

文章编号: 1000-7032(2018)07-0968-06

硅掺杂氧化锡柔性薄膜晶体管的制备与特性

张建东, 刘贤哲, 张啸尘, 李晓庆, 王磊, 姚日晖*, 宁洪龙, 彭俊彪
(华南理工大学材料科学与工程学院, 高分子光电材料与器件研究所, 发光材料与器件国家重点实验室, 广东广州 510640)

摘要: 研究了柔性非晶硅掺杂氧化锡(SiSnO, STO)薄膜晶体管的电学特性及其在弯曲状态下的电学特性。通过射频磁控溅射在聚酰亚胺(Polyimide, PI)衬底上制备出了柔性非晶硅掺杂氧化锡薄膜晶体管。通过对比不同退火温度的器件性能,发现在300℃能获得最佳器件性能,其饱和迁移率达到 $2.71 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,开关比高于 10^6 ,亚阈值摆幅为 $1.95 \text{ V} \cdot \text{dec}^{-1}$,阈值电压为2.42 V。对器件在不同曲率半径(5, 10, 20, 30 mm)状态下进行输出特性和转移特性测试,发现其在弯曲状态下仍具有良好的电学性能。

关键词: 柔性; 硅掺杂氧化锡; 薄膜晶体管

中图分类号: TN321.5

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20183907.0968

Preparation and Properties of Flexible Thin Film Transistors with Si-incorporated SnO₂ Active Layer

ZHANG Jian-dong, LIU Xian-zhe, ZHANG Xiao-chen, LI Xiao-qing,
WANG Lei, YAO Ri-hui*, NING Hong-long, PENG Jun-biao

(Institute of Polymer Optoelectronic Materials and Devices, State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

* Corresponding Author, E-mail: yaorihui@scut.edu.cn

Abstract: A kind of flexible amorphous silicon doped tin oxide(SiSnO, STO) thin film transistor (TFT) with anti-bending property of polyimide as a flexible substrate was prepared by RF magnetron sputtering method. By comparing the performance of the devices with different annealing temperatures, it is found that the best device performance is achieved at 300℃, the field effect mobility is $2.71 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, the switching ratio is higher than 10^6 and the subthreshold swing is $1.95 \text{ V} \cdot \text{dec}^{-1}$, and the threshold voltage is 2.42 V. By measuring the output characteristics and transfer characteristics of the device at different radius of curvature(5, 10, 20, 30 mm), the device is still operating well under the four different radii of curvature.

Key words: flexible, silicon doped tin oxide, thin film transistor

1 引 言

柔性电子和显示器由于其可弯曲、重量轻和便携性高等各种优点,能够极大丰富显示设备的功能

和使用,成为当今显示领域研究的热点^[1-2]。作为柔性薄膜晶体管(TFT)常用的有源层材料,非晶硅(a-Si:H)和有机半导体材料^[3-4]过低的迁移率限制了其在大面积、高分辨率显示器上的应用。研究发现^[5-8]

收稿日期: 2017-11-16; 修订日期: 2017-12-11

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0404703)资助项目

Supported by National Key R&D Program of China(2017YFB0404703)

