



## 镨掺杂铟镓氧化物薄膜晶体管的低频噪声特性分析

朱宇博 徐华 李民 徐苗 彭俊彪

### Analysis of low frequency noise characteristics of praseodymium doped indium gallium oxide thin film transistor

Zhu Yu-Bo Xu Hua Li Min Xu Miao Peng Jun-Biao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 168501 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210368

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210368>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 氢化非晶硅薄膜晶体管的低频噪声特性

Low-frequency noise in hydrogenated amorphous silicon thin film transistor

物理学报. 2017, 66(23): 237101 <https://doi.org/10.7498/aps.66.237101>

#### 氢元素对铟镓锌氧化物薄膜晶体管性能的影响

Effects of hydrogen impurities on performances and electrical reliabilities of indium-gallium-zinc oxide thin film transistors

物理学报. 2018, 67(9): 098502 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180074>

#### 溶胶-凝胶法制备氧化锡基薄膜及薄膜晶体管的研究进展

Research progress of tin oxide-based thin films and thin-film transistors prepared by sol-gel method

物理学报. 2020, 69(22): 228102 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200653>

#### 铟镓锌氧薄膜晶体管的悬浮栅效应研究

Floating gate effect in amorphous InGaZnO thin-film transistor

物理学报. 2018, 67(4): 047302 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172325>

#### 蓝紫光发光二极管中的低频产生-复合噪声行为研究

Low-frequency generation-recombination noise behaviors of blue/violet-light-emitting diode

物理学报. 2019, 68(12): 128104 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190189>

#### GaN肖特基二极管的正向电流输运和低频噪声行为

Forward current transport and noise behavior of GaN Schottky diodes

物理学报. 2021, 70(8): 087201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201467>

# 镨掺杂铟镓氧化物薄膜晶体管的 低频噪声特性分析\*

朱宇博<sup>1)3)</sup> 徐华<sup>2)†</sup> 李民<sup>2)</sup> 徐苗<sup>2)3)</sup> 彭俊彪<sup>3)‡</sup>

1) (华南理工大学电子与信息学院, 广州 510640)

2) (广州新视界光电科技有限公司, 广州 510530)

3) (华南理工大学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, 广州 510640)

(2021年2月25日收到; 2021年3月19日收到修改稿)

本文研究了镨掺杂铟镓氧化物 (PrIGO) 薄膜晶体管 (thin film transistor, TFT) 的低频噪声特性. 根据低频噪声测试分析结果得知: IGO-TFT 和 PrIGO-TFT 器件沟道电流的功率谱密度与频率的关系均满足  $1/f$  ( $\gamma \approx 0.8$ ) 的关系, 符合载流子数涨落模型. 通过研究不同沟道长度对器件低频噪声的影响, 明确了器件的噪声主要来源于沟道区而非源/漏接触区. 基于载流子数涨落模型, 提取界面处的缺陷态, 发现 Pr 元素掺杂会在 IGO 体系中诱导出缺陷态. 而该缺陷态可以作为电离氧空位和电子的复合中心, 进而改善氧化物 TFT 器件中由氧空位所导致的光照负偏压 (negative bias illumination stability, NBIS) 稳定性问题.

**关键词:** 铟镓氧化物, 薄膜晶体管, 低频噪声

**PACS:** 85.30.Tv, 73.50.Dn, 73.40.Qv

**DOI:** 10.7498/aps.70.20210368

## 1 引言

金属氧化物薄膜晶体管 (metal oxide thin film transistor, MOTFT) 因其具有较高的迁移率、均匀性较好、开关电流比大以及透光性佳等优点<sup>[1-3]</sup>, 在显示领域具有广泛的应用潜力, 其制备和电学性能研究已成为国内外研究热点.

