

喷墨打印PVP绝缘层柔性薄膜晶体管研究

陶洪, 罗浩德, 宁洪龙, 姚日晖, 蔡炜, 郑喜凤, 汪洋, 王铂, 曹慧, 彭俊彪

引用本文:

陶洪, 罗浩德, 宁洪龙, 等. 喷墨打印PVP绝缘层柔性薄膜晶体管研究[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(5): 633–640.

TAO Hong, LUO Hao-de, NING Hong-long, et al. Inkjet printing PVP dielectric for flexible thin film transistor[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(5): 633–640.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0317>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

薄膜晶体管中绝缘层的研究现状与趋势

Research status and trends of insulating layer in thin-film transistor

液晶与显示. 2016, 31(4): 380–385 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163104.0380>

金属氧化物薄膜晶体管的激光退火

Laser annealing of metal oxide thin film transistor

液晶与显示. 2020, 35(12): 1211–1221 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203512.1211>

溶液法氧化物薄膜晶体管的印刷制备

Oxide semiconductor thin film transistor device print fabrication based on solution method

液晶与显示. 2017, 32(6): 443–454 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173206.0443>

绝缘层材料及结构对薄膜晶体管性能的影响

Effect of insulating layer material and structure on performance of thin film transistors

液晶与显示. 2017, 32(5): 344–351 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173205.0344>

高性能钆铝锌氧薄膜晶体管的制备

Fabrication of high performance Gadolinium–aluminum–zinc–oxide thin film transistors

液晶与显示. 2017, 32(5): 339–343 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173205.0339>

文章编号:1007-2780(2021)05-0633-08

喷墨打印 PVP 绝缘层柔性薄膜晶体管研究

陶 洪¹, 罗浩德², 宁洪龙², 姚日晖²,蔡 炜^{3*}, 郑喜凤^{3,4}, 汪 洋^{3,4}, 王 铂³, 曹 慧⁴, 彭俊彪²

(1. 广州新视界光电科技有限公司, 广东 广州 510530;

2. 华南理工大学 高分子光电材料及器件研究所, 广东 广州 510640;

3. 季华实验室, 广东 佛山 528000; 4. 长春希达电子技术有限公司, 吉林 长春 130103)

摘要: 柔性电子设备的快速发展对薄膜晶体管(TFT)提出了低功耗、耐弯折和可低温制备的要求。其中, 栅极绝缘层是核心材料之一。溶液法制备有机栅极绝缘层具有低成本、柔韧性强的优点, 适合大面积加工。本文采用喷墨打印法实现了聚乙烯吡咯烷酮(PVP)墨水的印刷成膜, 采用 XPS 分析了不同退火温度处理的印刷 PVP 薄膜成分差异, 并测试了 PVP 器件的漏电流、电容和转移特性参数。200 °C 退火的 PVP 薄膜漏电流密度 $\leq 10^{-4}$ A/cm² (5 V), 相对介电常数约为 3.8, 玻璃衬底器件饱和迁移率达到 4.6 cm²/(V·s), 开关比 $\geq 10^5$; PI 柔性衬底器件在 20 mm 弯折半径下迁移率 2.8 cm²/(V·s), 开关比约 6×10^4 , 在柔性电子领域有一定的应用前景。

关键词: 喷墨打印; 柔性衬底; 有机绝缘材料; 薄膜晶体管

中图分类号: TN27 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2020-0317

Inkjet printing PVP dielectric for flexible thin film transistor

TAO Hong¹, LUO Hao-de², NING Hong-long², YAO Ri-hui², CAI Wei^{3*}, ZHENG Xi-feng^{3,4}WANG Yang^{3,4}, WANG Bo³, CAO Hui⁴, PENG Jun-biao²

(1. Institute of Polymer Optoelectronic Materials and Devices,

Guangzhou NewVision Optoelectronic Technology Co., Ltd., Guangzhou 510530, China;

2. Institute of Polymer Optoelectronic Materials and Devices,

South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

3. Ji Hua Laboratory, Foshan 528000, China;

4. Changchun Cedar Electronics Technology Co., Ltd., Changchun 130103, China)

Abstract: Rapid development of flexible electronics requires thin film transistor (TFT) to have fea-

收稿日期: 2020-12-01; **修订日期:** 2021-01-05.

