

文章编号: 1000-7032(2019)04-0497-07

## 喷墨打印金属氧化物异质结晶体管

杨文字<sup>1</sup>, 张国成<sup>1,2\*</sup>, 崔宇<sup>3</sup>, 陈惠鹏<sup>1\*</sup>

(1. 福州大学 平板显示技术国家地方联合工程实验室, 福建 福州 350118;

2. 福建工程学院 微电子技术研究中心, 福建 福州 350118; 3. 长春工程技术学院, 吉林 长春 130012)

**摘要:** 通过用喷墨打印制备的 ZnO/IGZO 异质结代替单层半导体沟道克服了氧化物缺陷导致的电子传输限制。ZnO/IGZO 异质结晶体管表现出带状电子传输, 迁移率比单层 IGZO 或 ZnO TFT 分别增大了约 9 倍和 19 倍, 达到  $6.42 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。开关比分别增大了 2 个和 4 个数量级, 达到  $1.8 \times 10^8$ 。性能的显著改善源自于 IGZO 和 ZnO 异质界面间由于导带的大偏移量而形成的二维电子气。

**关键词:** 金属氧化物半导体; 喷墨打印; 异质结; 二维电子气

中图分类号: TN321+.5 文献标识码: A DOI: 10.3788/fjxb20194004.0497

## Inkjet Printed Metal Oxide Heterojunction Thin-film Transistor

YANG Wen-yu<sup>1</sup>, ZHANG Guo-cheng<sup>1,2\*</sup>, CUI Yu<sup>3</sup>, CHEN Hui-peng<sup>1\*</sup>

(1. Institute of Optoelectronic Display, National & Local United Engineering Lab of Flat Panel Display Technology, Fuzhou University, Fuzhou 350118, China;

2. Research Center for Microelectronics Technology, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

3. Changchun Institute of Engineering and Technology, Changchun 130012, China)

\* Corresponding Authors, E-mail: zgc@fjut.edu.cn; hpchen@fzu.edu.cn

**Abstract:** In this work, the electron transport limitations caused by oxide defects was overcome by replacing single layer semiconductor channel with a ZnO/IGZO heterojunction prepared by inkjet printing. It was found that ZnO/IGZO transistor exhibited banded electron transport, and the mobility was increased by about 9 times and 19 times, respectively, to  $6.42 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$  compared with single layer IGZO or ZnO TFT. The switch ratio was increased by 2 and 4 orders of magnitude respectively, which can reach  $1.8 \times 10^8$ . Significant improvement in performance was associated with the two-dimensional electron gas formed between the IGZO and ZnO heterointerfaces due to the large offset of the conduction band.

**Key words:** metal oxide semiconductor; inkjet printing; heterojunction; two-dimensional electron gas

## 1 引 言

透明金属氧化物半导体材料具有多种特性, 包括可调节能带结构、高电荷载流子迁移率<sup>[1]</sup>、

机械柔韧性<sup>[2-3]</sup>、光学透明度<sup>[4]</sup>、耐久性以及优异的化学稳定性<sup>[5]</sup>。尤其是其可在低温下使用溶液法制备<sup>[6-7]</sup>, 工艺简单, 可代替基于真空工艺的制备方式, 受到了研究人员的广泛关注。另外, 因

收稿日期: 2018-12-27; 修订日期: 2019-02-10

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0401103); 福建省自然科学基金(2016J01749) 资助项目

Supported by National Key Research and Development Program of China(2016YFB0401103); Natural Science Foundation of Fujian Province(2016J01749)

为其成本低廉,在平板显示、可穿戴电子、集成传感器<sup>[8-9]</sup>等领域具有广阔的应用前景。

借助于金属氧化物半导体的这些独特优势,科研人员一直致力于提高金属氧化物薄膜晶体管性能的研究。不同金属氧化物有源层异质结结构是其中一种改善方式,在能级满足特定要求的两种氧化物异质界面处会形成二维电子气(2DEG)区域<sup>[10-12]</sup>。在电场的作用下,这种二维电子气对载流子的传输起着至关重要的作用,因电子密度主要局限于异质结界面,晶体管器件性能往往可以得到大幅提高。

