm (6 in)^[20]。2021年, Facchetti等人报告了高性能OTFTs的规模化生产,使用Flexterra OTFT技术制作出了172.72 mm (6.8 in)英寸的柔性出色且稳定耐用的EPD^[21],为OTFT背板的大规模制备提供了新思路。

有机半导体(Organic semiconductor)凭借其固有的柔性和较低的沉积温度,为柔性有源驱动背板的制造提供了一条途径。

3 a-Si TFT 在电子纸显示器中的应用

Kim等人的研究小组在a-Si TFT-EPD研究领域做出了重要贡献。2007年,他们使用a-Si TFT开发了一款355.6 mm (14 in)的柔性彩色电子纸,成品具有真正的纸质外观,十分灵活,且具有宽视角和高对比度^[22]。3年后,在之前的研究基础上,他们又对比分析了U型双TFT和双栅TFT两种新型结构的TFT的性能,结果如图8所示^[23]。由图8可知,U型双TFT有更高的迁移率和电流开关比,而双栅TFT在亚阈值摆幅(S 因子)和关态电流特性上有更优的表现。但由于U型双TFT的非对称结构降低了TFT栅极和源极之间的寄生电容,因此使用U型双TFT结构更优,以提高充电率和电压保持率。最终他们在低于150 °C的低工艺温度下开发出a-Si:H TFT背板并用于电子纸显示器中,生产出外观像纸一样薄且功耗极低的柔性彩色电子纸显示器,并将

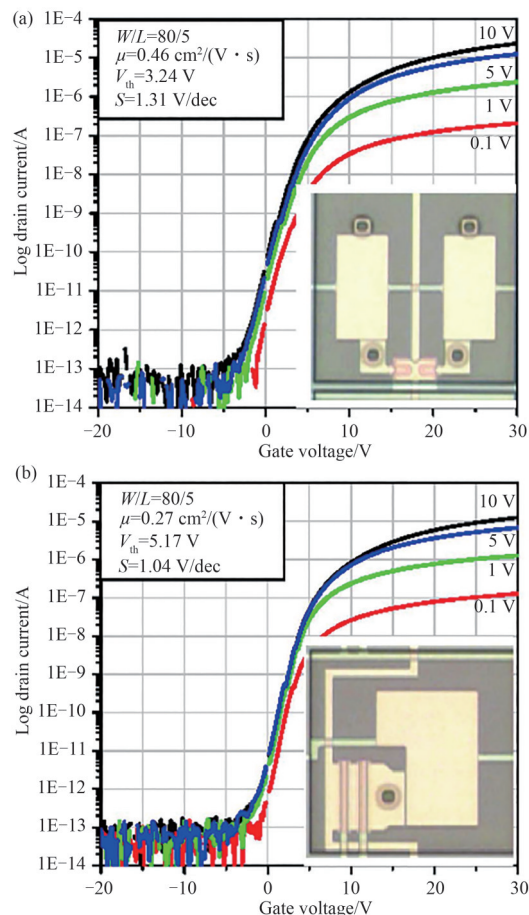


图8 金属箔上U型双TFT(a)和双栅TFT(b)的转移曲线^[23]

Fig. 8 Transfer curves of U-type dual TFT(a) and dual-gate TFT (b) on a metal foil^[23]

面板尺寸扩展到363.22 mm (14.3 in)。

他们还沿用U型双TFT结构,成功在不锈钢基板上制造出更大尺寸(约482.6 mm (19. in))的a-Si TFT柔性电子纸显示器^[24]。制得的器件迁移率为 $0.35 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,亚阈值摆幅为0.69 V/dec,转移特性如图9所示。使用所谓的“单板工艺”解决了不锈钢基板上制造大尺寸电子纸显示器的柔性工艺问题,并在制造过程中采用门面板(Gate in Panel, GIP)技术,减少TFT所需驱动芯片的数量,并提高了显示模块的柔性。但由于200 °C以下制造的a-Si TFT在偏压温度应力下表现出相当差的稳定性,因此不得不将工艺温度提高到250 °C以获得可靠的TFT背板。