基金项目: 广东省重点领域研发计划(No.2020B010183002); 国家自然科学基金(No.51771074, No.62074059); 广东省基础与应用基础研究重大项目(No.2019B030302007); 中央高校基本科研业务费专项资金(No.2020ZYGXZR060, No.2019MS012); 季华实验室自主立项项目(No.X190221TF191)

Supported by Key-Area Research and Development Program of Guangdong Province (No. 2020B010183002); National Natural Science Foundation of China (No.51771074, No.62074059); Guangdong Major Project of Basic and Applied Basic Research (No.2019B030302007); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2020ZYGXZR060, No.2019MS012); Ji Hua Laboratory Scientific Research Project (No.X190221TF191)

* 通信联系人, E-mail: caiwei@jihualab.com

tures of low power consumption, good bending resistance and ability to be fabricated at low temperature. Gate insulator is one of the key materials in TFT device. Organic gate insulator prepared by solution method has the advantages of low cost, strong flexibility and is suitable for large area processing. In this paper, polyvinylpyrrolidone (PVP) dielectric film was achieved by inkjet printing process. The composition difference of printed PVP films with different annealing temperature was analyzed by XPS, and leakage current, capacitance and transfer characteristic of PVP devices were obtained by semiconductor analyzer. TFT device with PVP film annealed at 200 °C showed leakage current density $\leq 10^{-4}$ A/cm² (5 V) and relative dielectric constant about 3.8. Saturation mobility of device based on glass substrate is 4.6 cm²/(V · s) and the $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$ ratio is $\geq 10^5$ while that for device based on PI substrate with bending radius of 20 mm is 2.8 cm²/(V · s) and 6×10^4 , respectively. This result demonstrates that PVP dielectric is promising in flexible electronics.

Key words: inkjet printing; flexible substrate; organic dielectric material; thin-film transistor

1 引言

近年来,柔性薄膜晶体管(TFT)在可穿戴传感器和柔性平板显示器等柔性电子设备中得到了广泛应用^[1-2]。因此,人们对晶体管器件提出了低功耗、耐弯折和可低温制备等要求。栅极绝缘层作为 TFT 的关键材料,与器件的迁移率、阈值电压和开关比等参数息息相关^[3],进而影响器件的功耗、驱动能力以及弯折稳定性。栅极绝缘层制备方法中,化学气相沉积法需要苛刻的真空环境,对基板的尺寸和形状也有一定的要求,而溶液法具有设备简单、效率高的优点。其中,喷墨打印法可以直接实现薄膜的图形化,符合未来大面积制备柔性显示器件的需求^[4]。

以 ZrO_x 和 SiO_x 为主的无机介电材料电容大,缺陷少,但不耐弯折,使用过程中薄膜易破裂,器件失效;有机介电材料具有成本低、柔韧性好、易加工等优点,但漏电流较大,导致器件功耗大^[5]。Chung 等人^[6]使用全喷墨打印方法制备了 OTFT 器件,以 TIPS-pentacene 为半导体, poly(4-vinylphenol) 为绝缘层,饱和迁移率为 0.06 cm²/(V · s),电流开关比为 10^4 。有机/无机混合绝缘材料理论上可综合两者的优点,被认为是柔性 TFT 的理想绝缘材料。Morales 等人^[7]以 ZnO 为有源层材料,采用旋涂法制备的 PMMA-SiO₂ 为栅极绝缘层,其 TFT 器件场效应迁移率为 0.2 cm²/(V · s),开关比 10^4 ,阈值电压 13.9 V。Urquijo 等人^[8]以旋涂 polyvinyl phenol-TiO₂ 为绝缘层制备了 CdS 基 TFT,迁移率 0.2

cm²/(V · s),开关比 10^4 。目前,基于溶液法混合绝缘材料的 TFT 器件普遍存在漏电流大、开关比低的问题,主要是因为混合体系中的有机成分自身介电性能及兼容性差,导致薄膜缺陷多,漏电流大。因此,开发一种适用于溶液法混合绝缘层体系的有机材料意义重大。

本文研究了喷墨打印法制备聚乙烯吡咯烷酮(polyvinylpyrrolidone, PVP)绝缘层, PVP 材料可溶于多数醇和醚溶剂,同时可与 ZrO_x 前驱体混溶,具备获得高质量印刷混合绝缘层的条件。分析了不同退火温度下打印 PVP 薄膜的化学成分、漏电流密度和电容,并制备了 TFT 器件,其中有源层为真空法测射的 IGZO 薄膜,分析了打印 PVP 薄膜退火温度对器件转移特性曲线的影响。最终获得了 PI 衬底的柔性器件,饱和迁移率 4.6 cm²/(V · s),开关比 1.6×10^5 ,阈值电压 0.9 V,在曲率半径为 20 mm 的弯折条件下仍保持一定的性能,具有良好的抗弯折特性。