基于氧化物半导体的 TFT 具有迁移率高、均匀性好、可见光透明度高、与现有 TFT 制造技术兼容成本低和制备温度低等优点, 可满足人们对大尺寸、高分辨和柔性显示等技术需求, 成为柔性电子和显示器有源层材料选择的方向。在器件结构方面, 与刻蚀阻挡型结构器件相比, 背沟道刻蚀型 (BCE)^[8] 结构器件对沟道尺寸定义精度高, 易于实现器件“小型化”, 达到高分辨显示, 但其缺点在于器件缺少沟道保护层。目前作为金属氧化物 TFT 最常使用的有源层材料之一, 铟镓锌氧化物 (Indium gallium zinc oxide, IGZO) TFT 虽然在迁移率、光透过率、阈值电压和源漏电流开关比等方面具有独特优势^[9-13], 比如超过 $10 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的载流子迁移率、超过 10^9 电流开关比, 但 IGZO 易于被腐蚀, 造成器件背沟道损伤, 获得高性能器件成本大大提高。开发一种抗酸性的氧化物半导体材料不但能够适用于制备背沟道刻蚀型器件, 获得更高的沟道尺寸定义精度, 更能免去器件沟道保护层的制备, 大大降低了 TFT 的制备成本。因此, 开发出一种抗酸性强的氧化物半导体材料十分必要。氧化锡由于具有较强的化学稳定性和抗酸碱能力的特点, 十分适合作为 TFT 器件的有源层材料使用。由于初始沉积态 SnO_2 薄膜具有较高的载流子浓度, 很难直接制备出高性能器件, 要实现 SnO_2 薄膜的应用, 关键在于对 SnO_2 薄膜进行元素掺杂调控载流子浓度^[14]。根据 Zhang 等^[15] 基于掺杂剂得到的经验方程, 因为 Si—O 结合键能是 799.6 kJ/mol 高于 Sn—O 结合键能 (531.8 kJ/mol), 使得薄膜中的氧不容易流失, 从而降低薄膜中的载流子浓度, 本文选择硅掺杂调控氧化锡薄膜中的载流子浓度。当金属与半导体材料接触时, 若金属与半导体之间的功函数差相对很小, 接触面势垒很窄, 容易形成欧姆接触。金属 Mo 的功函数为 4.6 eV , 实验测得 STO 薄膜在高温退火后的功函数为 4.856 eV , 这使得 STO 薄膜与金属 Mo 容易形成良好的欧姆接触, 本实验采用 Mo 作为器件源、漏电极材料。目前已有研究者开展了 STO-TFT 的相关研究^[16], 并取得了良好的器件性能, 但相关研究都是制备在玻璃或者硅片等刚性衬底, 本文将结合当今柔性显示的热点, 研究柔性 STO-TFT 相关制备过程及其电学性能。同时, 聚酰亚胺 (PI) 是一种综合性能最佳的有机高分子材料之一, 具有易于弯曲和能够承受较高的温度等优点, 适合作为本文柔性 TFT 的基板使用。

本文以柔性 PI 作为衬底, 通过射频磁控溅射

以 STO 作为半导体有源层, 制备了一种柔性 TFT 器件。将器件分别置于空气环境以室温、 200 、 250 、 300 、 $350 \text{ }^\circ\text{C}$ 退火 30 min , 分析退火温度对器件电学性能的影响, 同时研究该柔性 STO-TFT 在弯曲状态下的工作性能。

2 柔性 STO-TFT 的制备和测试

本文制备的 STO-TFT 为背沟道刻蚀底栅型结构, 基本结构如图 1 所示。基底材质为于广州新视界光电科技有限公司购置的柔性 PI (含 $\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$ 缓冲层); 栅极采用铝钕合金 (Al: Nd) 通过直流磁控溅射并图形化生成; 在栅极上通过阳极氧化制备一层 200 nm 厚氧化铝作为绝缘层; 采用掩膜法控制器件的有源层尺寸 (沟道宽度 $W = 1000 \text{ }\mu\text{m}$ 、长度 $L = 300 \text{ }\mu\text{m}$), 通过在室温射频磁控溅射沉积了一层 5 nm 厚的硅掺杂氧化锡 (STO) 薄膜作为半导体有源层, 其中靶材组成的质量比为 $\text{SiO}_2 : \text{SnO}_2 = 5 : 95$, 溅射功率为 80 W , 工作气压为 0.27 Pa , 溅射气体为 $\text{Ar} : \text{O}_2 = 100 : 10$ 的混合气体。最后再通过掩膜板在有源层上沉积源、漏电极 Mo。将制得的器件分别置于空气环境以室温、 200 、 250 、 300 、 $350 \text{ }^\circ\text{C}$ 退火 30 min , 分别测试其输出特性和转移特性, 并将获得最佳电学性能退火温度的柔性 STO-TFT 进行弯曲电学性能测试。柔性 STO-TFT 器件输出特性和转移特性采用探针台和半导体参数仪 (Agilent 4155C) 测试。