2011年, Akamatsu等人展示了一款337.82 mm (13.3 in)的柔性彩色a-Si TFT-EPD^[25]。在玻璃基板上层压塑料薄膜,并在其上开发出a-Si TFT阵

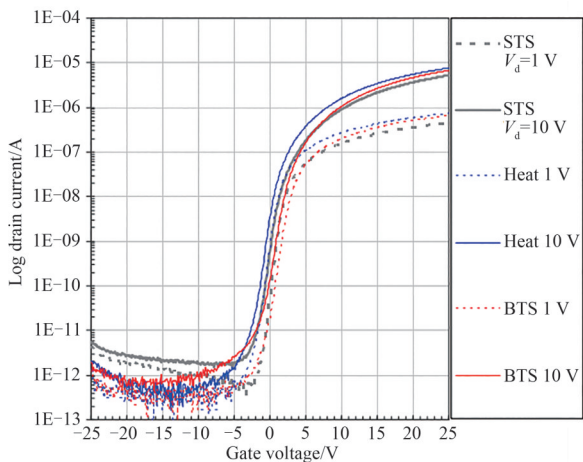


图9 250 ℃不锈钢衬底上制备的 a-Si:H TFT 的初始 (灰色曲线)、热处理 (蓝色曲线) 和偏压温度应力 (红色曲线) 特性^[24]。

Fig. 9 Initial (Gray curves), heat treatment (Blue curves), and bias-temperature stress (Red curves) characteristics of a-Si:H TFTs fabricated on stainless steel substrate at 250 ℃^[24].

列,整个工艺过程温度保持在180 ℃以下。测试了 a-Si TFT 背板的环境稳定性和机械稳定性,结果如图 10 所示,表明该背板在 EPD 长期运行下器件十分可靠,且有出色的柔性和机械稳定性。

在电子纸显示器中,使用 n 沟道型 TFT 传输高电压有一定困难,在选择高电压到像素电极的过程中也会出现电压的损失。为此,Moon 等人使用 a-Si TFT 开发了一种电子纸驱动电路,不需要高压电源,简化了电路,并且加入自举电路的设计以克服传输高电压过程中的电压损失^[26]。

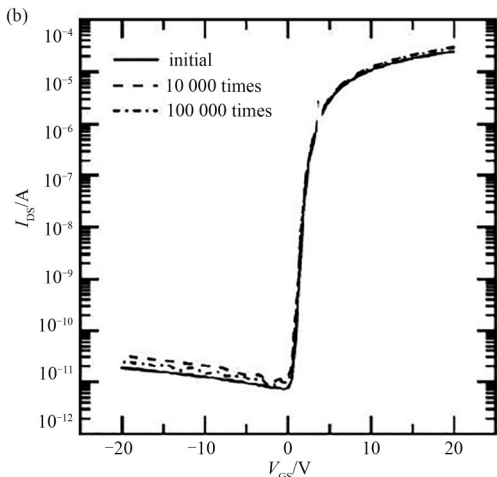
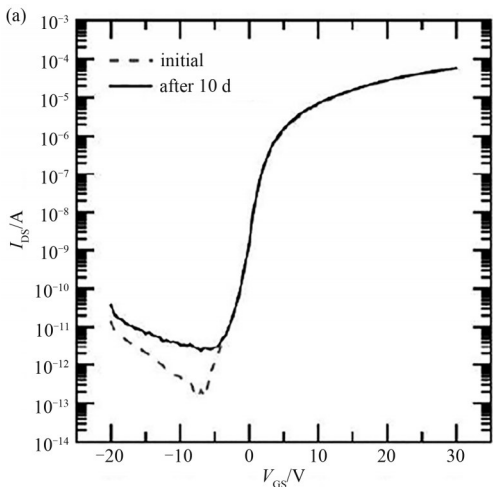


图 10 (a)在 85 ℃ 和相对湿度为 85% 的环境试验前后,非晶硅 TFT 在塑料薄膜上的转移特性;(b)在 $r=5\text{ mm}$ 的情况下,在 10 万次弯曲试验前后测量的像素 TFT 的转移特性^[25]。

Fig. 10 (a) Transfer characteristics of an a-Si TFT on a plastic film before and after an environmental test at 85 ℃ and relative humidity of 85%; (b) Transfer characteristics of pixel TFT measured before and after 100 000 times bending test with $r=5\text{ mm}$ ^[25].