2 实验与分析

2.1 材料、结构及方法

PVP 绝缘墨水的制备方法为,将 0.5 g 聚乙烯基吡咯烷酮(PVP)(分子量:130 000)粉末(分子结构如图 1(a))溶于 10 mL 乙二醇中(5%质量分数),搅拌 2 h 后在空气中放置 24 h。将静止后的溶液通过 0.45 μm 聚四氟乙烯滤头过滤,注入 10 pL 的卡夹中。打印前需要对基板进行 2 min 的 UV 光照亲水处理^[9],打印液滴间隔为 30 μm,在空气氛围中分别以 200, 250, 300 °C 的温度

退火 1 h, 得到 PVP 薄膜。薄膜的漏电流密度和电容通过对金属-绝缘层-金属(MIM)结构器件测试得到; TFT 器件采用底栅顶接触型器件结构, 其中柔性器件需采用带有 PI 层和 SiN_x 缓冲层的玻璃(图 1(b)), 栅极和源漏极采用铝电极, 有源层采用 IGZO 材料(元素比 1:1:1:4)^[10], 电极厚度为 150 nm, 有源层厚度 10 nm, 宽长比为 500:150, 电极和有源层均使用直流磁控溅射制备。

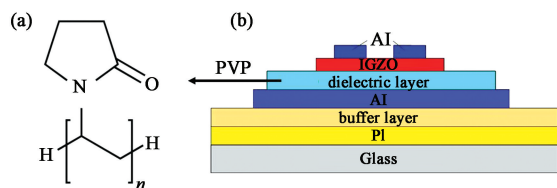


图 1 (a) 聚乙烯吡咯烷酮(PVP)化学结构式; (b) 印刷绝缘层柔性器件结构。

Fig.1 (a) Chemical structure of polyvinyl pyrrolidone; (b) Structure of flexible TFT device with printed dielectric layer.

PVP 薄膜的表面形貌由偏光光学显微镜和台阶仪扫描获得, 薄膜的化学成分采用 X 射线光电子能谱(XPS)进行分析^[11], 其介电性质和器件性能使用半导体参数分析仪进行测试, 饱和迁移率(μ_{sat})从式(1)获得^[12], 其中 C_i , I_D , V_G , V_{th} , W 和 L 分别是栅极绝缘子单位面积的电容、漏极电流、栅极电压、阈值电压、沟道宽度和长度。

$$I_D^{1/2} = \left(\frac{WC_i\mu_{\text{sat}}}{2L} \right)^{1/2} (V_G - V_{\text{th}}). \quad (1)$$

2.2 薄膜形貌

打印 PVP 薄膜的表面形貌通过偏光显微镜以及台阶仪进行测试分析。由图 2(a) 观察可得, 打印 PVP 薄膜的边界清晰, 边缘颜色较深而中间较浅, 为咖啡环效应引起的溶质在边缘聚集引起。台阶仪对薄膜中部截面的扫描(图 2(b))也证实了这一点。边缘处存在宽度为 200 μm 的凸起, 凸起高度约 1 400 nm; 中间较平坦处高度约 200 nm, 即薄膜厚度。中间局部部位 200 μm 距离的轮廓扫描放大图可以看到, 薄膜表面平整, 起伏仅 2 nm 左右, 无明显突刺或缺陷。总的来说, 打印 PVP 薄膜中间平整部位适合有源层材料的生长, 但严重的咖啡环效应制约了器件尺寸的进一步缩小^[13]。本研究主要探索印刷 PVP 绝缘层的漏电流和抗弯折性, 以评估其是否适用于制备印刷混

