

SnO/AlN压电门控二维复合薄膜场效应晶体管的制备及电学特性

张哲, 李梦轲*, 韩月, 姜珊, 刘俊, 柳婕, 刘阳, 李旺

辽宁师范大学物理与电子技术学院, 辽宁 大连
Email: *limk@dlut.edu.cn

收稿日期: 2020年12月19日; 录用日期: 2021年1月19日; 发布日期: 2021年1月27日

摘要

采用磁控溅射掩膜沉积技术, 在n型Si衬底上制备了底栅型SnO/AlN压电门控二维复合薄膜场效应晶体管, 利用XRD、SEM和EDX分析设备, 对复合薄膜的晶体结构、形貌和成分进行了分析研究。实验发现, 溅射沉积工艺可制备出表面光滑, 质量较好的SnO和AlN单晶薄膜。利用AlN薄膜的压电特性, 可将施加在AlN薄膜上的外应力转化为门控电压, 并作用在SnO/AlN复合膜的SnO沟道上, 使器件 I_{DS} 电流随外部应力变化而改变。测试发现, 器件对外应力表现出了较好的响应特性, 并具有较高的响应灵敏度, 灵敏度约为 $1.564 \times 10^3 \mu\text{A}/\text{N}\cdot\text{cm}^2$, 响应时间约为0.9 s。本文提出的新型底栅型SnO/AlN压电门控二维复合薄膜场效应晶体管, 有望应用在柔性电子器件和可穿戴电子产品等领域。

关键词

SnO, AlN, 压电特性, 场效应晶体管

Preparation and Electronic Properties of Piezopotential Gated Two-Dimensional SnO/AlN Composite Thin Film FETs

Zhe Zhang, Mengke Li*, Yue Han, Shan Jiang, Jun Liu, Jie Liu, Yang Liu, Wang Li

School of Physics and Electronic Technology, Liaoning Normal University, Dalian Liaoning
Email: *limk@dlut.edu.cn

Received: Dec. 19th, 2020; accepted: Jan. 19th, 2021; published: Jan. 27th, 2021

*通讯作者。

文章引用: 张哲, 李梦轲, 韩月, 姜珊, 刘俊, 柳婕, 刘阳, 李旺. SnO/AlN 压电门控二维复合薄膜场效应晶体管的制备及电学特性[J]. 材料科学, 2021, 11(1): 31-39. DOI: 10.12677/ms.2021.111005

Abstract

The bottom gate type and piezoelectric gated SnO/AlN two-dimensional composite thin film FETs were prepared on n-type Si substrates with masked magnetron sputtering deposition technology. And the crystalline structure, morphology and composition of the synthesized thin films were analyzed by XRD, SEM and EDX analysis equipment, respectively. It was found the synthesized SnO and AlN thin films with smooth surface and higher single crystal growth trend. By using the piezoelectric characteristics of the AlN thin film deposited on the SnO thin film, the external stress applied on the AlN thin film can be transformed into gated voltage and acted on the p-type SnO semiconductor channel of SnO/AlN composite thin film FETs. It can result in the I_{DS} current of the FET devices to change with the increases or decreases of the external stress. Our research found that the synthesized SnO/AlN composite thin film FETs had a better response characteristic and sensitivity, with a sensitivity of about $1.564 \times 10^3 \mu\text{A}/\text{N}\cdot\text{cm}^2$ and a response time of about 0.9 s. The new type of piezoelectric gated two-dimensional SnO/AlN composite thin film FETs proposed in this paper is expected to be applied in the fields of flexible electronic devices and wearable electronic products.

Keywords

SnO, AlN, Piezoelectric Properties, FETs

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在汽车制造、工业生产、航天制造和生物医疗工程等领域，压力传感器有广泛的需求与应用。根据压力传感机理，压力传感器可分为电流式、压阻式及电容式等类型[1] [2]。近年来，因压电材料其具有响应快、灵敏度高和能耗低等特点，因此，压电式压力传感器的应用与研究更获得了人们的普遍重视[3]。