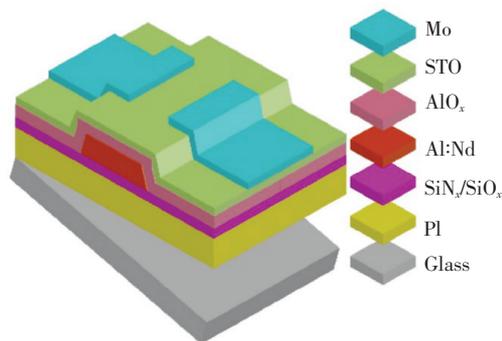


图 1 柔性 STO-TFT 结构

Fig. 1 Sketch map of flexible STO-TFT

3 结果与讨论

3.1 不同退火温度柔性 STO-TFT 的电学特性

在柔性 STO-TFT 的制备过程中, 退火时发现, 上述 $350 \text{ }^\circ\text{C}$ 退火的 TFT 器件 PI 衬底发生明显受热形变, 部分栅极出现金属脱落现象。通过在

偏光显微镜下观察,如图 2 所示,350 °C 退火的柔性 STO-TFT 部分位置呈气泡状隆起,并且源、漏电极和栅极部分出现密集小孔。该柔性 STO-TFT 器件无法承受较高温度的退火,无法表现出器件特性。200,250,300 °C 退火和不进行退火处理的柔性 STO-TFT 器件能够保持完整的外貌形态,其中图 3 所示为 300 °C 退火的柔性 STO-TFT。

通过实验测试,柔性 STO-TFT 的输出特性曲线如图 4 所示。源漏电压 V_D 从 0 V 增加到 30 V,栅极电压 V_G 从 0 V 增加到 30 V,间隔为 10 V。由图 4(a)可以得到,制备的柔性 STO-TFT 不进行退火无法获得良好的器件性能。退火能够细化晶

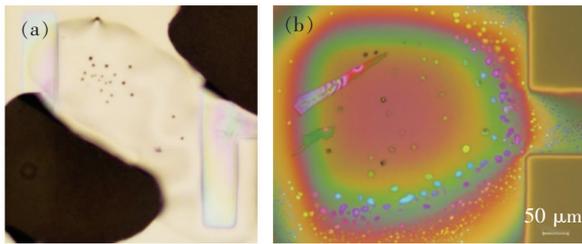


图 2 350 °C 退火的柔性 STO-TFT。(a) 350 °C 退火后栅极;(b) 350 °C 退火源/漏电极。

Fig. 2 Flexible STO-TFT annealed at 350 °C. (a) Gate damage after 350 °C annealing. (b) Source/drain damage after 350 °C annealing.