合绝缘层, 因此未对其成膜均匀性提出过多要求。后续对印刷混合绝缘层的研究, 可以通过采用混合溶剂或者加入表面活性剂的方法改善咖啡环效应。

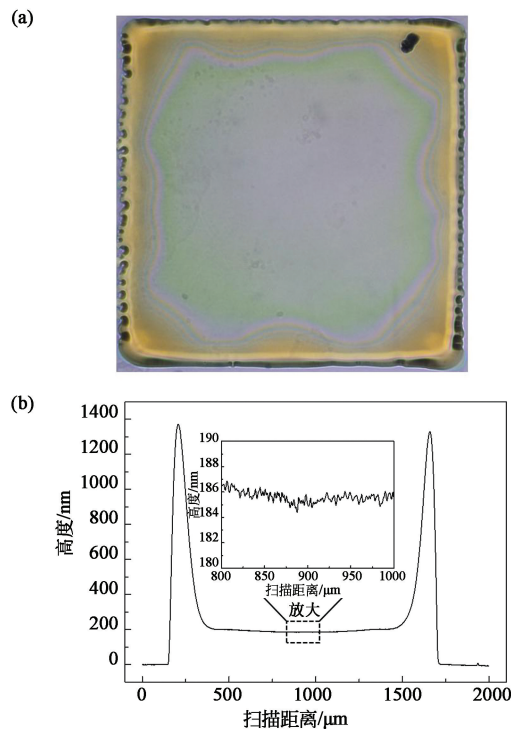


图 2 聚乙烯吡咯烷酮(PVP)的偏光显微镜照片(a)和截面扫描轮廓(b)

Fig.2 Polarizing microscope photograph (a) and cross-section scanning profile of printed PVP film (b)

2.3 不同退火温度的影响

有机介电薄膜对退火温度非常敏感, 过低的退火温度会导致溶剂排除不充分, 而过高的退火温度则可能使有机物分解, 破坏分子结构和介电性能。由于溶剂乙二醇沸点为 192 $^{\circ}\text{C}$, 因此选择退火温度大于 200 $^{\circ}\text{C}$ 来确保溶剂充分去除。图 3 为 200, 250, 300 $^{\circ}\text{C}$ 退火处理的打印 PVP 薄膜 XPS 全谱扫描和 O 1s 轨道扫描。PVP 分子中主要存在 C, N, O 三种元素, 因此着重关注 3 种元素的情况来分析薄膜成分的变化。当退火温度为 200 $^{\circ}\text{C}$ 时, XPS 全谱中 C 元素原子比例为 67.14%, N 元素为 12.90%, O 元素为 19.96%。O 1s 轨道扫描图中, 可以将测试结果分为两个分峰, 分别为 531.5 eV 峰位的 C—OH 峰和 533 eV 峰位的 C=O 峰^[14], 模拟得到此时 C—OH 峰与 C=O 峰比例接近, 分别为 53.04% 和 46.96%。当退火温

度上升至 250 ℃时,C 元素比例下降约 5%,N 元素基本不变,而 O 元素比例上升。同时,C—OH 峰的比例提高至 75%以上,远超 C=O 峰比例。其主要原因是 PVP 薄膜随温度上升被空气中的氧气氧化,—H(氢键)被氧化成—OH(羟基),大气氛围中的氧气增加了薄膜中 O 元素的比例,并且部分 C=O 键转化为更稳定的 C—OH 键^[15]。PVP 薄膜当温度进一步升高到 300 ℃时,O 和 N 原子比下降,C 原子比例上升,C—OH 峰和 C=O 峰比例变化不大,此时 O 元素和 N 元素会以气体的形式挥发一部分。因此,当退火温度从 200 ℃

逐渐升高时,PVP 薄膜结构会发生变化,长链遭到一定程度的破坏,甚至断裂。除此之外,C—OH基团峰位升高由 531.48 eV 向高能级方向移动至 531.72 eV,表明 C—O 键结合力逐渐变强,形成稳定结构;而 C=O 基团峰位由 532.45 eV 向低能级方向移动至 533.31 eV,随后向高能级方向移动至 533.51 eV,表明在 200~250 ℃范围内,C=O被打断形成气体释放,结合力变弱,但继续升高退火温度时,剩余未被打断的 C=O 分子结构稳定,结合力强。XPS 测试的相关数据汇总于表 1 中。