氧化亚锡(SnO)是本征 p 型直接带隙金属氧化物半导体材料，禁带宽度为 2.7 eV (300 K)，具有独特的光学和电学性质，其具有的层状结构使其近年来在微纳二维光电子器件和 p 沟道薄膜场效应晶体管(TFTs)的制备及应用中受到了人们的极大关注。近来，研究者还发现，通过不同元素的掺杂，SnO 半导体易于实现材料的双极导电特性，比起 ZnO 等半导体 p 型导电特性不易实现的问题，SnO 半导体的双极导电特性在互补型金属氧化物半导体器件(CMOS)的制造与应用中具有更大的实用价值[4] [5] [6]。AlN 禁带宽度(6.2 eV, 300 K)较宽，绝缘性好，化学及热稳定性，沿着 C 轴生长的 AlN 还具有良好的压电特性，制备工艺与现有 IC 工艺兼容性好，作为器件的压电层在压电传感器制造中使用效果最佳[7] [8]，而其它的压电材料如 PZT 和 ZnO 在 CMOS 处理过程中存在污染风险。

利用 SnO 二维薄膜的层状结构，通过相邻的 Sn-O-Sn 层间微弱的范德瓦尔斯作用[9]，在 SnO 二维半导体薄膜沟道上溅射沉积生长一层 AlN 压电薄膜，就可形成压电薄膜与半导体沟道的 SnO/AlN 薄膜复合结构，构建出可由压电调控的新型 SnO/AlN 压电门控二维复合薄膜场效应晶体管，如图 1 所示。

本文采用磁控溅射技术，以 n 型 Si 为衬底，利用掩膜沉积技术，在 SiO₂ 绝缘层上制备了新型 SnO/AlN 压电门控二维复合薄膜场效应晶体管。对不同溅射时间的 SnO 和 AlN 薄膜的物相、元素组成以及截面形

貌进行了表征。在不同条件下制备器件对压力的响应特性进行了对比研究, 研究结果对新型压电场效应晶体管的制备以及应用开发都有一定的参考价值。

2. SnO/AlN 薄膜场效应晶体管的制备与分析

Table 1. The parameters of SnO and AlN thin film samples under different preparation conditions

表 1. 不同制备条件下 SnO 薄膜和 AlN 薄膜样品参数

样品名称	溅射功率 (W)	溅射时间(min)		
SnO	120	15	30	45
AlN	150	30	60	90

利用双靶磁控溅射镀膜设备, 以为衬底, 用 200 nm 厚度的热氧化生长的 SiO_2 作绝缘介质, 在其上制备了 SnO/AlN 压电门控薄膜场效应晶体管, 其结构示意图如图 1(a)、图 1(b)所示, 器件制备工艺参数如表 1 所示。具体实验步骤为: 首先, 将 1.5×2 cm 尺寸的 n 型(111) Si 片(天津半导体研究所), 依次在丙酮、乙醇、去离子水溶液中超声清洗 15 min, 用高纯 N_2 吹干后, 置于水平炉式管中, 在 1000°C 温度下, 热氧化 1 h。随后, 将热氧化后的 Si 片固定在磁控溅射的基板上, 以 SnO 粉末陶瓷烧结靶(纯度 99.999%, 深圳市友容新材料科技有限公司)为靶材, 利用掩膜技术, 在 SiO_2 绝缘层上溅射沉积一层 SnO 薄膜沟道。再利用二次掩膜技术, 在 SnO 薄膜沟道上利用 AlN 靶材(纯度 99.999%, 深圳市友容新材料科技有限公司), 二次溅射沉积薄膜。最后, 在 Ar 气环境中, 将器件经 200°C 退火 1 h。以金属铂(Pt)为源漏电极, 金属银(Ag)为底栅电极, 测试时的连接电路如图 1(b)所示。

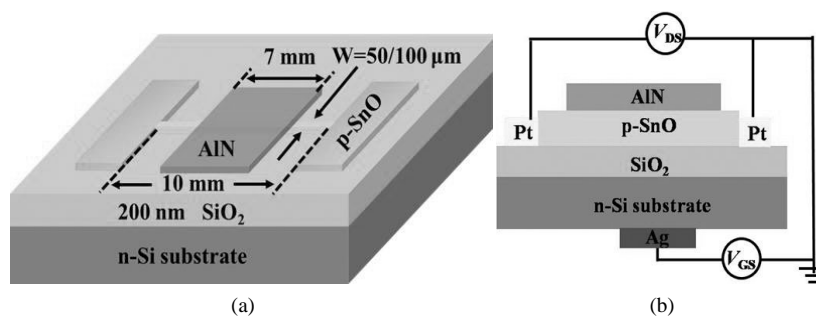


Figure 1. (a) Schematic diagram of the SnO/AlN thin-film field effect transistor; (b) Schematic diagram of the circuit connection of the device