异质结结构性能往往受有源层界面影响,为了得到致密的异质结结构,大多数研究采用真空工艺进行制备。但是,真空设备成本高昂,而且需要定制掩模板进行有源层图案化处理。溶液法旋涂工艺通常也需要用到复杂昂贵的光刻过程。但是喷墨打印技术可以直接实现薄膜图案化而不需要借助任何掩模版和光刻过程。这种耗材少、低功率、低成本的喷墨打印技术应用于大面积商业化制备显示背板阵列具有很大的应用前景。

本文采用喷墨打印工艺制备了 ZnO/IGZO 二维电子气(2DEG)结构的异质结薄膜晶体管,并通过改变薄膜厚度及异质结结构优化了 MOTFT 的性能。实验结果表明,异质结 MOTFT 在 ZnO 厚度为 6 nm 和 IGZO 厚度为 10 nm 时性能最优,迁移率最高可达  $6.42 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ , 阈值电压为 0.4 V, 开关比高达  $1.8 \times 10^8$ , 亚阈值摆幅为 319 mV/dec。并与单层 ZnO 或 IGZO 为有源层的薄膜晶体管相比,明确了其性能提高的机理。

## 2 实 验

### 2.1 材料与测试

IGZO 前驱体墨水制备:将 30.69 mg 硝酸镓(99.99%, Aladdin)溶解在 4 mL 2-甲氧基乙醇(Aladdin)溶剂中,搅拌 0.5 h 至完全溶解。溶液中加入 288.73 mg 硝酸铟(99.99%, Aladdin),搅拌半小时至完全溶解。再在混合溶液中加入 71.12 mg 乙酸锌(99.99%, Aladdin),充分搅拌 6 h,最终得到 0.3 mol/L 量比为 10:63:27(水合硝酸镓:水合硝酸铟:二水合醋酸锌)的 IGZO 前驱体溶液。以前述溶质的 1/3 并以上述同样方式配置 0.1 mol/L 的 IGZO 溶液。

ZnO 前驱体墨水的制备:将 87.80 mg 乙酸锌

溶解在 4 mL 2-甲氧基乙醇溶剂中,充分搅拌 2 h 至完全溶解,得到 0.1 mol/L 的 ZnO 前驱体墨水,并将乙酸锌质量减半后配置 0.05 mol/L 的 ZnO 前驱体墨水。

喷墨打印设备使用 Microfab 公司的 Jetlab II 型压电喷墨打印系统,薄膜晶体管的输出特性曲线与转移特性曲线均采用半导体参数分析仪(KEYSIGHT Technologies, B2902A)进行测试分析。有源层表面形貌及薄膜厚度采用 Brucker 公司的 Multimode system 原子力显微镜(AFM)进行测试。

### 2.2 金属氧化物薄膜晶体管的制备

金属氧化物薄膜晶体管均采用底栅顶接触结构(如图 1 所示),所有器件的基底均为带有 100 nm 厚二氧化硅层的重掺杂硅片,尺寸为  $1.5 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm}$ 。所用硅片先用丙酮、异丙醇和去离子水分别进行超声清洗,并用氮气吹干,而后等离子处理 30 s。本研究共制备 4 种薄膜晶体管,其有源层分别为 ZnO、IGZO 和 ZnO/IGZO、IGZO/ZnO。所有有源层均采用喷墨打印方式制备,喷嘴直径 50  $\mu\text{m}$ ,单液滴体积 100 pL 左右,墨滴间距 1.5 mm,打印过程中基板温度为 48  $^\circ\text{C}$ ,有源层厚度通过使用不同浓度的打印墨水来控制。借助掩模版( $L = 40 \mu\text{m}$ ,  $W = 500 \mu\text{m}$ )并采用热蒸发铝的形式蒸镀 50 nm 厚的源漏电极。

ZnO 薄膜晶体管制备(图 1(a)):在基片上喷墨打印 ZnO 前驱体溶液,并在 400  $^\circ\text{C}$  条件下进行热退火处理 1.5 h,通过掩模板制备铝源漏电极。