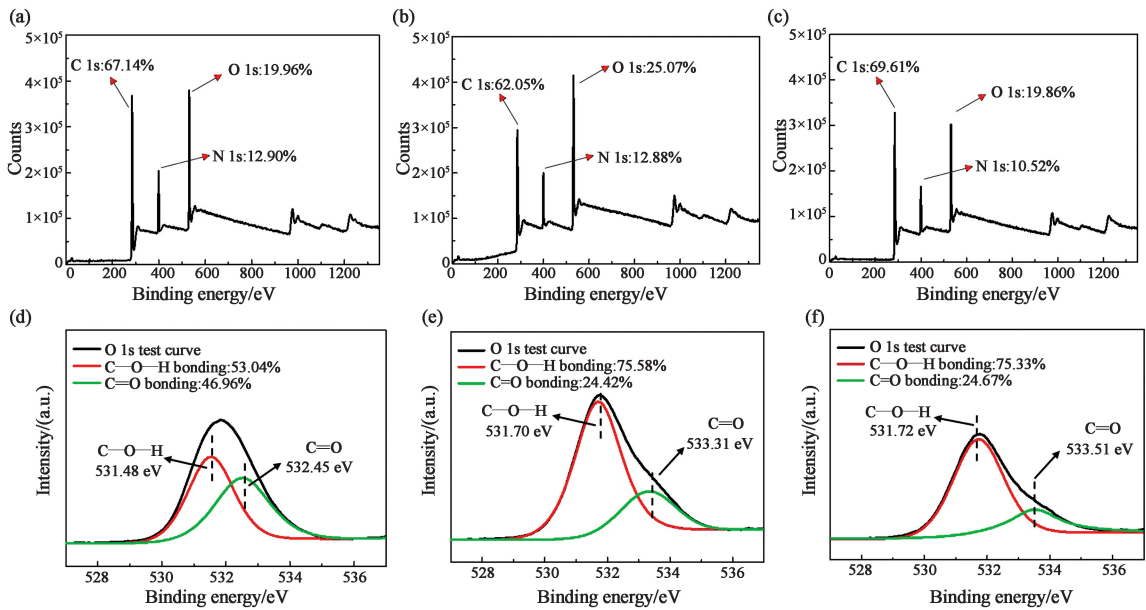


图 3 (a) 200 ℃,(b) 250 ℃,(c) 300 ℃退火 PVP 薄膜 XPS 扫描全谱以及 (d) 200 ℃,(e) 250 ℃,(f) 300 ℃退火 PVP 薄膜 O 1s 轨道扫描谱图。

Fig.3 XPS scan spectra of PVP film annealed at (a) 200 ℃, (b) 250 ℃, (c) 300 ℃ and O 1s spectra of PVP film annealed at (d) 200 ℃, (e) 250 ℃, (f) 300 ℃.

表 1 不同退火温度下 PVP 薄膜 XPS 测试汇总

Tab.1 Summary of XPS result of PVP film annealed at different temperature

退火温度/℃	O 1s/%	N 1s/%	C—OH/%	C=O/%	C—OH 峰位/eV	C=O 峰位/eV
200	19.96	12.90	53.04	46.96	531.48	532.45
250	25.07	12.88	75.58	24.42	531.70	533.31
300	19.86	10.52	75.33	24.67	531.72	533.51

退火温度对 PVP 薄膜和器件的影响最终要体现在其电学特性上,包括漏电流密度、电容等绝缘参数(图 4)。200 ℃退火温度下,打印 PVP 薄膜的漏电流密度约为 10⁻⁴ A/cm² (5 V 电压

下),与同等厚度氧化物绝缘层相比,漏电流密度大 1~2 个数量级^[16]。250 ℃退火温度的 PVP 薄膜漏电流密度略小于 200 ℃退火得到的薄膜,但 300 ℃退火的 PVP 薄膜漏电流密度急

剧上升,达到 $5 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ (5 V),表明 PVP 薄膜在过高的退火温度下结构遭到破坏,导致漏电流密度增大。在图 4(b)中,200 °C 和 250 °C PVP 薄膜的电容分别为 22 pF 和 24 pF,换算可得介电常数约为 3.8,而退火温度为 300 °C 的 PVP 薄膜的电容仅为 17 pF,介电常数仅为 2.6。

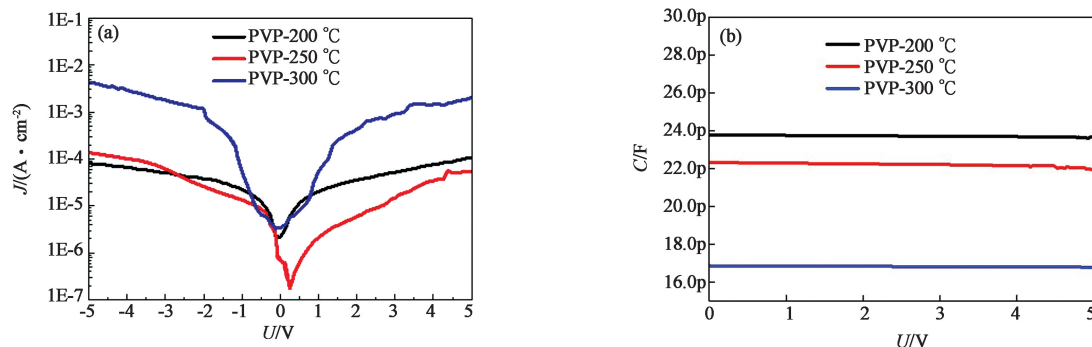


图 4 不同温度退火喷墨打印 PVP 薄膜的漏电流密度 (a) 与电容 (b)