目前为止, 实现量产化的金属氧化物以铟镓锌氧化物 (indium gallium zinc oxide, IGZO) 为主, 相比之下铟镓氧化物 (indium gallium oxide, IGO) 未含有相对弱结合的 Zn-O 结合键, 其不易形成由于“热载流子”冲击而造成器件性能退化的现象<sup>[4]</sup>,

这在实际的产品应用中具有较强的吸引力. 但是, 三元的铟镓氧化物相对较易结晶<sup>[5]</sup>, 其在大面积均匀性方面有一定的影响. 另外, 根据薄膜晶体管 (thin film transistor, TFT) 的实际工作状态, TFT 会长时间的工作在负偏压状态, 而且会受到周围环境光或自身像素点发光照射的影响, 因此, 研究负偏压和光照共同作用下的薄膜晶体管的稳定性具有重要的现实意义. 目前, 光照下的负偏压稳定性 (negative bias illumination stability, NBIS) 较差是当前氧化物薄膜晶体管在实际应用中必须面对的挑战<sup>[6-8]</sup>. 通常需要增加遮光层以降低光照对器件的恶化, 但这必然会导致制造成本和设计复杂程度的增加. 我们前期的研究表明, 通过在氧化铟铟

\* 广东省重点研发项目 (批准号: 2019B010924004, 2019B010934001, 2019B010925001)、广东省国际科技合作计划 (批准号: 2018A050506022) 和季华实验室科研项目 (批准号: X190221TF191) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xuhua@newvision-cn.com

‡ 通信作者. E-mail: psjbpeng@scut.edu.cn

(indium zinc oxide, IZO) 体系材料中掺入一定量的氧化镨, 可以在基体材料的浅能级处诱导出受主缺陷态, 该缺陷态可以作为电离的氧空位与离化电子的复合中心, 能有效地改善薄膜晶体管与光照相关的稳定性<sup>[9]</sup>. 因此, 本文将基于 IGO 体系, 通过引入镨离子制备氧化物半导体材料镨铟镓氧 (PrIGO), 以改善器件光稳定性. 通过对半导体器件的噪声特性分析, 研究稀土元素掺杂前后的薄膜晶体管低频噪声的物理机制. 噪声特性分析作为模拟电路应用中关键参数, 可评估后续电路和系统可以检测和处理的信号电平的下限, 而且噪声是决定系统分辨力和信噪比的主要因素<sup>[10]</sup>. 器件噪声的大小直接影响整个电子系统的性能与可靠性, 而且能直接地反映器件内部, 特别是界面中缺陷状态和数量<sup>[11,12]</sup>. 因此, 我们尝试引入噪声分析, 进一步研究稀土氧化物在半导体器件中的影响.

本文制备了高稳定性的稀土元素镨掺杂的氧化铟镓薄膜晶体管, 进一步研究了稀土元素镨掺杂对器件低频噪声特性的影响, 分析了器件的低频噪声来源以及适用机理, 研究了不同沟道长度对器件低频噪声特性的影响, 并提取界面处的缺陷态; 进一步印证了在氧化铟镓基体材料中进行稀土氧化镨掺杂亦会产生作为光生载流子复合中心的“缺陷态”的结论.

## 2 IGO-TFT 和 PrIGO-TFT 器件制备与性能

### 2.1 IGO-TFT 和 PrIGO-TFT 器件制备

如图 1(a) 所示, 所用器件均采用刻蚀阻挡层 (etch stop layer, ESL) 结构. 首先, 采用直流磁控溅射的方式在玻璃衬底上溅射一层 200 nm 厚的栅极金属钼 (Mo) 层, 利用湿法刻蚀对栅极薄膜进行图形化. 然后, 通过等离子体增强型化学沉积 (plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD) 技术制备双层堆叠的栅绝缘层, 下层为 250 nm 厚的氮化硅薄膜, 上层为 50 nm 厚的二氧化硅薄膜, 利用干法刻蚀进行图形化. 随后, 通过物理气相沉积 (physical vapor deposition, PVD) 分别制作一层 30 nm 厚的 IGO (In/Ga = 2 mol/1 mol) 薄膜或 PrIGO (Pr/In/Ga = 0.2 mol/2 mol/1 mol) 薄膜作为薄膜晶体管器件的有源层; 溅射气压为 5 mTorr, 溅射气氛为氧气和氩气的混合气体, 氧气所占比例为 20%, 溅射功率为 300 W, 利用草酸进行刻蚀图形化. 再次通过 PECVD 制作一层 300 nm 厚的二氧化硅薄膜作为刻蚀阻挡层, 利用干法刻蚀进行薄膜图形化. 随后, 采用直流磁控溅射方式制备一层 200 nm 厚的钼金属作为源漏电极, 以湿法刻蚀方式进行图形化. 最后, 所有器