IGZO 薄膜晶体管制备(图 1(b)):在基片上喷墨打印 IGZO 前驱体溶液,并在 100  $^\circ\text{C}$  条件下进行预退火处理 1 h,再在 380  $^\circ\text{C}$  条件下进行高温退火 1.5 h,最后通过掩模板蒸镀 50 nm 厚的铝源漏电极。

IGZO/ZnO 及 ZnO/IGZO 异质结薄膜晶体管制备:基片上先通过喷墨打印制备 ZnO 薄膜,对样品 350  $^\circ\text{C}$  条件下热退火 1.5 h,等离子处理 30 s,再通过喷墨打印在 ZnO 薄膜上沉积 IGZO 薄膜,对所得样品先在 100  $^\circ\text{C}$  条件下进行预退火处理 1 h,再在 380  $^\circ\text{C}$  条件下进行高温退火 1.5 h,最终制备源漏电极(图 1(c))。通过同样方式,调整 ZnO 与 IGZO 薄膜层的制备顺序可制备 ZnO/IGZO 异质结薄膜晶体管(图 1(d))。膜厚通过改变墨水浓度测量获得。

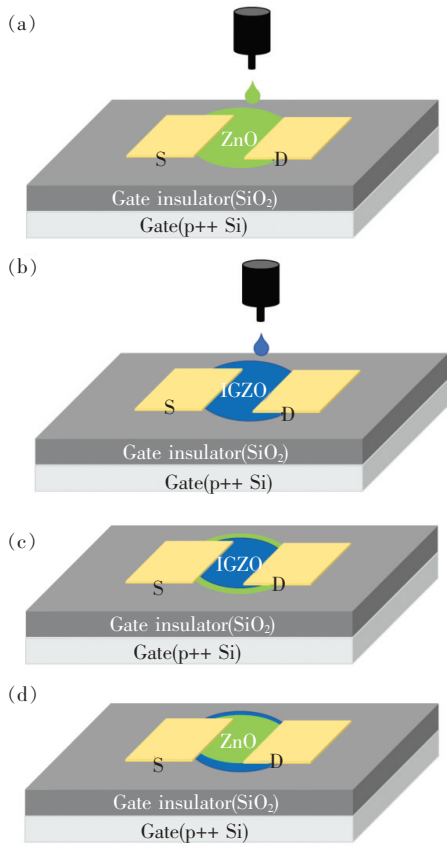


图 1 单层结构和异质结结构。(a) 单层 ZnO 示意图; (b) 单层 IGZO 示意图; (c) IGZO/ZnO 异质结示意图; (d) ZnO/IGZO 异质结示意图。

Fig. 1 Single layer structure and heterojunction structure. (a) Schematic diagram of single-layer ZnO. (b) Schematic diagram of single-layer IGZO. (c) Schematic diagram of IGZO/ZnO heterojunction. (d) Schematic diagram of ZnO/IGZO heterojunction.

### 3 结果与讨论

图 2 为单层 IGZO 和 ZnO 有源层晶体管的转移特性曲线, 将单层半导体器件的性能水平作为参考标准, 所有晶体管均表现出典型 n 型特性。打印的单层晶体管因为有源层/绝缘层界面接触原因, 表现出相对较低的迁移率 ( $\mu < 1 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ )。饱和区的迁移率由公式(1)计算得出:

$$I_D = \frac{\mu C_i W}{2L} (V_{GS} - V_{TH})^2, \quad (1)$$

其中,  $C_i$  为器件绝缘层的单位面积电容值,  $V_{GS}$  为栅极所加电压,  $W$  和  $L$  分别为器件的沟道宽度与长度,  $I_D$  为源漏之间的电流值,  $V_{TH}$  为阈值电压。

测试得到单层 IGZO TFT 和 ZnO TFT 的迁移率分别为  $0.72 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$  和  $0.34 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。