Fig.4 Leakage current density (a) and capacitance (b) of printed PVP film annealed at different temperature

图 5 为不同退火温度 PVP 薄膜的 TFT 器件转移特性曲线。其中,200 °C 退火的 PVP 绝缘层器件饱和迁移率为 $4.6 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$,开关比高达 6×10^5 。250 °C 退火 PVP 的器件关态电流 I_{off} 相近,但 I_{on} 却小了一个数量级,饱和迁移率仅 $2.6 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$,是由于 PVP 薄膜在空气中吸入了大量的氧气,在半导体层和绝缘层之间形成能够捕获载流子的缺陷^[18-19]。300 °C 退火 PVP 器件的关态电流高达 $5 \times 10^{-9} \text{ A}$,开关比仅有 10^4 ,是 PVP 介电层在高退火温度下受到破坏,损失了介电性能所致。3 个退火温度制备的 PVP 薄膜对应器件的阈值电压分别为 1.7,2.8,0.9 V,低的阈值电压更利于实现低功耗电子器件。综合来看,随着 PVP 薄膜退火温度的上升,器件性能发生退化,基于 200 °C PVP 薄膜的器件关态电流 5×10^{-10} ,符合柔性电子器件低温成膜的要求,相对于大部分溶液法制备有机绝缘层 TFT 器件的研

究已处于领先水平,用于制备有机/无机混合绝缘材料后漏电流会进一步降低。基于不同退火温度 PVP 的 TFT 器件性能汇总见表 2。

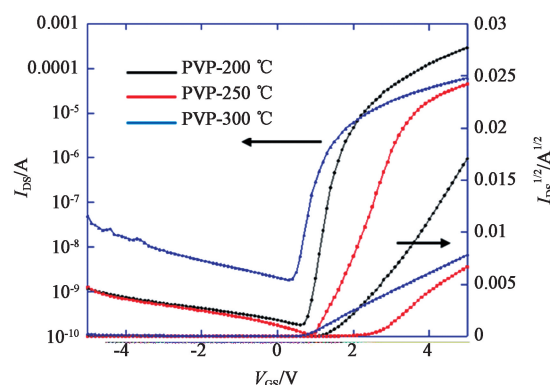


图 5 不同温度退火的 PVP 薄膜的 TFT 器件转移特性曲线

Fig.5 Transfer characteristics curves of TFT with PVP film annealed at different temperature

表 2 不同退火温度下的 PVP 绝缘层 TFT 器件的参数汇总

Tab.2 Summary of TFT characteristics with PVP dielectric annealed at different temperature

绝缘层	退火温度/°C	迁移率/ $(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	开关比	阈值电压/V	关态电流/A
PVP	200	4.6	6×10^5	1.7	5×10^{-10}
PVP	250	2.6	2×10^5	2.8	1×10^{-10}
PVP	300	1.1	3×10^4	0.9	6×10^{-9}

2.4 柔性器件性能

基于上述实验基础,本文在 PI 衬底上制备了基于打印 PVP 薄膜的 TFT 器件,薄膜退火温度为 200 ℃。在制备过程中,PI 衬底贴附于玻璃衬底上进行溅射及打印,器件制备完成后将 PI 膜从玻璃上撕下,并贴附于不同曲率半径夹具上,进行测试,柔性器件在不同曲率半径条件下转移特性曲线如图 6 所示。未施加弯曲的 PI 衬底器件迁移率 4.2 cm²/(V·s),开关比大于 10⁵,关态电流比刚性衬底器件高,为 6 × 10⁻¹⁰ A,表明 PVP 薄膜漏电流较大,这主要是由 PI 柔性衬底表面不平整引起的。在 30 mm 曲率半径的弯折条件下,迁移率、开关比、关态电流与阈值电压基本不变,此时弯折对器件各功能层影响较小。当曲率半径降低到 20 mm 时,即弯折程度增加时,器件迁移率降低至 2.8 cm²/(V·s),关态电流只略微增加,但开态电流下降约 1 个数量级,开关比降至 6 × 10⁴,此时弯折对绝缘薄膜的影响依旧很小,但有源层薄膜有一定的损坏,可能因为 IGZO 本身不具备太好的抗弯折特性,或是 PVP 薄膜表面不够平整,导致溅射在 PVP 上的 IGZO 薄膜应力集中从而性能退化。进一步增加柔性器件的弯折程度时(曲率半径为 10 mm),迁移率降低至 0.7 cm²/(V·s),开、关态电流