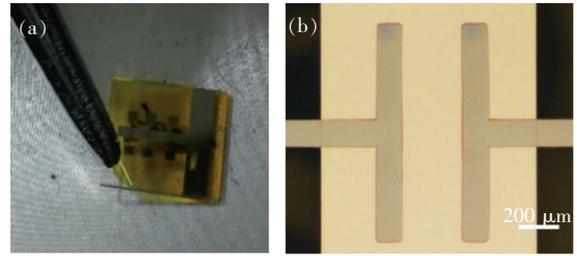
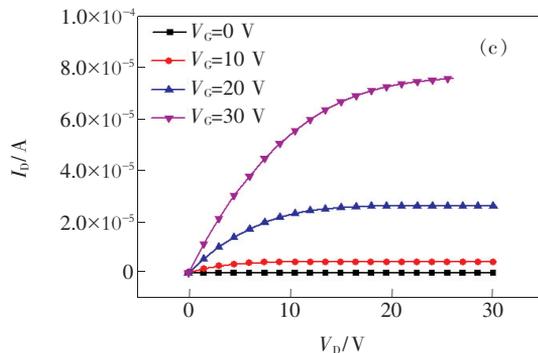
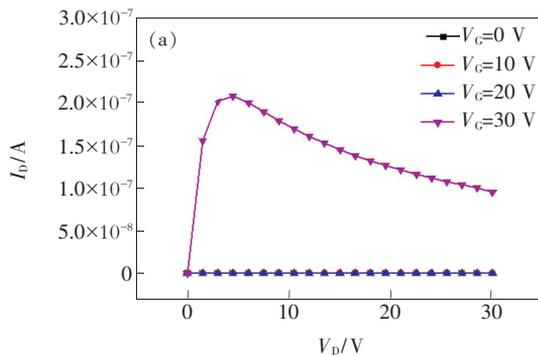


图 3 300 °C 退火的柔性 STO-TFT。(a) TFT 实物图;(b) 偏光显微镜拍摄沟道图。

Fig. 3 Flexible STO-TFT annealed at 300 °C. (a) TFT photo. (b) Polarizing microscope image of the channel.

粒,使组织重新结晶消除原有的缺陷,以达到更好的器件性能。当退火温度为 200,250,300 °C 时,分别如图 4(b)、(c)和(d)所示,随栅极电压 V_G 增大,漏电流 I_D 明显增大;当栅极电压一定时,漏电流 I_D 随源漏电压 V_D 增大先快速增大后基本维持不变。这表明一定温度退火后的柔性 STO-TFT 具有良好的 TFT 器件特性:漏电流 I_D 受栅极偏压 V_D 的控制,并且器件具有很好的夹断特性,当器件工作在饱和区时电流能够维持一固定数值。在不超出 STO-TFT 可承受温度条件下,随着退火温度的升高,器件的饱和输出电流逐渐增大。在栅极电压为 30 V 的条件下,300 °C 退火的柔性 STO-TFT 饱和输出电流超过 1.0×10^{-4} A,大于器件于

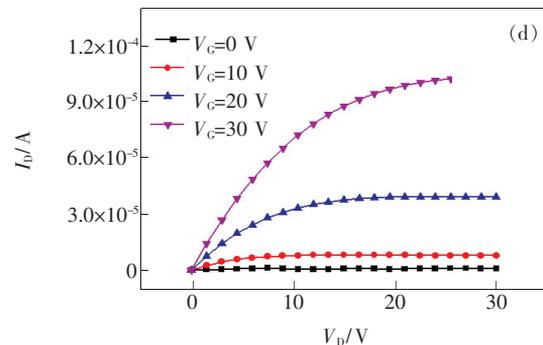
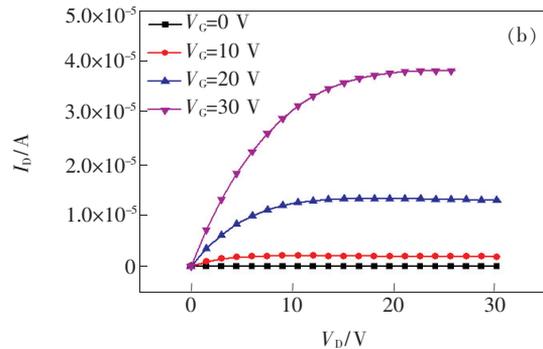


图 4 不同退火温度柔性 STO-TFT 输出特性曲线。(a) 室温不退火;(b) 200 °C 退火;(c) 250 °C 退火;(d) 300 °C 退火。
Fig. 4 Output characteristic curves of flexible STO-TFTs with different annealing temperatures. (a) Room temperature. (b) Annealing at 200 °C. (c) Annealing at 250 °C. (d) Annealing at 300 °C.