相对于 ZnO TFT 来说, IGZO TFT 有更低的关态电流和更高的开态电流, 开关比达到  $6 \times 10^6$  (ZnO TFT 为  $3 \times 10^4$ )。IGZO 的性能显著强于 ZnO 的性能, 可能的原因是单层 ZnO TFT 由于存在大量的本征缺陷, 特别是在氧化锌表面存在大量氧空位<sup>[13]</sup>, 导致 ZnO TFT 有更高的关态电流及更低的开态电流。另外, ZnO TFT 的亚阈值摆幅较高 ( $1.073 \text{ mV/dec}$ ), 且阈值电压较大 (达到  $7.4 \text{ V}$ ), 也可推断打印 ZnO 有源层缺陷较多。

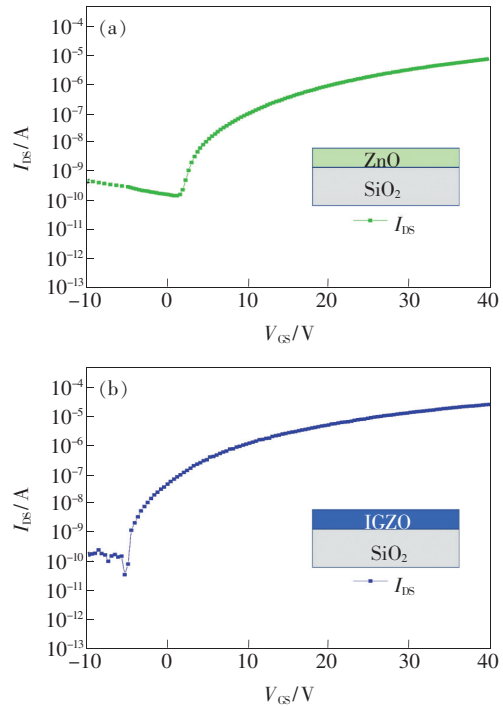


图 2 单层 MOTFT 转移曲线。(a) ZnO TFT 转移曲线; (b) IGZO TFT 转移曲线。

Fig. 2 Single-layer MOTFT transfer curve. (a) ZnO TFT transfer curves. (b) IGZO TFT transfer curves.

表 1 单层 MOTFT 性能汇总

Tab. 1 Single-layer MOTFT performance summary

单层 TFT	$I_{on}/I_{off}$	$V_{TH}/V$	$SS/(mV \cdot dec^{-1})$	$\mu_{FET}/(cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1})$
IGZO	$6 \times 10^6$	2.5	343	0.72
ZnO	$3 \times 10^4$	7.4	1 073	0.34

图 3 为基于 IGZO 和 ZnO 的不同结构或膜厚的异质结晶体管转移特性曲线。图 3 (a) 对应于图 1 (d) 先打印 IGZO 有源层的 TFT 性能, 图 3 (b) 对应于图 1 (c) 先打印 ZnO 有源层的 TFT 性能, 不同打印顺序及不同厚度的异质结 TFT 性能列于表 2 中。若先打印 IGZO 有源层, 虽然 4 组不同

厚度组合的 ZnO/IGZO 异质结表现出类似的关态电流,但是开态电流却相差两个量级。ZnO 6 nm/IGZO 20 nm 开态电流为 4 组该结构顺序异质结中最小,约为  $7.2 \times 10^{-6}$  A,开关比约为  $10^6$ 。在 ZnO 6 nm/IGZO 10 nm 异质结中开态电流为 4 组中最大,为  $2.2 \times 10^{-4}$  A,开关比约为  $1.8 \times 10^8$ ,迁移率也是 4 组中最大的,达到  $6.42 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。ZnO 10 nm/IGZO 20 nm 迁移率是 4 组中最小的,仅为  $0.45 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ,可能是因为过厚的膜厚限制了载流子通过异质结结构,使源漏电极之间的电导降低。而其他两组 ZnO 10 nm/IGZO 10 nm 和 ZnO 6 nm/IGZO 20 nm 性能差别不大,性能处于上述两组 ZnO/IGZO 异质结之间,开态电流均为  $2.0 \times 10^{-5}$  A,开关比为  $10^7$ ,迁移率分别为  $3.06 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$  和  $3.62 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。