均显著下降,特别是开态电流下降至 10⁻⁶ A 附近,IGZO 有源层性能加剧恶化^[20]。不同弯折半径下器件阈值电压变化与有源层、绝缘层受破坏程度有关,也与界面缺陷的捕获和释放相关^[21],从测试结果来看无明显规律。数据汇总于表 3 中。总的来看,PI 柔性衬底的器件性能稍微差于刚性玻璃衬底器件,打印 PVP 绝缘层具有一定的抗弯折特性,柔性器件在 20 mm 以上弯曲半径条

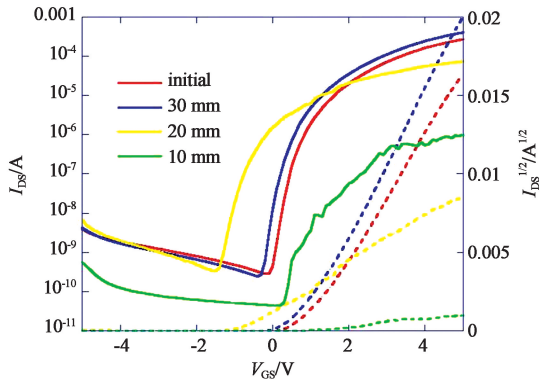


图 6 喷墨打印 PVP 绝缘层柔性器件不同弯曲条件下的转移特性曲线

Fig. 6 Transfer characteristics of flexible TFT device with printed PVP dielectric under different curvature radius

表 3 喷墨打印 PVP 绝缘层柔性器件不同弯曲条件下参数汇总

Tab.3 Summary of flexible TFT characteristic with printed PVP dielectric under different curvature radius

绝缘材料	弯曲半径/nm	迁移率/(cm ² ·V ⁻¹ ·s ⁻¹)	开关比	阈值电压/V	关态电流/A
PVP	无	4.2	2 × 10 ⁵	0.9	6 × 10 ⁻¹⁰
PVP	30	5.0	2 × 10 ⁵	0.7	6 × 10 ⁻¹⁰
PVP	20	2.8	6 × 10 ⁴	-0.4	7 × 10 ⁻¹⁰
PVP	10	0.7	9 × 10 ³	1.1	9 × 10 ⁻¹¹

件下性能稳定,具有一定的应用前景。

3 结 论

本文通过喷墨打印法制备了聚乙烯吡咯烷酮(PVP)薄膜及其柔性器件,研究了薄膜形貌和后退火温度的影响,并测试了不同曲率半径下柔性器件的性能。采用 200 ℃ 以上的温度进行后退火时,器件迁移率达到 4.6 cm²/(V·s),开关比高达 6 × 10⁵,阈值电压 1.7 V,关态电流 5 × 10⁻¹⁰

A。随着温度升高,薄膜会有部分程度的分解从而使介电能力下降。柔性器件在 30 mm 的曲率半径弯折条件下性能保持稳定,器件迁移率 5 cm²/(V·s),开关比 2 × 10⁵,阈值电压 0.7 V,关态电流 6 × 10⁻¹⁰ A,具有一定的抗弯折特性。印刷 PVP 材料漏电流较低,抗弯折稳定性好,是制备无机/有机混合绝缘层的理想掺杂材料,可通过溶剂体系和掺杂比例的优化,减弱咖啡环效应,并使其在介电特性上有更好的表现,从而更符合柔性电子器件未来发展趋势。

参 考 文 献:

- [1] FORTUNATO E, BARQUINHA P, MARTINS R. Oxide semiconductor thin-film transistors: a review of recent advances [J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(22): 2945-2986.
- [2] PARK J S, MAENG W J, KIM H S, *et al.* Review of recent developments in amorphous oxide semiconductor thin-film transistor devices [J]. *Thin Solid Films*, 2012, 520(6): 1679-1693.
- [3] SHARMA B K, AHN J H. Flexible and stretchable oxide electronics [J]. *Advanced Electronic Materials*, 2016, 2(8): 1600105.
- [4] 钟云肖, 谢宇, 周尚雄, 等. 溶液法氧化物薄膜晶体管的印刷制备 [J]. 液晶与显示, 2017, 32(6): 443-454.
ZHONG Y X, XIE Y, ZHOU S X, *et al.* Oxide semiconductor thin film transistor device print fabrication based on solution method [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(6): 443-454. (in Chinese)
- [5] 钟云肖, 周尚雄, 姚日晖, 等. 旋涂法制备氧化锆介质层及其在薄膜晶体管中的应用 [J]. 发光学报, 2018, 39(2): 214-219.
ZHONG Y X, ZHOU S X, YAO R H, *et al.* Fabrication of zirconia dielectric layer by spin coating and its application in thin film transistor [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(2): 214-219. (in Chinese)
- [6] CHUNG S, JANG J, CHO J, *et al.* All-inkjet-printed organic thin-film transistors with silver gate, source/drain electrodes [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2011, 50(3S): 03CB05.
- [7] MORALES-ACOSTA M D, QUEVEDO-LÓPEZ M A, RAMÍREZ-BON R. PMMA-SiO₂ hybrid films as gate dielectric for ZnO based thin-film transistors [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2014, 146(3): 380-388.
- [8] DE URQUIJO-VENTURA M S, RAO M G S, MERAZ-DAVILA S, *et al.* PVP-SiO₂ and PVP-TiO₂ hybrid films for dielectric gate applications in CdS-based thin film transistors [J]. *Polymer*, 2020, 191: 122261.
- [9] GUO D, ENTANI S, IKEDA S, *et al.* Effect of UV/ozone treatment of the dielectric layer on the device performance of pentacene thin film transistors [J]. *Chemical Physics Letters*, 2006, 429(1/3): 124-128.
- [10] GENG D, KIM H M, MATIVENGA M, *et al.* High resolution flexible AMOLED with integrated gate-driver using bulk-accumulation a-IGZO TFTs [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2015, 46(1): 423-426.
- [11] TSAY C Y, HUANG T T. Characterization of low-temperature solution-processed indium-zinc oxide semiconductor thin films by KrF excimer laser annealing [J]. *Ceramics International*, 2014, 40(6): 8287-8292.
- [12] CAI W, NING H L, ZHOU S X, *et al.* Effective evaluation strategy toward low temperature solution-processed oxide dielectrics for TFT device [J]. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2019, 7: 1140-1144.
- [13] 何慧, 王刚, 赵淑玲, 等. 有机绝缘层材料聚(4-乙烯基苯酚)喷墨打印工艺研究 [J]. 液晶与显示, 2012, 27(5): 590-594.
HE H, WANG G, ZHAO S L, *et al.* Inkjet printing organic dielectric material-poly(4-vinylphenol) [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(5): 590-594. (in Chinese)
- [14] HWANG S, LEE J H, WOO C H, *et al.* Effect of annealing temperature on the electrical performances of solution-processed InGaZnO thin film transistors [J]. *Thin Solid Films*, 2011, 519(15): 5146-5149.
- [15] SOCRATOUS J, BANGER K K, VAYNZOF Y, *et al.* Electronic structure of low-temperature solution-processed amorphous metal oxide semiconductors for thin-film transistor applications [J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(12): 1873-1885.
- [16] LI X F, XIN E L, ZHANG J H. Low-temperature solution-processed zirconium oxide gate insulators for thin-film transistors [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2013, 60(10): 3413-3416.
- [17] LEE S W, KIM J, CHEN S, *et al.* Carbon nanotube/manganese oxide ultrathin film electrodes for electrochemical capacitors [J]. *ACS Nano*, 2010, 4(7): 3889-3896.
- [18] AHN C H, CHO H K, KIM H. Carrier confinement effect-driven channel design and achievement of robust electrical/photostability and high mobility in oxide thin-film transistors [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, 4(4): 727-735.
- [19] PARK J H, YOO Y B, LEE K H, *et al.* Low-temperature, high-performance solution-processed thin-film tran-

- sistors with peroxo-zirconium oxide dielectric [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5(2): 410-417.
- [20] 宁洪龙, 曾勇, 姚日晖, 等. 室温生长 AZO/ Al_2O_3 叠层薄膜晶体管性能研究 [J]. *发光学报*, 2016, 37(11): 1372-1377.
- NING H L, ZENG Y, YAO R H, *et al.* Properties of AZO/ Al_2O_3 stacked thin film transistors prepared at room temperature [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, 37(11): 1372-1377. (in Chinese)
- [21] KALOUMENOS M, HOFMANN K, SPIEHL D, *et al.* Electrical properties of solution processed multilayer high-k ZrO_2 capacitors in inert atmosphere [J]. *Thin Solid Films*, 2016, 600: 59-64.

作者简介:



陶 洪(1983—)男,广东梅县人,博士,高级工程师,2010 年于华南理工大学获得博士学位,主要从事新型信息显示材料与器件方面的研究。E-mail: th@newvision-cn.com



蔡 炜(1994—),男,广东广州人,博士,2020 年于华南理工大学获得博士学位,主要从事光电材料与器件领域的研究。E-mail: caiwei@jihualab.com。