图 1. (a) SnO/AlN 薄膜场效应晶体管的结构示意图; (b) 器件电路连接示意图

用 X 射线衍射分析仪(Empyrean, 荷兰帕纳科)分析了 SnO 和 AlN 薄膜的晶体结构; 用扫描电子显微镜及其上的 EDS 分析仪(SU8010, 日本电子)对薄膜表面形貌及物质组成进行了分析表征; 用半导体特性测试仪(Keithley4200-SCS, 美国)和自己组装的压力加载装置对器件的电学及压力敏感特性及灵敏度进行了实验研究。

3. 结果和讨论

3.1. 制备的 SnO 和 AlN 薄膜的晶相研究

图 2 为溅射沉积并经 200°C 退火处理后的 SnO 及 AlN 薄膜的 XRD 衍射图。分析发现, 制备的 SnO 和 AlN 薄膜均呈现了较好的单晶生长趋势。图 2(a)为 3 组不同沉积时间的 SnO 薄膜的 XRD 的对比图。不同沉积时间条件下, 制备的 SnO 半导体薄膜均沿(110)晶面择优生长, 其主要衍射峰的位置分别在 20

= 29.8°、33.4°、47.8°、51.6°、57.4°处。经与标准图谱 PDF85-0423 对比, 其分别对应 SnO 的(101)、(110)、(200)、(201)、(211)晶面。随着沉积时间从 30 min 增大到 45 min, SnO(110)特征晶面衍射峰的强度有所下降。由此可得, 制备 SnO 薄膜时, 沉积时间不宜过长。图 2(b)为 SnO (110)晶面的对比图谱, 可看出, 随着沉积时间的增加, 其半高宽(FWHM)呈现了先增大后减小的趋势。我们分析认为, 开始生长过程中, SnO 晶粒的成核中心尺寸较小, 生长核比较均一, 生长核内部原子与边缘原子的晶格畸变差异较小, 谱峰的半高宽也较小。随着沉积时间的增长, 成核中心将持续长大, 晶粒尺寸差异增大, 晶粒边缘晶界附近原子与内部原子相比, 晶格常数出现了较大畸变, 导致谱峰出现展宽现象。当晶粒进一步长大并连续成膜后, 晶粒边缘晶界占比反而出现下降趋势, 其谱峰半高宽(FWHM)就出现减小趋势。AlN 薄膜生长中其半高宽(FWHM)也具有相似特性。

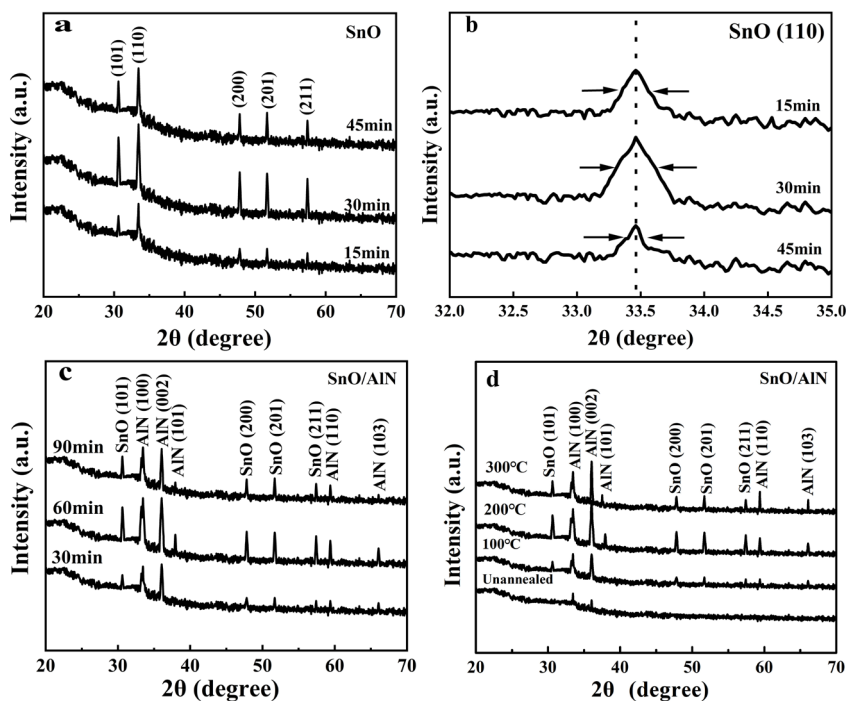


Figure 2. (a) XRD patterns of SnO thin film; (b) XRD patterns of SnO(110) crystal plane; (c) XRD patterns of SnO/AlN; (d) XRD patterns of SnO/AlN(002) crystal plane
图 2. (a) SnO 的 XRD 图谱; (b) SnO(110)晶面的 XRD 图谱; (c) SnO/AlN 的 XRD 图谱; (d) SnO/AlN(002)晶面的 XRD 图谱