若先打印 ZnO 有源层,IGZO/ZnO 异质结晶体管表现出近乎一致的性能,包括开态电流和关态电流。在 4 组不同厚度组合 IGZO/ZnO 异质结晶体管中,IGZO 20 nm/ZnO 6 nm 的迁移率最高达  $2.99 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ,较单层 ZnO 有了近 9 倍提高,IGZO 有源层的增加改善了 ZnO 表面薄膜的缺陷。

表 2 不同顺序及厚度异质结氧化物晶体管的性能汇总

Tab.2 Summary of heterojunction structure TFT performance in different order and thickness

后沉积/先沉积	$I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$	$V_{\text{TH}}/\text{V}$	$\text{SS}/(\text{mV} \cdot \text{dec}^{-1})$	$\mu_{\text{FET}}/(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$
ZnO 6 nm/IGZO 20 nm	$3.2 \times 10^7$	-1.5	345	3.62
ZnO 10 nm/IGZO 20 nm	$4.0 \times 10^7$	0.3	346	0.45
ZnO 6 nm/IGZO 10 nm	$1.8 \times 10^8$	0.4	319	6.42
ZnO 10 nm/IGZO 10 nm	$1.3 \times 10^7$	-1.8	347	3.06
IGZO 20 nm/ZnO 10 nm	$2.0 \times 10^6$	5.1	660	2.78
IGZO 20 nm/ZnO 6 nm	$5.8 \times 10^6$	5.8	663	2.99
IGZO 10 nm/ZnO 6 nm	$2.3 \times 10^6$	3.6	739	2.43
IGZO 10 nm/ZnO 10 nm	$4.6 \times 10^7$	5.6	457	2.73

由表 2 所列性能进行对比,发现 ZnO/IGZO 异质结晶体管性能普遍好于 IGZO/ZnO 异质结晶体管。ZnO 6 nm/IGZO 10 nm 在若干异质结结构中性能表现最佳, $I_{\text{off}}$ 较单层 IGZO 略有下降,而  $I_{\text{on}}$ 达到  $2.2 \times 10^{-4}$  A,比 4 种单层器件的都要大。迁移率和亚阈值摆幅均有大幅度改善。尽管 ZnO/IGZO 异质结晶体管表现出与单层 IGZO 器件类似的关态电流,但是它可以维持更高的开态电流,在电流开/关比、亚阈值摆幅和  $V_{\text{TH}}$  等性能上较单

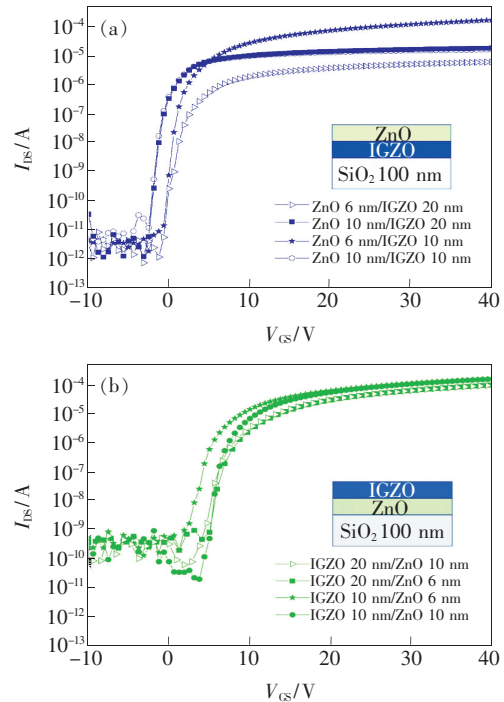


图 3 不同顺序及厚度的异质结结构转移曲线。(a) ZnO/IGZO 异质结;(b)IGZO/ZnO 异质结。

Fig.3 Heterojunction structure transfer curves in different order and thickness. (a) ZnO/IGZO heterojunction. (b) IGZO/ZnO heterojunction.