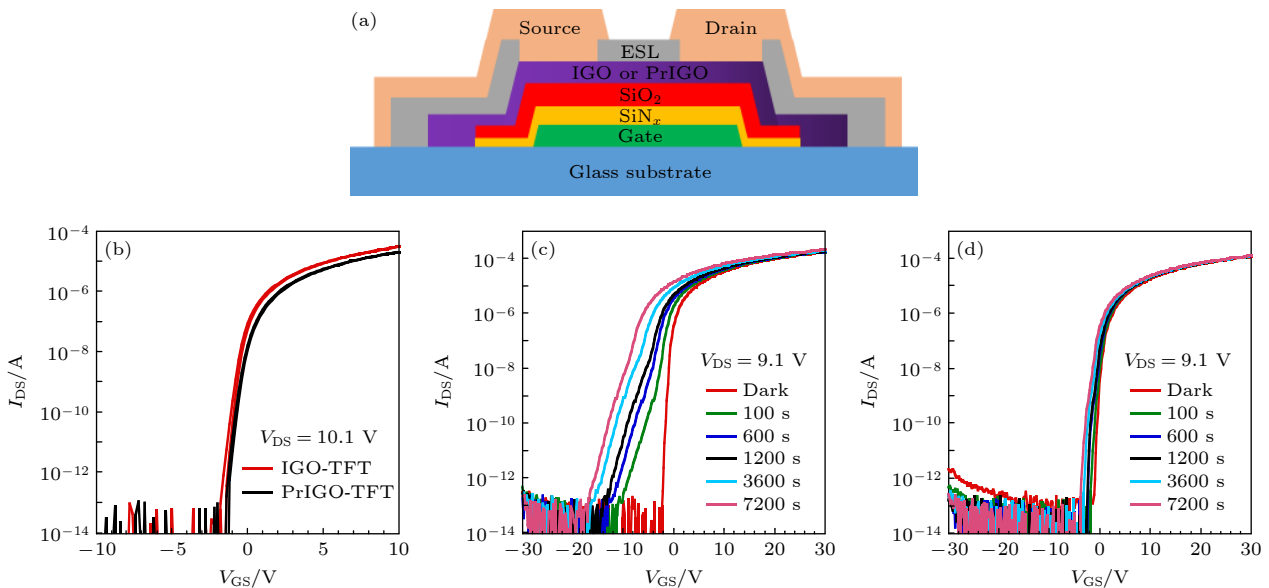


图 1 IGO-TFT 和 PrIGO-TFT (a) 结构示意图; (b) 转移特性曲线; IGO-TFT (c) 和 PrIGO-TFT (d) NBIS 稳定性

Fig. 1. (a) Cross section views and (b) transfer characteristics of IGO-TFT and PrIGO-TFT; NBIS stability of (c) IGO-TFT and (d) PrIGO-TFT.

件在 350 °C 空气氛围中退火 30 min. 采用半导体参数分析仪 Agilent B1500 A 和 Platform-da FS-Pro 分别对器件的电流-电压特性和噪声特性进行表征测试.