对于 a-Si TFT 而言,在电子纸中的应用仍受到低迁移率和工艺温度的阻碍。

4 MOTFT 在电子纸显示器中的应用

与传统的 a-Si TFT 相比,MOTFT 迁移率一般大一个数量级以上,亚阈值电压摆幅要小数倍,且在电偏压下有更好的稳定性。对于柔性塑料衬底而言,即使在室温下制造 MOTFT 也可以取得令人满意的性能,而 a-Si 往往需要提高工艺温度来提高器件性能指标。在电子纸显示器中,光路中的障碍物,如 TFT,以及 TFT 的镜面反射都会对显示器产品的反射率造成不利影响,影响显示质量^[11]。而非晶氧化物半导体独有的透明性,更提高了其在电子纸显示器中的应用潜力。

2005 年,Toppan Printing 公司推出了一款使用 a-IGZO TFT 的黑白电子纸^[27]。第二年,他们又开发了一种全彩电子纸,采用了一种新颖的“前驱动”结构,其中滤色器阵列和 TFT 阵列利用 a-IGZO TFT 的高透明度集成在前平面中。

在这种结构中,滤色器和 TFT 高度对齐,具体如图 11 所示^[28]。

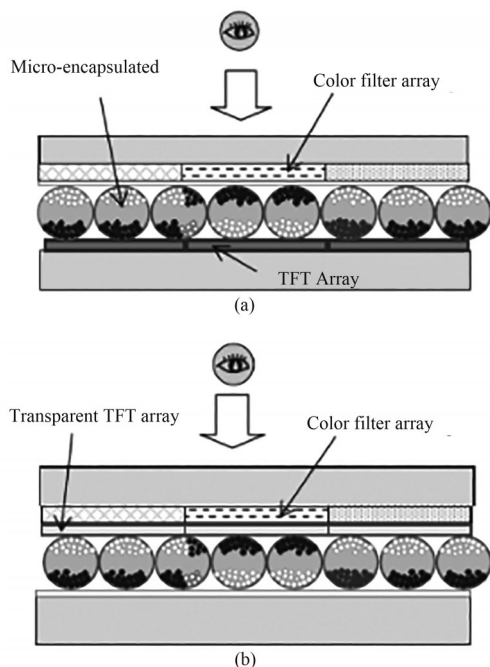


图 11 (a) 传统彩色电子纸的结构;(b)新颖的“前驱动”结构^[28]。

Fig. 11 (a) Structure of conventional color electronic paper;(b) Novel “front drive” structure^[28]。

他们测量了每个子像素(R,G,B,W)在有透明 TFT 和无透明 TFT 下的透射光谱,以评估 a-IGZO TFT 的透明性能,具体结果如图 12 所示。尽管观察到透射率略有降低,但每个带有透明 TFT 的亚像素的透射率光谱都显示出超过 80% 的透射率,表明全透明氧化物 TFT 阵列的存在并未对电子纸显示器的显示质量产生大的影响。器件的电学性能也十分优异,具有 $6.1 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的迁移率,低于 10^{-10} A 的关态电流和超过 10^{-6} 的开关比。

2008 年,他们沿用前驱动结构,探究非晶氧化物 TFT 制作更高分辨率电子纸显示器的可行性,最终将分辨率从原来的 120×160 提高到 640×480 。a-IGZO TFT 的退火温度也从原来的 200°C 略微降低到 180°C ,而所有膜层的制备都是在室温下进行的,实现了超过 10^7 的高开关比和 $2.8 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的场效应迁移率,转移特性如图 13 所示^[29]。