层 IGZO-TFT 或 ZnO-TFT 都有大幅提高。图 3 转移特性曲线揭示了 ZnO/IGZO 晶体管显示出比单层 ZnO 器件高 19 倍的  $\mu_{\text{FET}}$ ,比单层 IGZO 晶体管高至少 9 倍。异质结结构对 TFT 的影响在表 2 中有更完整的展现。与单层相比,异质结晶体管的阈值电压  $V_{\text{TH}}$  始终较 ZnO 更小,表明在沟道中存在较高的电子浓度,其来源将在下文讨论。

ZnO/IGZO 异质结晶体管性能之所以普遍好于 IGZO/ZnO 异质结晶体管,是因为 IGZO 对打印

ZnO 具有表面修饰作用。为了确定 IGZO 对 ZnO 薄膜形貌的影响, 我们通过原子力显微镜 (AFM) 研究了每个氧化层的表面形貌。图 4(a) ~ (c) 显示了 IGZO、ZnO 和 ZnO/IGZO 的 AFM 图像。打印的异质结表面比单层表面更加平滑, 10 nm IGZO 均方粗糙度 ( $\sigma_{\text{RMS}}$ ) 为 0.3 nm 左右 (图 4(a)), 6 nm ZnO 均方粗糙度 ( $\sigma_{\text{RMS}}$ ) 为 0.6 nm 左右 (图 4(b))。而打印在 IGZO 层上的 ZnO (图 4(c)) 也表现出非常平坦的表面,  $\sigma_{\text{RMS}} \sim 0.4$  nm, 小于单层 ZnO 的粗糙度, 这表示异质结结构降低了薄膜表面的粗糙度, 更有利于电荷的传输。这也证明了

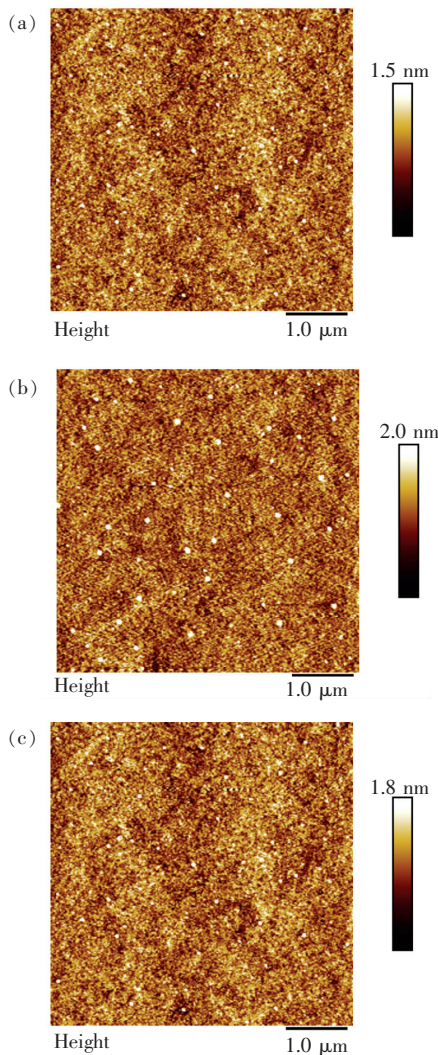


图 4 单层及 ZnO/IGZO 异质结 AFM。(a) 10 nm IGZO 单层薄膜 AFM; (b) 6 nm ZnO 单层薄膜 AFM; (c) 6 nm ZnO / 10 nm IGZO 异质结薄膜 AFM。

Fig. 4 Single layer and ZnO/IGZO heterojunction AFM. (a) 10 nm IGZO single layer film AFM. (b) 6 nm ZnO single layer film AFM. (c) 6 nm ZnO / 10 nm IGZO heterojunction film AFM.