图 2(c)为表 1 中制备的不同 SnO/AlN 复合薄膜的 XRD 对比图谱, 可发现, 除了 SnO 的特征峰外, 还在 $2\theta = 33.2^\circ$ 、 36.0° 、 37.9° 、 59.3° 、 66.0° 处出现了新的衍射峰, 经与标准图谱 PDF76-0702 对比, 其分别对应 AlN 的(100)、(002)、(101)、(110)、(103)晶面。对比发现, 随着复合薄膜沉积时间的增加, AlN 膜层的厚度也随之增加, 但 AlN 晶面的衍射峰却由强到弱, 说明制备单晶 AlN 薄膜时, 沉积时间也不宜过长, 否则会影响 AlN 的结晶度。从图 2(c)可知, 沉积时间为 60 min 时, 制备的 AlN 薄膜沿(002)方向的特征衍射峰强度最大, 也就是 C 轴择优生长趋势最好。研究也发现, 200°C、1 h 的退火处理可明显改善 SnO/AlN 复合薄膜的结晶度。图 2(d)给出了不同退火温度处理后的 SnO/AlN 复合薄膜的 XRD 对比图谱[10]。

3.2. 薄膜成分的 EDS 能谱分析

为了研究制备的不同样品的成分及元素组成, 我们还进行了 EDS 实验分析。图 3(a)和图 3(b)分别为

制备的 SnO 及 SnO/AlN 薄膜的 EDS 能谱图, 从图 3(a)中可看到, 谱峰中出现了明显的 Sn 峰和 O 峰, 没有其他的杂质。经对不同时间沉积样品的 EDS 能谱图对比, 发现 Sn:O 的原子比都近似为 1:1, 说明, 采用磁控溅射法制备的样品确实为 SnO 薄膜。图 3(b)为 SnO/AlN 薄膜的 EDS 能谱图, 可看到明显的 Sn、O、Al、N 元素的谱峰, 通过对不同条件下制备的 SnO/AlN 薄膜的 EDS 能谱图进行对比, 发现 4 种元素比例基本一致, 说明制备的复合薄膜确实为 SnO/AlN 复合薄膜。

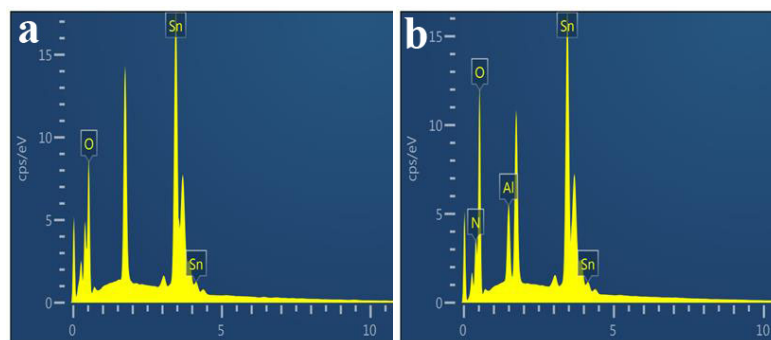


Figure 3. (a) EDS spectra of SnO thin film; (b) EDS spectra of SnO/AlN composite thin film

图 3. (a) SnO 薄膜的 EDS 能谱图; (b) SnO/AlN 复合薄膜的 EDS 能谱图

3.3. 样品的形貌分析

图 4 给出了沉积 SnO 薄膜时间为 15 min, 沉积 AlN 薄膜时间为 60 min 条件下制备的 SnO/AlN 复合薄膜的表面和截面 SEM 照片。图 4(a)为经 200℃、1 h 的退火处理后的 AlN 表面的 SEM 图片, 内插图为 SnO 薄膜的 SEM 图片。可看出, 退火处理使生长的 AlN 晶粒呈现了团聚长大趋势, 放大 20 万倍后, 大量六方纤锌矿结构的 AlN 单晶颗粒附着在 SnO 薄膜表面, 说明退火处理可使 AlN 晶粒团聚长大。图 4(a)的内插图说明溅射制备的 SnO 薄膜表面均匀致密, 光滑平整, 缺陷很少, 适合用于制备场效应器件的半导体沟道。图 4(b)为制备的 SnO/AlN 复合薄膜截面的 SEM 照片。图中三个箭头分别指向了 Si 衬底上的 AlN、SnO 和 SiO₂ 膜层。由截面 SEM 照片和对应比例尺进行膜厚测算, 可得此实验条件下制备的 SnO 薄膜的厚度约为 16 nm。根据 SnO 晶体层间四个 O 原子和一个 Sn 原子构成金字塔结构的厚度约为 2 nm 估算, SnO 薄膜约由 8 个金字塔结构组成, 属于少层 2 维 SnO 半导体单晶膜。同样可得此条件下制备的 AlN 膜层的厚度大约为 46 nm [11] [12]。