## 2.2 IGO-TFT 和 PrIGO-TFT 器件性能

如图 1(b) 所示为 IGO-TFT 和 PrIGO-TFT 的转特性曲线, 器件  $W/L$  均为 20  $\mu\text{m}/10 \mu\text{m}$ . 器件工作在线性区 ( $V_{\text{DS}} \leq V_{\text{GS}} - V_{\text{th}}$ ) 时, 通常  $V_{\text{DS}}$  的值比较小, 漏源电流 ( $I_{\text{DS}}$ ) 表达式为

$$I_{\text{DS}} = \frac{W}{L} \mu_{\text{FE}} C_{\text{ox}} (V_{\text{GS}} - V_{\text{th}}) V_{\text{DS}}. \quad (1)$$

式中,  $V_{\text{DS}}$  为源漏电压;  $V_{\text{GS}}$  为栅电压;  $W/L$  为器件的宽长比;  $\mu_{\text{FE}}$  为场效应迁移率;  $C_{\text{ox}}$  为栅绝缘层的单位面积电容;  $V_{\text{th}}$  为阈值电压. 取  $V_{\text{DS}} = 0.1 \text{ V}$ , 通过拟合  $I_{\text{DS}}-V_{\text{GS}}$  曲线, 可以计算得到器件的场效应迁移率, 拟合曲线的反向延长线与横坐标的截距为阈值电压. 亚阈值摆幅 (SS) 由下式定义

$$SS = \frac{\partial V_{\text{GS}}}{\partial \log(I_{\text{DS}})}. \quad (2)$$

通过相关参数提取可知, IGO-TFT 器件  $V_{\text{th}}$  为 0.3 V, 载流子的  $\mu_{\text{FE}}$  为 19.9  $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , SS 为 0.19 V/decade, 电流开关比 ( $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$ ) 约为  $10^9$ , PrIGO-TFT 器件  $V_{\text{th}}$  为 0.9 V, 器件的  $\mu_{\text{FE}}$  为 15.1  $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , SS 为 0.19 V/decade,  $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$  约为  $10^9$ . 图 1(c) 和图 1(d) 分别为 IGO-TFT 和 PrIGO-TFT 在光照条件下的负偏压稳定性 (测试条件:  $V_{\text{GS}} = -30 \text{ V}$ ,  $V_{\text{DS}} = 0 \text{ V}$ , 光强 = 10000 nits). 由图 1(c) 和图 1(d) 可知, IGO-TFT 在偏压测试 7200 s 后, 开启电压  $V_{\text{on}}$  (器件源漏电流  $I_{\text{DS}}$  为 10 nA 时所对应的栅极电压) 漂移量为 -8.4 V, 而 PrIGO-TFT 在偏压测试 7200 s 后, 开启电压  $V_{\text{on}}$  漂移量仅为 -1.8 V. 很显然, 稀土镨元素的掺入可以有效地提高器件的 NBIS 稳定性.

根据我们前期的研究结果可知, 在 IZO 基材中掺入氧化镨可以有效地改善器件的光偏压稳定性; 其主要机制是稀土元素镨可以在基材中靠近费米能级附近引入浅能级的“受主缺陷”, 该缺陷可以作为光生载流子的复合中心. 在器件基本性能方面, 主要表现为器件的亚阈值摆幅有一定的增加; 但是, 在本文研究的 IGO 基材中, IGO-TFT 和 PrIGO-TFT 的 SS 几乎一致 ( $\sim 0.19 \text{ V/decade}$ ), 而 NBIS 稳定性亦获得了明显的改善. 因此, Pr 是

否能在 IGO 基材中引入作为“受主缺陷”的复合中心, 有必要对其 NBIS 改善的机制做进一步的研究.