250 °C 退火获得的 7.6×10^{-5} A 和 200 °C 退火获得的 3.8×10^{-5} A 饱和输出电流。

3 种不同退火温度的柔性 STO-TFT 的转移特性曲线如图 5 所示。由图 5 可得, 器件在负栅压小于开启电压前, I_D 数值很小, 约为 10^{-11} A 数量级, 器件处于关闭状态。当栅极偏压达到开启电压后, I_D 数值大小呈指数上升, 器件迅速从关闭状态转换成开启状态。根据图 5 并结合饱和区电流、电压相关公式及亚阈值摆幅公式:

$$I_{DS} = \mu_{EF} C_{OX} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2, \quad (1)$$

$$S = \frac{dV_G}{d(\lg I_D)}, \quad (2)$$

公式中单位面积的栅电容 $C_{OX} = 38 \times 10^{-9}$ F · cm⁻², 通过读取数值和计算可得如表 1 中所示电学性能参数。柔性 STO-TFT 器件在栅极偏压为

30 V 的条件下, 由 $(I_{DS})^{1/2}$ - V_{GS} 曲线外推直线^[17]可以得到在 200, 250, 300 °C 退火的器件阈值电压分别为 7.05, 4.42, 2.42 V, 阈值电压随退火温度升高逐渐减小, 可能是由于高温退火使得金属氧化物有源层薄膜解吸附附沟道上吸附的氧从而提高了载流子的浓度^[18], 导致阈值电压减小, 有利于器件的开启。载流子迁移率随 3 种退火温度升高逐渐增大, 分别为 1.42, 2.32, 2.81 cm² · V⁻¹ · s⁻¹。同时亚阈值摆幅随退火温度升高而升高, 300 °C 退火柔性 STO-TFT 的亚阈值摆幅为 1.95 V · dec⁻¹。主要原因可能是在器件退火过程中, 由于氧等对绝缘层的作用增加, 破坏了有源层和绝缘层的界面特性, 使有源层与绝缘层间界面缺陷态增加从而导致亚阈值摆幅上升^[19]。3 种退火温度的柔性 STO-TFT 开关比均在 5×10^6 附近, 获得了良好的器件性能。

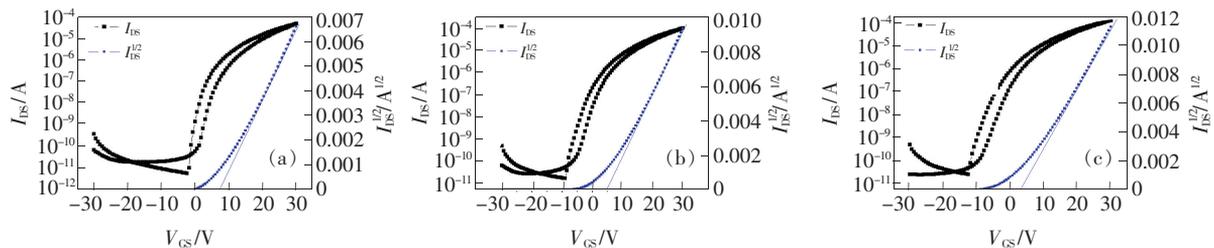


图 5 不同退火温度柔性 STO-TFT 转移特性曲线及 $I_{DS}^{1/2}$ - V_{GS} 曲线。(a) 200 °C; (b) 250 °C; (c) 300 °C。

Fig. 5 Flexible STO-TFT transfer characteristic curves and $I_{DS}^{1/2}$ - V_{GS} curves at different annealing temperatures. (a) 200 °C. (b) 250 °C. (c) 300 °C.