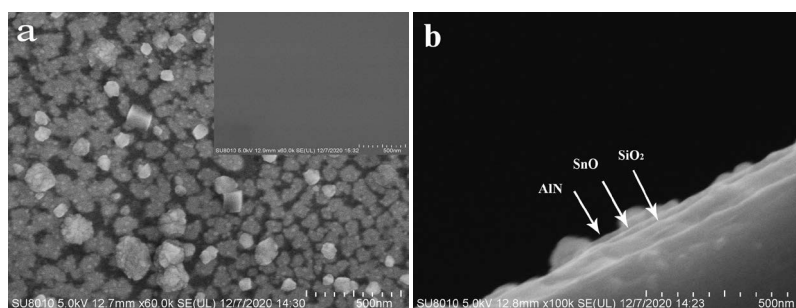


Figure 4. (a) surface SEM image of AlN thin films (Inset is a SEM image of the unannealed SnO surface); (b) A cross-sectional SEM image of SnO/AlN composite thin film

图 4. (a) AlN 表面的 SEM 图像(内插图为未退火的 SnO 表面的 SEM 图像); (b) SnO/AlN 复合薄膜的截面 SEM 图像

3.4. SnO/AIN 压电门控场效应晶体管的电学特性

图 5 为制备的不同的纯 SnO 场效应晶体管的 IV 特性曲线。其中, 图 5(a)为沉积时间 15 min 条件下制备的沟道长度为 25 μm , 沟道宽度分别为 50、100 μm 的 SnO 场效应晶体管的 IV 特性曲线。测试时, 栅源电压 $V_{\text{GS}} = -3 \text{ V}$ 。可看出, 相同 V_{GS} 绝对值变化下, 随沟道宽度的增大, 源漏电流 I_{DS} 的绝对值变化有所减小。当 V_{DS} 为 10 V 时, 器件 I_{DS} 的绝对变化值在 28~39 μA 范围。其中, 沟道宽度为 50 μm 的器件, I_{DS} 电流最大, 约为 39 μA 。我们认为, 随着沟道宽度的减小, 其粗糙度和生长缺陷也相对减小, 沟道的电阻也较小, 场效应就越明显。图 5(b)为沉积时间分别为 15、30 及 45 min 条件下制备的纯 SnO 半导体场效应晶体管的 IV 特性曲线。比较可看出, 当沟道宽度、外加栅压等条件相同时, 随着沟道膜层厚度的增加, 器件 I_{DS} 电流的绝对变化量逐渐减小。这是因为随着沟道薄膜厚度的增加, SnO 沟道中的生长缺陷增多, 电阻增大; 同时, 沟道薄膜厚度的增加也会降低固定栅压下的场效应特性。