IGZO 和 ZnO 的沉积顺序导致形成具有低界面粗糙度的 ZnO/IGZO 异质结。所以 ZnO 对 IGZO 表面缺陷也有钝化作用<sup>[14-15]</sup>, 由于表面电子累积而导致界面处肖特基势垒高度降低从而抑制电子的注入势垒, 也有助于提高性能。

对于本研究中晶体管性能的提高, 更重要的是, 对于异质结结构的薄膜晶体管, 在其有源层界面处容易形成二维电子气 (2DEG)<sup>[16]</sup>。但二维电子气的形成需要异质结中的两种有源层有一定的能级匹配关系。我们推测, 由于 ZnO 6 nm/IGZO 10 nm 异质结的能级更匹配, 在其有源层界面处形成了二维电子气, 而在其他 IGZO/ZnO 或其他厚度的 ZnO/IGZO 结构中不能形成二维电子气, 所以导致 ZnO 6 nm/IGZO 10 nm 异质结的晶体管性能普遍好于其他异质结晶体管。在 ZnO/IGZO 异质结的能带图 (图 5) 中, ZnO 的导带 ( $E_c$ ) 到 IGZO 的电子转移归因于  $E_c$  偏移, 导致在在异质界面附近形成空间受限的自由电子, 即 2DEG。其中二维电子气使得在器件关态时, 电荷会被束缚在 IGZO 弯曲的能带中, 使得  $I_{\text{off}}$  更小。而在开态时, 原本存储在尖峰能带中的电子被释放, 沟道载流子变多, 有更高的开态电流, 最终获得较高的电流开关比。这种现象很好地反映在固有电荷载流子传导机制中, 其主要受渗透传导 (PC) 机制控制。因此, 与基于陷阱限制传导 (TLC) 的单层氧化物晶体管相比, 异质结晶体管表现出不同的载流子传输特性<sup>[17]</sup>。由于传导机制的显著变化, 异质结结构半导体能够进行带状电子传输, 电子迁移率明显增加, 从而产生优异的 TFT 性能。

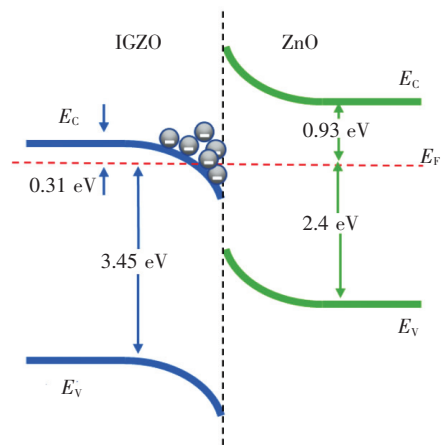


图 5 ZnO/IGZO 2DEG 模型

Fig. 5 ZnO/IGZO 2DEG model

## 4 结 论

本研究首次利用喷墨打印技术制备了 ZnO/IGZO 异质结并应用于 TFT 中,所制备的 ZnO/IGZO 异质结晶体管由于其表面粗糙度降低,且第二层打印的 ZnO 对 IGZO 表面有一定的钝化作用,有利于交界面电子的积累,另外由于两层金属氧化物导带差距较大,部分自由电子被限制在 ZnO/IGZO 异质界面,形成了 2DEG 结构,使异质结结构薄膜晶体管的开态电流大大增加,而关态电流减小,最终使其性能大大提高。

我们的研究结果为金属氧化物 TFT 的结构

设计与性能优化提供了方向,无论是通过进一步的异质界面工程还是使用不同的材料或掺杂方案,都可以通过改变能级得到 2DEG 结构。例如对 ZnO 进行 n 型掺杂改变能级,可以用与调制掺杂的 AlGaAs/GaAs 异质结场类似的方式来调谐受限电子,从而调整 TFT 特性。