表 1 不同退火温度柔性 STO-TFT 性能参数

Tab. 1 Performance parameters of different annealing temperature flexible STO-TFT

Annealing temperature/°C	Saturated carrier mobility/ (cm ² · V ⁻¹ · s ⁻¹)	V_{th}/V	I_{on}/I_{off}	$S/(V \cdot \text{dec}^{-1})$
200	1.42	7.05	6.65×10^6	1.05
250	2.32	4.42	4.56×10^6	1.71
300	2.81	2.42	5.07×10^6	1.95

分析表明柔性 STO-TFT 在 300 °C 退火可以获得最优的器件性能, 阈值电压 V_{th} 为 2.42 V, 器件载流子迁移率为 2.81 cm² · V⁻¹ · s⁻¹, 饱和开态电流超过 1×10^{-4} A, 开关比达 5.07×10^6 , 亚阈值摆幅为 1.95 V · dec⁻¹。

3.2 弯曲状态下柔性 STO-TFT 的电学性能

将制备的 300 °C 退火柔性 STO-TFT 分别置于曲率半径为 5, 10, 20, 30 mm 的条件下工作并测试其电学性能, 其中该柔性 STO-TFT 在曲率为 10 mm 弯曲状态下测试的实物图如图 6 所示, 所

测转移特性曲线如图 7 所示。由实验结果可知, 该柔性 STO-TFT 弯曲在曲率半径为 5, 10, 20, 30 mm 的条件下进行电学性能测试, 其转移特性曲线与未弯曲的相比变化差别不大。通过计算相关电学参数如表 2 所示, 可得在不同曲率半径弯曲下工作器件载流子迁移率维持在 2.6 ~ 2.9 cm² · V⁻¹ · s⁻¹ 之间, 亚阈值摆幅也在 1.6 ~ 2.0 V · dec⁻¹ 之间浮动, 开态电流大小变化不大并都能够超过 10^{-4} A 数量级, 该柔性 STO-TFT 器件弯曲后, 关态漏电流和阈值电压与未弯曲相比有明显

增加。根据漏态电流 I_{off} 的公式^[20]：

$$I_{\text{off}} = \frac{\sigma W t}{L} V_{\text{DS}}, \quad (3)$$

其中 σ 为电导率, t 为沟道层厚度, W 和 L 分别为有源层宽度和长度。在器件弯曲时有源层厚度 t 及宽度 W 基本不变的情况下, 有源层在弯曲时外

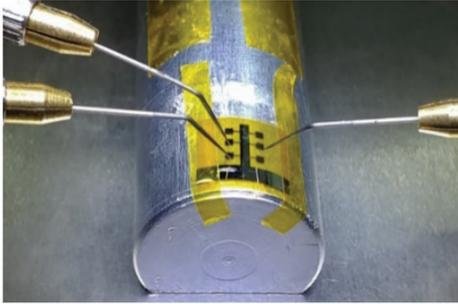


图 6 在曲率半径为 10 mm 弯曲下测试的柔性 STO-TFT
Fig. 6 Flexible STO-TFT tested at a radius of curvature of 10 mm

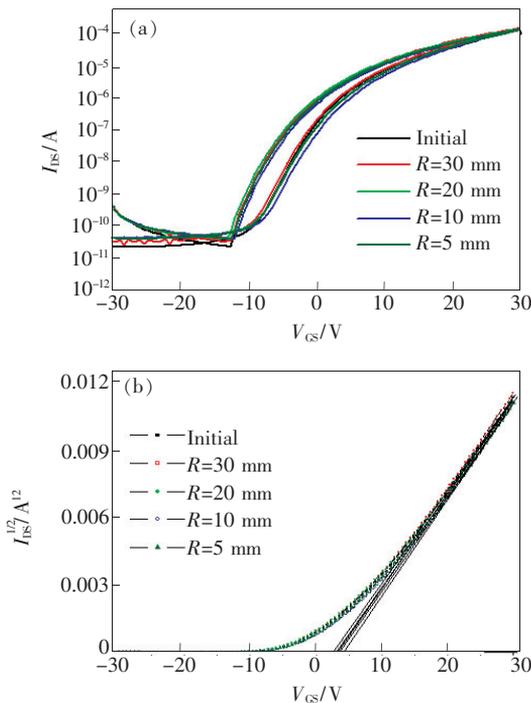


图 7 在不同曲率半径下工作的柔性 STO-TFT 性能参数。
(a) 转移特性曲线; (b) $(I_{\text{DS}})^{1/2}-V_{\text{GS}}$ 。