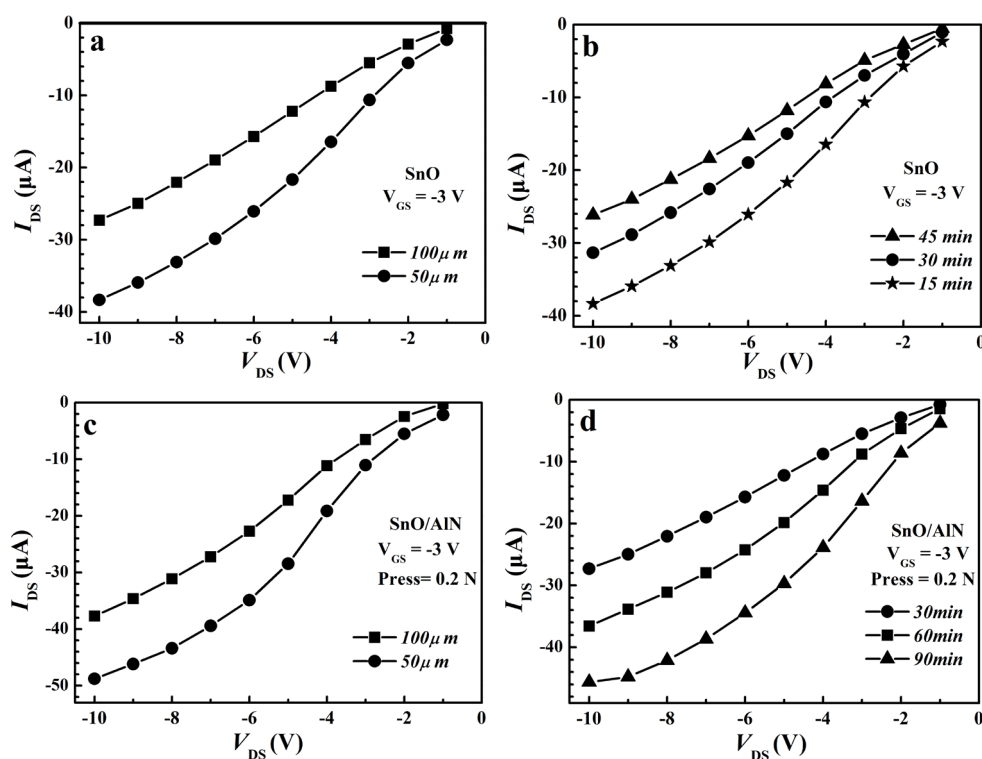


Figure 5. 场效应晶体管的 IV 特性曲线; (a) SnO FETs with channel width of 50 and 100 μm , respectively; (b) SnO FETs with channel width of 50 μm and deposition time of 15, 30 and 45 min, respectively; (c) SnO/AIN gated piezoelectric composite film FET with different channel widths; (d) SnO/AIN gated piezoelectric composite film FET with different deposition times

图 5. (a) 沟道宽度分别为 50、100 μm 的 SnO 场效应晶体管对比; (b) 沟道宽度为 50 μm , 沉积时间分别为 15、30 及 45 min 的纯 SnO 场效应晶体管对比; (c) 不同沟道宽度 SnO/AIN 门控压电复合膜场效应晶体管对比; (d) 不同沉积时间 SnO/AIN 门控压电复合膜场效应晶体管对比

图 5(c)为在 15 min 条件下制备出的沟道长度为 25 μm , 沟道宽度分别为 50, 100 μm 的 SnO 场效应晶体管的沟道上经 60 min 沉积生长一层 46 nm 厚度的 AlN 膜层后, 制备的不同门控压电复合膜场效应晶体管的 IV 特性曲线。当给两个不同器件同时施加 -3 V 栅压和 0.2 N 的应力时, 与图 5(a)中不施加应力、只施加 -3 V 栅压的纯 SnO 场效应晶体管 IV 特性曲线对比发现, 门控压电复合膜场效应晶体管的 I_{DS} 绝对值变化明显增加。分析认为, 当 AlN 薄膜受到机械应力作用时, 其晶胞质心将发生相对位移, 出现压电势,

叠加在外部施加的-3 V 的栅压上, 改变了器件源漏之间的电流传输特性。

图 5(d)为器件的 SnO 薄膜沉积时间为 15 min, 在其上沉积 30、60 和 90 min 厚度的 AlN 后, 制备的 SnO/AlN 门控压电复合场效应晶体管的 I_{DS} 特性曲线比较。可看出, 在 AlN 薄膜上施加同样的 0.2 N 大小的应力后, 与图 5(b)的纯 SnO 场效应晶体管相比, SnO/AlN 门控压电复合场效应晶体管的 I_{DS} 的绝对值随 AlN 压电薄膜厚度的增加而增加。这说明利用 AlN 压电薄膜作为 SnO 半导体沟道的门控因素, 感知外部压力, 制备 SnO/AlN 门控压电复合场效应晶体管是完全可行的。

图 6 为制备的典型的 SnO/AlN 压电门控场效应晶体管的输出特性曲线。图 6(a)为 SnO 薄膜沉积时间 15 min, AlN 薄膜沉积时间 60 min 条件下制备的 SnO/AlN 压电门控场效应晶体管的输出特性曲线。测试发现, 在 $V_{GS} = 0$ V 的条件下, 对不同大小的应力, 器件的输出特性变化明显。随着外部应力的增大, 器件的 I_{DS} 也随之增大。图 6(b)给出了 SnO/AlN 压电薄膜场效应晶体管的转移特性曲线。当 V_{DS} 从 1 V 变化到 5 V, 增量为 1 V, V_{GS} 从 -4 V 扫描到 8 V 时, 器件的转移特性曲线出现了一个陡峭的下坡。这说明, 该器件在不同的栅压下具有良好的电压调控电流特性。