2010 年, Lee 等人展示了一款彩色 ZnO TFT-

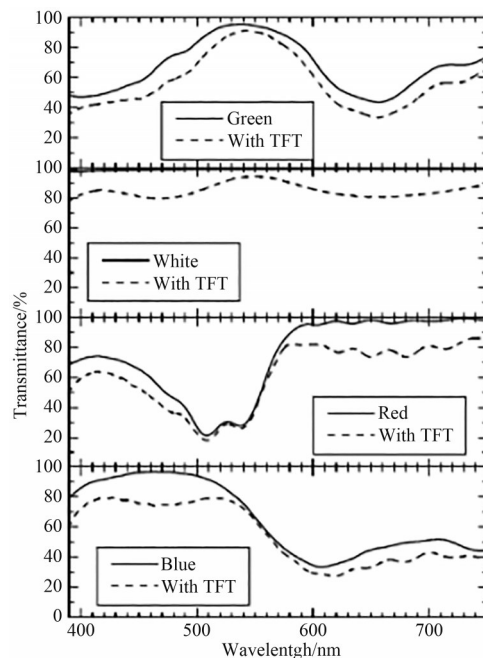


图 12 有透明 TFT 和无透明 TFT 时每个子像素的透射光谱^[28]

Fig. 12 Transmission spectra of each subpixel with and without transparent TFT^[28]

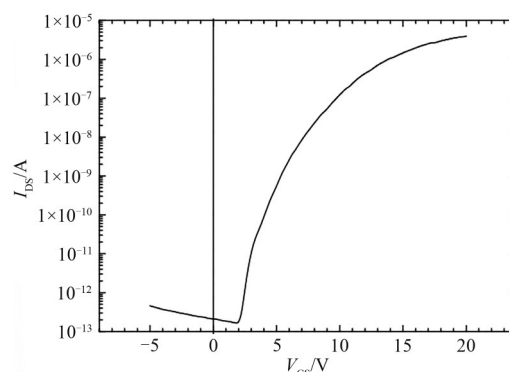


图 13 a-IGZO TFT 的转移特性^[29]

Fig. 13 Transfer characteristics of a-IGZO TFT^[29]

EPD,背板透明性良好,透射率约为 80%,器件迁移率为 $4.6 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,亚阈值摆幅为 0.23 V/dec ,关态电流小于 10^{-13} A ,开关电流比约为 10^8 ,转移特性曲线如图 14 所示^[30]。从电子纸低成本制造的角度考虑,ZnO 是 EPD 背板材料的一个很好的选择。

2011 年, Kaftanoglu 等人在低温 (200°C) 下开发了一款可用于电子纸驱动的氧化铟锌 (IZO) TFT 驱动背板^[31]。器件饱和迁移率为 $14.2 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,亚阈值摆幅为 0.22 V/dec ,开关比大于 10^9 。他们做了大量的应力测试,在

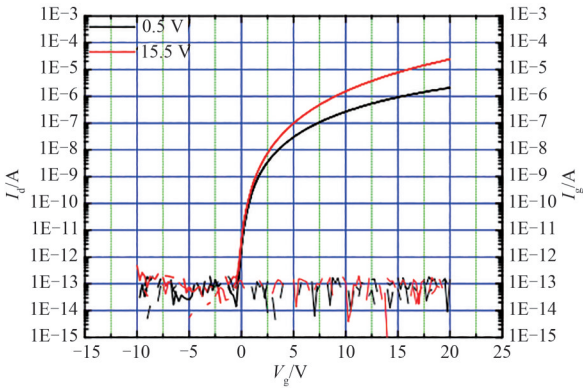
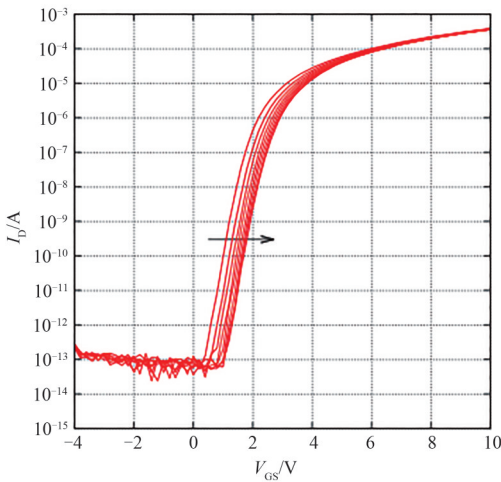