最后,我们的结果证明使用溶液生长的 ZnO/IGZO 异质界面可作为增强金属氧化物 TFT 中电子传输的有效方法。溶液处理的金属氧化物半导体因其附加优势——可以用低成本实现大规模生产,未来可能会直接与现有的成熟工业化工艺竞争。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] NOMURA K, OHTA H, UEDA K, *et al.*. Thin-film transistor fabricated in single-crystalline transparent oxide semiconductor [J]. *Science*, 2003, 300(5623):1269-1272.
- [ 2 ] LIU J, BUCHHOLZ D B, CHANG R P H, *et al.*. High-performance flexible transparent thin-film transistors using a hybrid gate dielectric and an amorphous zinc indium tin oxide channel [J]. *Adv. Mater.*, 2010, 22(21):2333-2337.
- [ 3 ] PETTI L, MUNZENRIEDER N, VOGT C, *et al.*. Metal oxide semiconductor thin-film transistors for flexible electronics [J]. *Appl. Phys. Rev.*, 2016, 3(2):021303-1-10.
- [ 4 ] 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(7016):488-492.
- [ 5 ] FORTUNATO E, BARQUINHA P, MARTINS R. Oxide semiconductor thin-film transistors: a review of recent advances [J]. *Adv. Mater.*, 2012, 24(22):2945-2986.
- [ 6 ] KIM Y H, HEO J S, KIM T H, *et al.*. Flexible metal-oxide devices made by room-temperature photochemical activation of sol-gel films [J]. *Nature*, 2012, 489(7414):128-132.
- [ 7 ] LIN Y H, THOMAS S R, FABER H, *et al.*. Al-doped ZnO transistors processed from solution at 120 °C [J]. *Adv. Electron. Mater.*, 2016, 2(6):1600070-1-11.
- [ 8 ] YU X G, MARKS T J, FACCHETTI A. Metal oxides for optoelectronic applications [J]. *Nat. Mater.*, 2016, 15(4):383-396.
- [ 9 ] MA L T, FAN H Q, TIAN H L, *et al.*. The n-ZnO/n-In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> heterojunction formed by a surface-modification and their potential barrier-control in methanal gas sensing [J]. *Sens. Actuators B—Chem.*, 2016, 222:508-516.
- [ 10 ] FABER H, DAS S, LIN Y H, *et al.*. Heterojunction oxide thin-film transistors with unprecedented electron mobility grown from solution [J]. *Sci. Adv.*, 2017, 3(3):e1602640-1-9.
- [ 11 ] HWANG J D, YANG C C, CHU C M. MgZnO/ZnO two-dimensional electron gas photodetectors fabricated by radio frequency sputtering [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2017, 9(28):23904-23908.
- [ 12 ] KHIM D, LIN Y H, NAM S, *et al.*. Modulation-doped In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO heterojunction transistors processed from solution [J]. *Adv. Mater.*, 2017, 29(19):1605837-1-7.
- [ 13 ] ÖZGÜR Ü, ALIVOV Y I, LIU C, *et al.*. A comprehensive review of ZnO materials and devices [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, 98(4):041301-1-103.
- [ 14 ] TETZNER K, ISAKOV I, REGOUTZ A, *et al.*. The impact of post-deposition annealing on the performance of solution-processed single layer In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and isotype In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO heterojunction transistors [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2017, 5(1):59-64.
- [ 15 ] LIN Y H, FABER H, LABRAM J G, *et al.*. High electron mobility thin-film transistors based on solution-processed semiconducting metal oxide heterojunctions and quasi-superlattices [J]. *Adv. Sci.*, 2015, 2(7):1500058-1-12.

- [16] LEE M, JO J W, KIM Y J, *et al.*. Corrugated heterojunction metal-oxide thin-film transistors with high electron mobility *via* vertical interface manipulation [J]. *Adv. Mater.*, 2018, 30(40):1804120.
- [17] KRAUSMANN J, SANCTIS S, ENGSTLER J, *et al.*. Charge transport in low-temperature processed thin-film transistors based on indiumoxide/zinc oxide heterostructures [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, 10(24):20661-20671.



杨文字(1994 -),男,湖北咸宁人,硕士研究生,2015年于长江大学获得学士学位,主要从事金属氧化物薄膜晶体管及 AMOLED 背板的研究。

E-mail: yphy94@hotmail.com



陈惠鹏(1981 -),男,福建邵武人,博士,研究员,博士生导师,2009年于美国 Tufts 大学获得博士学位,主要从事薄膜晶体管的研究。

E-mail: hpchen@fzu.edu.cn



张国成(1981 -),男,湖北监利人,博士研究生,副教授,2007年于福州大学获得硕士学位,主要从事薄膜晶体管的研究。

E-mail: zgc@fjut.edu.cn