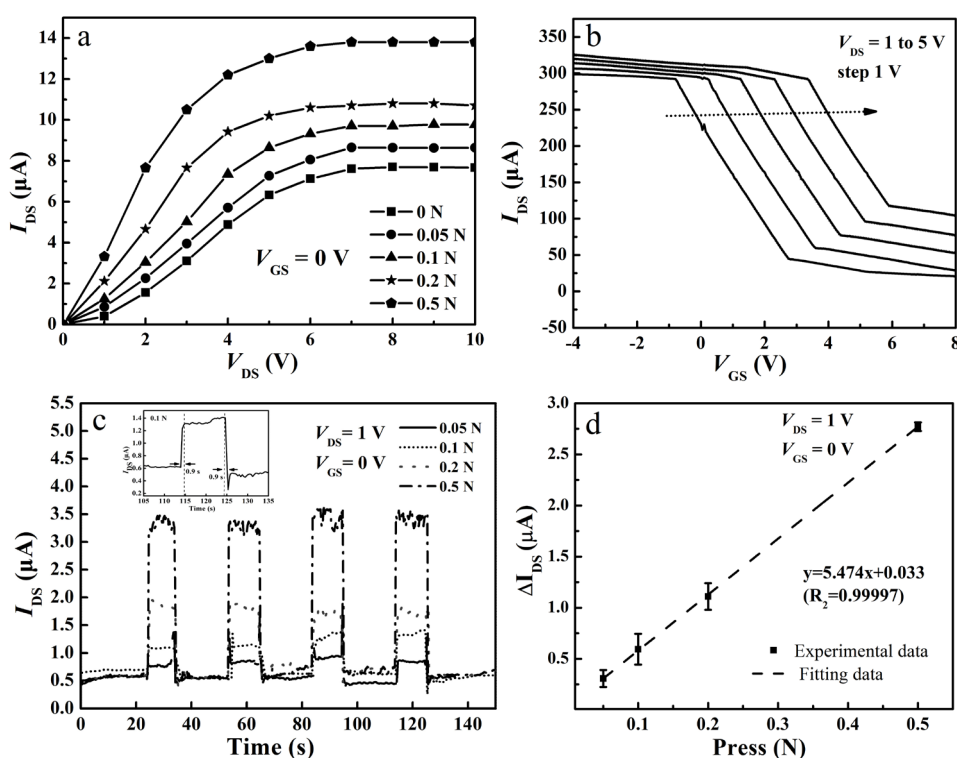


Figure 6. (a) the IV characteristic curve of SnO/AlN piezoelectric FETs; (b) the transfer characteristic curve of the SnO/AlN piezoelectric FETs; (c) The response time of the SnO/AlN piezoelectric FETs under different stress conditions, the inset is a response time variation curve; (d) the I_{DS} current versus different stress

图 6. (a) SnO/AlN 压电薄膜场效应晶体管的输出特性曲线, (b) SnO/AlN 压电薄膜场效应晶体管转移特性曲线; (c) SnO/AlN 压电薄膜场效应晶体管在不应力下的响应时间曲线, 内插图为响应时间变化曲线; (d) I_{DS} 电流与外部应力的线性拟合曲线

为了证明器件具有良好的门控压力传感特性, 我们在 $V_{GS} = 0$ V, $V_{DS} = 1$ V 的情况下, 测试了器件在不同应力条件下的 I_{DS} 响应, 如图 6(c)所示。实验中, 采用不同的外部应力作用在 SnO/AlN 复合压电薄膜上, 结果表明, 随着外部压力的增加, 因 AlN 压电薄膜产生了压电极化效应, 施加在器件的栅电极上,

器件的 I_{DS} 输出电流信号对外部应力间出现了明显的响应关系。经多次重复测试,发现每一个应力都会产生迅速的 I_{DS} 响应,证明我们制备的 SnO/AlN 门控压电复合场效应晶体管完全可用在压力传感器上。图 6(c)内插图给出了器件对 0.1 N 外部应力的响应时间,测试发现器件从开始到最大 I_{DS} 输出的响应速度约为 0.9 s。由图 6(c)数据,经 4 次平均计算,得出器件 I_{DS} 的变化量(ΔI_{DS})和应力的线性拟合曲线,如图 6(d)所示。表明当 $V_{DS} = 1$ V, $V_{GS} = 0$ V 时,应力与 ΔI_{DS} 呈较好的线性关系,将图 6(d)虚线的斜率除以沟道面积,就可得器件的灵敏度,约为 $1.564 \times 10^3 \mu\text{A}/\text{N}\cdot\text{cm}^2$ 。这些说明我们制备的器件符合压力传感器的基本参数要求[5] [6]。