## 3 实验结果与分析

### 3.1 薄膜结晶特性研究

图 2(a) 为 IGO 薄膜和稀土镨元素掺杂的 PrIGO 薄膜的 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 谱图. 如图 2(a) 可知, IGO 薄膜的衍射谱中有一明显的结晶峰位 ( $31.33^\circ$ ), 根据衍射谱图可知其对应氧化镨 ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) 的 (222) 晶面<sup>[13]</sup>. 当一定量的氧化镨掺杂到 IGO 基体材料后, 可以明显地看出  $\text{In}_2\text{O}_3$  (222) 晶面处的结晶峰消失. 其原因可能是由于 Pr 离子 ( $\sim 101 \text{ pm}$ ) 的半径大于 In 离子 ( $\sim 81 \text{ pm}$ ) 和 Ga 离子 ( $\sim 62 \text{ pm}$ ), Pr 离子的掺入, 会使 IGO 基体产生晶格畸变, 从而使 IGO 基体向非晶状态转变. 因此, 氧化镨的掺入可以促进 IGO 薄膜的非晶化, 从而保证了薄膜大面积的均匀性; 并且在载流子的传输过程中, 有效地降低薄膜晶界散射的影响.

图 2(b) 为 IGO 薄膜和稀土镨元素掺入的 PrIGO 薄膜的紫外-可见透射光谱图. 由图 2(b) 可知, IGO 薄膜和 PrIGO 薄膜在可见光波段内的平均透过率均大于 80%. 在紫外光波段, Pr 掺入的 PrIGO 薄膜透过率曲线相对 IGO 薄膜发生了轻微的红移现象. 通过  $T_{\text{auc}}$  公式进行计算薄膜光学带隙的大小, 具体公式为

$$\alpha h\nu = C(h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

式中,  $\alpha$  表示吸收系数;  $h\nu$  表示光子能量;  $E_g$  表示光学带隙;  $C$  表示比例常数. 如图 2(b) 插图所示, 以  $h\nu$  为横坐标,  $(\alpha h\nu)^2$  为纵坐标, 作出  $(\alpha h\nu)^2$  随  $h\nu$  变化曲线的切线, 该切线与横坐标的交点即为薄膜的光学带隙. 通过该方法获得了 IGO 和 PrIGO 薄膜的光学带隙分别为 3.54 eV 和 3.47 eV. 可知, Pr 元素的掺入会导致薄膜光学带隙的减小, 所以器件 NBIS 稳定性的提高并不是由于光学带隙的展宽所引起的.

图 2(c) 为 IGO 薄膜和 PrIGO 薄膜的 X 射线光电子能谱 (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) 表征的全谱图, 图 2(c) 的插图是 IGO 和 PrIGO 薄膜总谱图能量在 920—960 eV 之间的局



部放大图, 从局部放大图中可以明显地看出, IGO 薄膜没有出现明显的峰位谱, 而 PrIGO 薄膜在 933.5 和 953.5 eV 处出现了两个主峰位, 分别对应 Pr 3d<sub>5/2</sub> 和 Pr 3d<sub>3/2</sub>. 此外, 根据 XPS 测试分析,

各元素的百分比含量如表 1 所列. 由表 1 可以看出, PrIGO 和 IGO 薄膜各元素的百分比含量与实际靶材中的百分比含量基本相似, 说明稀土元素 Pr 在 IGO 中能够实现良好的掺入.