图 14 AM-EPD 中 ZnO TFT 的转移特性^[30]
Fig. 14 Transfer characteristics of ZnO TFT in the AM-EPD^[30]

10 000 s 直流应力作用后, IZO TFT 的阈值电压



变化在 2.5 V 范围内,饱和电流变化约为 19%;而 a-Si:H TFT 的变化高达 10 V,饱和电流变化为 71%。这些结果都表明 IZO TFT 器件具有更好的电压应力稳定性。2015 年, Fukada 等人首次成功制作了全丝网印刷 IZO TFT 背板,为氧化物 TFT 驱动背板的大面积、低成本制备提供了更多方案选择^[32]。

除了用作像素开关, MOTFT 还被用作与电子纸相关的其他电路中,如 Schimpf 等人在 2017 年使用 IGZO-TFT 工艺开发出的柔性基板上的 Dickson 电荷泵,用于提供足够的电压来快速更新电子纸的内容^[34]。器件具有 $10\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 的场效应迁移率、0.18 V/dec 的亚阈值斜率、2.7 V 的阈值电压和大约 10^9 的开关比,其特性如图 15 所示。

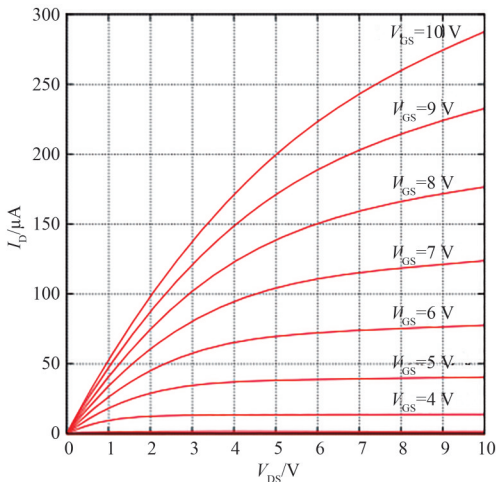


图 15 (a) 转移特性曲线,在无栅极偏置应力的情况下测量 10 次; (b) 输出特性曲线^[33]。
Fig. 15 (a) Transfer characteristic curves, measured 10 times without gate bias stress; (b) Output characteristic curves^[33]。

5 总结与展望

本文按照薄膜晶体管有源层材料分类,介绍了有机薄膜晶体管、非晶硅薄膜晶体管以及金属氧化物薄膜晶体管在电子纸显示器中的应用。尽管有机薄膜晶体管的柔性十分出色,但目前量产尚未实现,故其很难在柔性电子纸显示器中实际应用; a-Si 薄膜晶体管成本较低,但因迁移率较低,故在高性能柔性电子纸中应用受限; 相比之下,金属氧化物薄膜晶体管具有透明、高迁移率和已量产等优点,符合柔性电子纸显示器朝高性能化方向发展的要求。

近年来,电子纸显示器中的 TFT 背板广受研究人员关注,有研究者通过优化算法来降低 TFT 驱动背板的电流以实现 EPD 的低功耗^[34]。也有研究者在 TFT 阵列中集成特殊结构,以解决电子纸显示器手写与护眼显示的问题^[35]。但电子纸显示器的显示体验要想在未来追上液晶显示,还需要降低功耗,提高屏幕刷新率、柔性和全尺寸范畴的高性价比等技术指标。对于有机 TFT 和 a-Si TFT 来说,要想在未来电子纸显示器中有更进一步的应用,应当注重提高器件场效应迁移率和开关比,以适应电子纸显示器更高刷新率和分辨率的需求。而金属氧化物 TFT 性能

易受水、氧等环境因素影响,在未来应致力开发提高器件稳定性的方法。由于氧空位的存在使得氧化物半导体趋于n型施主缺陷掺杂,难以获得p型导电特性。而p型氧化物 TFT 的开发将推动n型和p型器件的互补技术,这对于实现电子纸的低功耗驱动电路具有重要意义。我们相