Fig. 7 Flexible STO-TFT performance parameters operating at different radius of curvature. (a) Transfer characteristic curve. (b) $(I_{\text{DS}})^{1/2}-V_{\text{GS}}$.

参 考 文 献:

- [1] 兰中旭, 韦嘉, 俞燕蕾. 柔性显示基板材料研究进展 [J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2017(1):9-16.
LAN Z X, WEI J, YU Y L. Research progress of flexible display substrate materials [J]. *J. South China Normal Univ. (Nat. Sci. Ed.)*, 2017(1):9-16. (in Chinese)

表 2 柔性 STO-TFT 性能参数随弯曲程度变化

Tab. 2 Performance parameters of flexible STO-TFT vary with the degree of bending

Bending radius/mm	Saturated			
	carrier mobility / $(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	V_{th}/V	$I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$	$S/(\text{V} \cdot \text{dec}^{-1})$
Initial	2.81	2.42	5.07×10^6	1.95
30	2.93	2.58	3.50×10^6	1.65
20	2.68	2.75	2.98×10^6	1.93
10	2.85	3.48	2.65×10^6	1.68
5	2.77	3.49	2.89×10^6	1.96

侧被拉长, 内测收缩有源层沟道距离缩短, 推测器件载流子在一定程度上更倾向于沿短距离处传输并且电导率发生了相应的变化, I_{off} 相应增大; 器件在弯曲半径大于 20 mm 时测量其阈值电压和未弯曲时差别不大, 但当器件弯曲半径为 10 mm 时器件阈值电压突然升高较大幅度, 推测其原因, 可能是由于器件在弯曲时受拉应力的作用, 当其达到某个值时将会一定程度上破坏器件结构, 进而增加了薄膜内部的缺陷态使阈值电压升高。虽然器件 I_{off} 在弯曲时增加, 但器件开关比仍能够维持在高于 10^6 数量级, 可以获得较好的柔性器件性能。

4 结 论

本文通过在柔性 PI 衬底上制备的一种 STO-TFT 器件, 并比较器件在 200, 250, 300, 350 °C 退火及室温不退火处理的性能, 发现其可以调控掺硅氧化锡半导体的载流子输运。研究表明该器件 350 °C 下性能有所下降, 300 °C 退火能够获得最佳器件性能, 其基本电学性能参数如下: 阈值电压 V_{th} 为 2.42 V、器件载流子迁移率为 $2.81 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 、饱和开态电流超过 $1.0 \times 10^{-4} \text{ A}$ 、开关比达 5.07×10^6 , 亚阈值摆幅为 $1.95 \text{ V} \cdot \text{dec}^{-1}$ 。同时该柔性 STO-TFT 在曲率半径分别为 5, 10, 20, 30 mm 的情况下工作, 其电学特性虽有一定的变化, 但仍然保持较高的器件性能, 显示出在柔性电子器件中的巨大应用潜力。