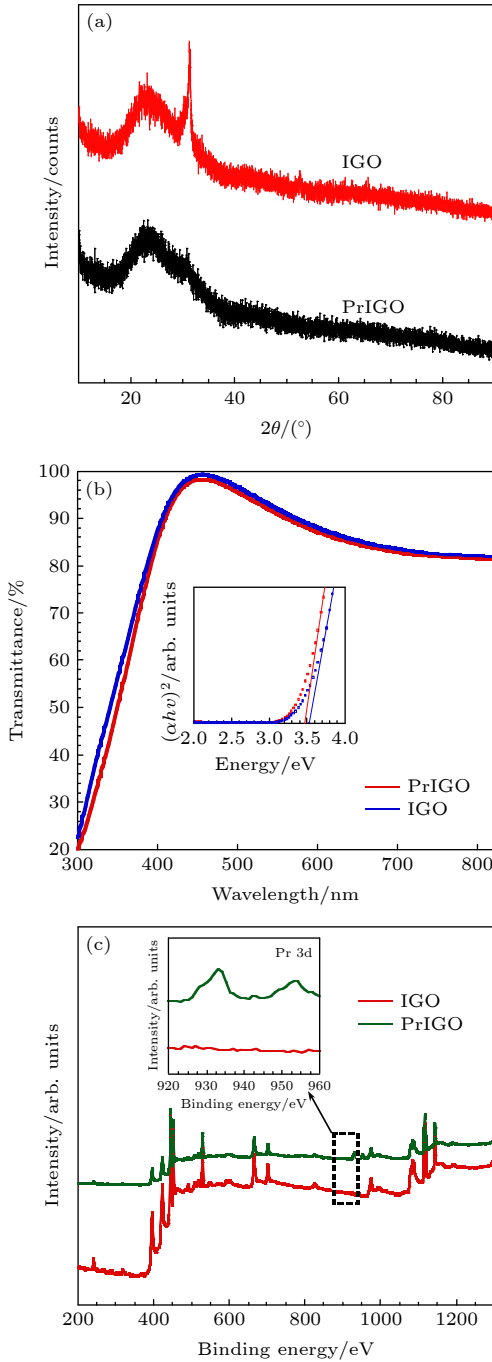


图 2 IGO 和 PrIGO 薄膜 (a) X 射线衍射谱图; (b) 紫外-可见透射光谱图 (插图为  $(\alpha hv)^2$  随  $hv$  变化曲线); (c) X 射线光电子能谱图 (插图为局部放大图)

Fig. 2. (a) X-ray diffraction spectra, (b) UV-visible transmission spectra (the inset shows the curve of  $(\alpha hv)^2$  varying with  $hv$ ) and (c) X-ray photoelectron spectroscopy (the inset is a partial enlarged view) of IGO and PrIGO thin film.

表 1 IGO 和 PrIGO 薄膜中各元素的百分比含量  
Table 1. Percentage contents of each element in IGO and PrIGO films.

Element/at.%	Pr	In	Ga	O
PrIGO	2.86	28.76	15.10	51.89
IGO	—	30.93	15.51	51.85

### 3.2 IGO-TFT 和 PrIGO-TFT 的低频噪声特性与影响机制

在获得了较好的器件稳定性后, 有必要对器件的改善机制做进一步的研究. 大量研究表明, 器件的低频噪声特性是表征器件缺陷机制的有效手段.

众所周知, 半导体器件的噪声来源于某一物理量的随机起伏, 半导体器件中的噪声一般分为白噪声 (white noise)、闪烁噪声 ( $1/f$  噪声) 以及产生复合噪声 (G-R 噪声)<sup>[14]</sup>. 不同噪声的产生机制各不相同, 由于在低频情况下,  $1/f$  噪声和 G-R 噪声较为显著, 故统称为低频噪声. 由于  $1/f$  噪声是由器件界面缺陷及氧化层陷阱电荷所引起的, 因此, 通过对 IGO-TFT 和 PrIGO-TFT 器件低频噪声特性的研究, 能反映出器件内在的质量与可靠性.

在  $V_{DS} = 0.1$  V, 过驱动电压  $V_{GS} - V_{th} = 10.1$  V 条件下, IGO-TFT 和 PrIGO-TFT 归一化的噪声功率谱密度 ( $S_{ID}/I_{DS}^2$ ) 随频率的变化如图 3 所示. 由图 3 可以看出, 在  $10 \text{ Hz} < f < 1 \text{ kHz}$  时, 通过  $1/f$  拟合, 得出  $\gamma \approx 0.8$ ; 当  $f > 1 \text{ kHz}$  时, IGO-TFT 和 PrIGO-TFT 的  $S_{ID}/I_{DS}^2$  值随着频率的改变几乎没有变化, 对于更高的频率而言,  $1/f$  噪声通常湮没在背景噪声和或热噪声中而不可测. 本文主要研究  $1/f$  噪声, 下文低频噪声测试频率范围均为 10 Hz 至 1 kHz. 另外,  $\gamma$  因子还反映了界面附近缺陷态的纵向分布. 当  $\gamma > 1$  时, 说明有源层内的缺陷密度小于栅氧化层内的缺陷密度; 当  $\gamma < 1$  时, 说明有源层内的缺陷密度大于栅氧化层内的缺陷密度<sup>[15]</sup>. 因此, 由  $\gamma \approx 0.8$  可以得出, 在 IGO-TFT 和 PrIGO-TFT 的有源层与栅绝缘层的界面处, 有源层 IGO 和 PrIGO 一侧的缺陷态密度大于二氧化硅一侧的缺陷态密度.