信随着越来越多的研究人员投入到面向柔性电子纸显示器的薄膜晶体管的深入的研究中去,在不久的将来其制备方法和器件性能都会得到进一步的提升,我们也相信性能出众的金属氧化物薄膜晶体管有潜力成为制备大面积、低成本、低功耗的电子纸显示器驱动背板的最佳选择。

参 考 文 献:

- [1] 杨澍,荆海,廖燕平,等. 驱动电子墨水电子纸的柔性 TFT 背板制造技术[J]. 液晶与显示, 2007, 22(2): 167-175.
YANG S, JING H, LIAO Y P, *et al.* Flexible TFT backplane fabricating technologies for E-ink based electronic paper driving [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2007, 22(2): 167-175. (in Chinese)
- [2] 刘皓月,刘忠,惠岚峰. 电子纸的研究进展及应用[J]. 天津造纸, 2017, 39(4): 27-29.
LIU H Y, LIU Z, HUI L F, Research progress and applications of electronic paper [J]. *Tianjin Paper Making*, 2017, 39(4): 27-29. (in Chinese)
- [3] 卜倩倩,王丹,邱云,等. 反射显示技术的研究进展[J]. 液晶与显示, 2019, 34(2): 169-176.
BU Q Q, WANG D, QIU Y, *et al.* Progress of reflective display technology [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2019, 34(2): 169-176. (in Chinese)
- [4] ESHKALAK S K, KHATIBZADEH M, KOWSARI E, *et al.* Overview of electronic ink and methods of production for use in electronic displays [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 117: 38-51.
- [5] COMISKEY B, ALBERT J D, YOSHIKAWA H, *et al.* An electrophoretic ink for all-printed reflective electronic displays [J]. *Nature*, 1998, 394(6690): 253-255.
- [6] SPRAGUE R A. SiPix microcup electrophoretic epaper for ebooks [C]//*The 25th Int'l Conference on Digital Printing Technologies, Digital Fabrication 2009 (NIP 25)*. Louisville, Kentucky, USA: Society for Imaging Science and Technology, 2009: 460-462.
- [7] HAYES R A, FEENSTRA B J. Video-speed electronic paper based on electrowetting [J]. *Nature*, 2003, 425 (6956): 383-385.
- [8] KIM D Y, STECKL A J. Electrowetting on paper for electronic paper display [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2010, 2(11): 3318-3323.
- [9] YOU H, STECKL A J. Three-color electrowetting display device for electronic paper [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(2): 023514.
- [10] BURNS S. An E-reader built using flexible display technology [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2010, 41(1): 477-479.
- [11] HENZEN A, ZHONG B P, LIU L W, *et al.* Color E-paper: current performance and achievable goals [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2021, 52(1): 999-1001.
- [12] GELINCK G H, HUITEMA H E A, VEENENDAAL EVAN, *et al.* Flexible active-matrix displays and shift registers based on solution-processed organic transistors [J]. *Nature Materials*, 2004, 3(2): 106-110.
- [13] BURNS S E, REEVES W, PUI B H, *et al.* A flexible plastic SVGA E-paper display [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2006, 37(1): 74-76.
- [14] BURNS S E, REYNOLDS K, REEVES W, *et al.* A scalable manufacturing process for flexible active-matrix e-paper displays [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2005, 13(7): 583-586.
- [15] MORIYA S, MIYAMOTO T, SAEKI T, *et al.* Flexible electrophoretic display with inkjet printed active matrix backplane [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2006, 37(1): 277-279.
- [16] KIM Y H, PARK S K, PARK S G, *et al.* Ink-jet printed 6,13-bis (triisopropylsilyl)ethynyl pentacene organic thin-film transistors for particle based electronic papers [J]. *ECS Transactions*, 2008, 16(9): 267-272.
- [17] LEE M W, SONG C K. Highly reliable pentacene TFT backplanes for electrophoretic displays on plastic substrates [J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2009, 54(9): 514-517.