- [2] NATHAN A, CHALAMALA B R. Flexible electronics technology, part II : materials and devices [J]. *IEEE Xplore*, 2005, 93(8):1391-1393.
- [3] CHIANG C S, KANICKI J, TAKECHI K. Electrical instability of hydrogenated amorphous silicon thin-film transistors for active-matrix liquid crystal displays [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1998, 37(9A):4704-4710.
- [4] NA J H, KITAMURA M, LEE D, *et al.*. High performance flexible pentacene thin-film transistors fabricated on titanium silicon oxide gate dielectrics [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 90(16):1741.
- [5] HOFFMAN R L, NORRIS B J, WAGER J F. ZnO-based transparent thin-film transistors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 82(5):733-735.
- [6] NOMURAK, OHTA H, TAKAGI A, *et al.*. Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors [J]. *Nature*, 2004, 432(7016):488-492.
- [7] WANG L, RUAN C, XU H, *et al.*. Flexible AMOLED based on oxide TFT with high mobility [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2017, 48(1):342-344.
- [8] 兰林锋, 张鹏, 彭俊彪. 氧化物薄膜晶体管研究进展 [J]. *物理学报*, 2016, 65(12):5-26.
LAN L F, ZHANG P, PENG J B. Research progress of oxide thin film transistors [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2016, 65(12):5-26. (in Chinese)
- [9] KAMIYA T, NOMURA K, HOSONO H. Present status of amorphous In-Ga-Zn-O thin-film transistors [J]. *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 2011, 11(4):044305.
- [10] LI Y, PEI Y L, HU R Q, *et al.*. Effect of channel thickness on the electrical performance of amorphous IGZO Thin-film transistor with atomic layer deposition alumina oxide dielectric [J]. *Curr. Appl. Phys.*, 2014, 14:941-945.
- [11] CHOI K H, KIM H K. Correlation between Ti Source /drain contact and performance of InGaZnO-based thin film transistors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 102:052103.
- [12] BARQUINHA P, PEREIRA L, GONCALVES G, *et al.*. The effect of deposition conditions and annealing on the performance of high-mobility IGZO TFTs [J]. *Electrochem. Solid-State Lett.*, 2008, 11:248-251.
- [13] MATSUO T, MORI S, BAN A, *et al.*. Advantages of IGZO oxide semiconductor [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2014, 45(1):83-86.
- [14] PARTHIBAN S, KWON J Y. Role of dopants as a carrier suppressor and strong oxygen binder in amorphous indium-oxide-based field effect transistor [J]. *J. Mater. Res.*, 2014, 29(15):1585-1596.
- [15] ZHANG Y. Electronegativities of elements in valence states and their applications. 1. Electronegativities of elements in valence states [J]. *Inorg. Chem.*, 1982, 21(11):3886-3889.
- [16] LIU X, NING H, CHEN J, *et al.*. High-performance back-channel-etched thin-film transistors with amorphous Si-incorporated SnO₂ active layer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2016, 108(11):1245-1246.
- [17] 李帅帅, 梁朝旭, 王雪霞, 等. 高迁移率非晶铟镓锌氧化物薄膜晶体管的制备与特性研究 [J]. *物理学报*, 2013, 62(7):413-417.
LI S S, LIANG C X, WANG X X, *et al.*. Preparation and characterization of high mobility amorphous indium zinc oxide thin film transistor [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2013, 62(7):413-417. (in Chinese)
- [18] OH S I, CHOI G, HWANG H, *et al.*. Hydrogenated IGZO thin-film transistors using high-pressure hydrogen annealing [J]. *IEEE Trans. Electron Dev.*, 2013, 60(8):2537-2541.
- [19] CHOI H S, JEON S, KIM H, *et al.*. Influence of Hf contents on interface state properties in a-HfInZnO thin-film transistors with SiN_x/SiO_x gate dielectrics [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 99(18):1117-1119.
- [20] CHUNG J H, LEE J Y, KIM H S, *et al.*. Effect of thickness of ZnO active layer on ZnO-TFT's characteristics [J]. *Thin Solid Films*, 2007, 516(16):5597-5601.



张建东(1995 -),男,广东阳江人,硕士研究生,2017年于华南理工大学获得学士学位,主要从事光电材料与器件的研究。

E-mail: fdbyba@126.com



姚日晖(1981 -),男,湖南涟源人,博士,副教授,2008年于中山大学获博士学位,主要从事光电材料与器件的研究。

E-mail: yaorihui@scut.edu.cn