4. 结论

本文根据压电效应制备了一种 SnO/AlN 门控压电复合膜场效应晶体管。通过在压电 AlN 薄膜上施加不同的应力,研究了不同应力下这种新型门控压电复合膜场效应晶体管的电子学特性。测试发现,这种 SnO/AlN 门控压电复合膜场效应晶体管的电学性能稳定,对外部应力具有较高灵敏度和响应速度,其灵敏度约为 $1.564 \times 10^3 \mu\text{A}/\text{N}\cdot\text{cm}^2$, 响应速度小于 0.9 s。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(61076104, 11847303), 大连市科技创新基金重点资助项目(2019J12GX036)对本研究工作提供了资金支持。

参考文献

- [1] Caraveo-Frescas, J.A. and Alshareef, H.N. (2013) Transparent P-Type SnO Nanowires with Unprecedented Hole Mobility among Oxide Semiconductors. *Applied Physics Letters*, **103**, 222103-222108. <https://doi.org/10.1063/1.4833541>
- [2] Hien, V.X., Lee, J.H., Kim, J.J. and Heo, Y.W. (2014) Structure and NH_3 Sensing Properties of SnO Thin Film Deposited by RF Magnetron Sputtering. *Sensors and Actuators B*, **194**, 134-141. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.12.086>
- [3] Um, J., Roh, B.M., Kim, S.D. and Kim, S.E. (2013) Effect of Radio Frequency Power on the Properties of P-Type SnO Deposited via Sputtering. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **16**, 1679-1683. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2013.03.009>
- [4] Du, J., Xia, C.X., Liu, Y.M., Li, X.P., Peng, Y.T. and Wei, S.Y. (2017) Electronic Characteristics of P-Type Transparent SnO Monolayer with High Carrier Mobility. *Applied Surface Science*, **401**, 114-119. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.12.246>
- [5] Ren, L.H., Li, K.W., Shen, J., Sheng, C., Huang, Y.T. and Zhang, Q. (2019) Effects of Rare Earth Erbium Doping on the Electrical Performance of Tin Oxide Thin Film Transistors. *Journal of Alloys and Compounds*, **791**, 11-18. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.03.277>
- [6] Wang, F.L., Jiang, J.F., Liu, Q., Zhang, Y., Wang, J.J., Wang, S.H., Han, L., Liu, H. and Sang, Y.H. (2020) Piezopotential Gated Two-Dimensional In Se Field-Effect Transistor for Designing a Pressure Sensor Based on Piezotronic Effect. *Nano Energy*, **70**, 104457-104457. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104457>
- [7] He, X.M., Wen, Q., Zhuang, L., Shang, Z.G. and Wen, Z.Y. (2018) A Micro-Electromechanical Systems Based Vibration Energy Harvester with Aluminum Nitride Piezoelectric Thin Film Deposited by Pulsed Direct-Current Magnetron Sputtering. *Applied Energy*, **228**, 881-890. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.001>
- [8] Chen, C., Shang, Z.G., Gong, J., Zhang, F., Zhou, H., Tang, B., Xu, Y., Zhang, C., Yang, Y. and Mu, X.J. (2017) Electric Field Stiffening Effect in C-Oriented Aluminum Nitride Piezoelectric Thin Film. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **20**, 1-36.
- [9] Gibney, E. (2015) A Wave of Innovative Flat Materials Is Following in the Wake of Graphene But the Most Exciting Applications Could Come from Stacking Them into 3D Devices. *Nature*, **522**, 274-276. <https://doi.org/10.1038/522274a>
- [10] Ogo, Y., Hiramatsu, H., Nomura, K., Yanagi, H. and Kamiya, T. (2008) P-Channel Thin-Film Transistor Using P-Type Oxide Semiconductor, SnO. *Applied Physics Letters*, **93**, 032113-032116. <https://doi.org/10.1063/1.2964197>
- [11] Yabuta, H., Kaji, N., Hayashi, R., Kumomi, H., Nomura, K., Kamiya, T., Hirano, M. and Hosono, H. (2010) Sputtering

Formation of P-Type SnO Thin-Film Transistors on Glass toward Oxide Complimentary Circuits. *Applied Physics Letters*, **97**, 072111-07214. <https://doi.org/10.1063/1.3478213>

- [12] Sung, M., Shin, K. and Moon, W. (2015) A New Transduction Mechanism for Hydrophones Employing Piezoelectricity and a Field-Effect Transistor. *Sensors and Actuators A*, **233**, 557-568. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.07.008>