- [18] HU T S, WANG Y K, PENG Y R, *et al.* High resolution flexible e-paper driven by printed OTFT [J]. *The Korean Information Display Society*, 2009, 421-427.
- [19] FENG L R, XU X L, GUO X J. Comparative analysis of organic thin film transistor structures for flexible E-paper and AMOLED displays [J]. *ECS Transactions*, 2011, 37(1): 105-112.
- [20] PARK C B, LEE J E, NA H, *et al.* Commercially applicable, solution-processed organic TFT and its backplane application in electrophoretic displays [J]. *Solid-State Electronics*, 2015, 111: 227-233.
- [21] FACCHETTI A, XIA Y, LU S F, *et al.* Organic materials for high-performance and flexible TFT backplanes [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2021, 52(S2): 608, doi: 10.1002/sdtp.15219.
- [22] LEE J K, CHOI N B, LIM Y S, *et al.* Development of a flexible color A4 size E-paper using a thin metal foil and a plastic substrate [C]//*LEOS 2007-IEEE Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting Conference Proceedings*. Lake Buena Vista: IEEE, 2007: 286-287.
- [23] LEE J K, LIM Y S, PARK C H, *et al.* a-Si:H thin-film transistor-driven flexible color E-paper display on flexible substrates [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2010, 31(8): 833-835.
- [24] KIM C D, PAK S H, LEE J K, *et al.* Flexible technology for large-size E-paper displays [J]. *Current Applied Physics*, 2010, 10(4): e127-e130.
- [25] AKAMATSU K, NISHIIKE A, MASUDA K, *et al.* A 13-inch flexible color EPD driven by low-temperature a-Si TFTs [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2011, 42(1): 198-201.
- [26] MOON H J, LIM S M, YUN E J, *et al.* Integrated a-Si:H source driver with improved output voltage for E-paper [J]. *Journal of Display Technology*, 2012, 8(1): 7-11.
- [27] KAMIYA T, HOSONO H. Material characteristics and applications of transparent amorphous oxide semiconductors [J]. *NPG Asia Materials*, 2010, 2(1): 15-22.
- [28] ITO M, KON M, MIYAZAKI C, *et al.* "Front drive" display structure for color electronic paper using fully transparent amorphous oxide TFT array [J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2007, E90-C(11): 2105-2111.
- [29] ITO M, MIYAZAKI C, ISHIZAKI M, *et al.* Application of amorphous oxide TFT to electrophoretic display [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2008, 354(19/25): 2777-2782.
- [30] LEE Y E, WOO S, CHO Y T, *et al.* Low voltage driving color active matrix electrophoretic display [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2010, 41(1): 1646-1649.
- [31] KAFTANOGLU K, VENUGOPAL S M, MARRS M, *et al.* Stability of IZO and a-Si:H TFTs processed at low temperature [J]. *Journal of Display Technology*, 2011, 7(6): 339-343.
- [32] FUKADA K, MAEDA Y, LIU X Y, *et al.* Fabrication of an all-screen printed oxide semiconductor thin film transistor active-matrix backplane [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2015, 46(1): 490-493.
- [33] SCHIMPF S, BAUR H, FRUEHAUF N. Dickson charge pumps made of indium-gallium-zinc-oxide thin-film transistors on foil-substrates [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2017, 48(1): 1765-1768.
- [34] WANG H I, QIN Z, TIEN P L, *et al.* Simultaneous optimization of halftoning image quality and TFT power consumption for multi-tonal E-papers [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2019, 50(1): 402-405.
- [35] LIN B Q, XI K R, LI X H, *et al.* Summary of electromagnetic in-cell touch solutions for E-paper [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2019, 50(S1): 556.

作者简介:



高执文(2002—),男,河南许昌人,本科生,主要从事新型信息显示材料与器件系统集成方面的研究。E-mail: 201930170461@mail.scut.edu.cn



宁洪龙(1971—),男,湖南株洲人,博士,教授,2004年于清华大学获得博士学位,主要从事新型信息显示材料与器件系统集成方面的研究。E-mail: ninghl@scut.edu.cn