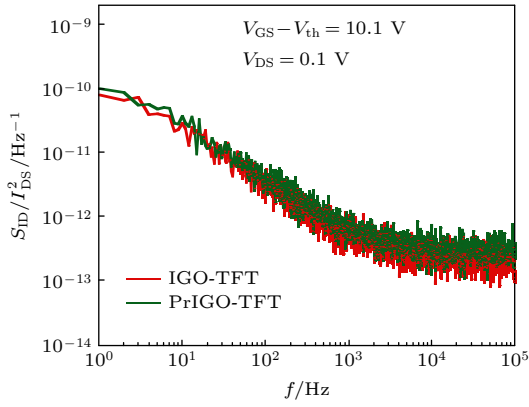


图3 IGO-TFT和PrIGO-TFT归一化噪声功率谱密度随频率的变化

Fig. 3. Normalized noise power spectral densities ( $S_{ID}/I_{DS}^2$ ) versus frequency in the IGO-TFT and PrIGO-TFT.

### 3.3 IGO-TFT和PrIGO-TFT的低频噪声特性的来源

在明确了低频噪声满足  $1/f$ , 而且噪声主要来源于有源层一侧的影响后; 对于 ESL 结构的器件而言, 栅极与源漏电极之间的交叠区域是比较大的, 因此需要进一步研究器件低频噪声的空间位置的来源, 明确源/漏结接触是否对器件的低频噪声产生影响。

若器件低频噪声由沟道电阻和源/漏接触区引起, 噪声功率谱密度可以表达为<sup>[16]</sup>

$$\frac{S_{ID}}{I_{DS}^2} = \frac{S_{ch} + S_{cont}}{(R_{ch} + R_{cont})^2}. \quad (4)$$

式中,  $S_{ch}$  表示沟道产生的噪声功率谱密度;  $S_{cont}$  表示接触电阻引起的噪声功率谱密度;  $R_{ch}$  表示沟道电阻;  $R_{cont}$  表示接触电阻 ( $R_{ch} \gg R_{cont}$ ); 如果沟道噪声是主要的, 即  $S_{ch} \gg S_{cont}$ , (4) 式可表达为

$$\frac{S_{ID}}{I_{DS}^2} = \frac{S_{ch}}{R_{ch}^2} \propto \frac{1}{L}. \quad (5)$$

如果接触噪声是主要的, 即  $S_{ch} \ll S_{cont}$ , (4) 式可表达为

$$\frac{S_{ID}}{I_{DS}^2} = \frac{S_{cont}}{R_{ch}^2} \propto \frac{1}{L^2}. \quad (6)$$

根据 (5) 式和 (6) 式可知, 通过归一化的噪声功率谱密度与沟道长度的变化关系可以确定源/漏接触区是否对器件低频噪声产生影响. 固定  $V_{GS} - V_{th} = 10.1$  V, 在  $V_{DS} = 1.1$  V 的情况下分别对宽长比为  $10 \mu\text{m} / 10 \mu\text{m}$ ,  $10 \mu\text{m} / 20 \mu\text{m}$ ,  $10 \mu\text{m} / 40 \mu\text{m}$  三种器件进行低频噪声测量, 器件归一化的噪声功率谱密度随频率的变化如图 4(a) 和图 4(b) 所示。

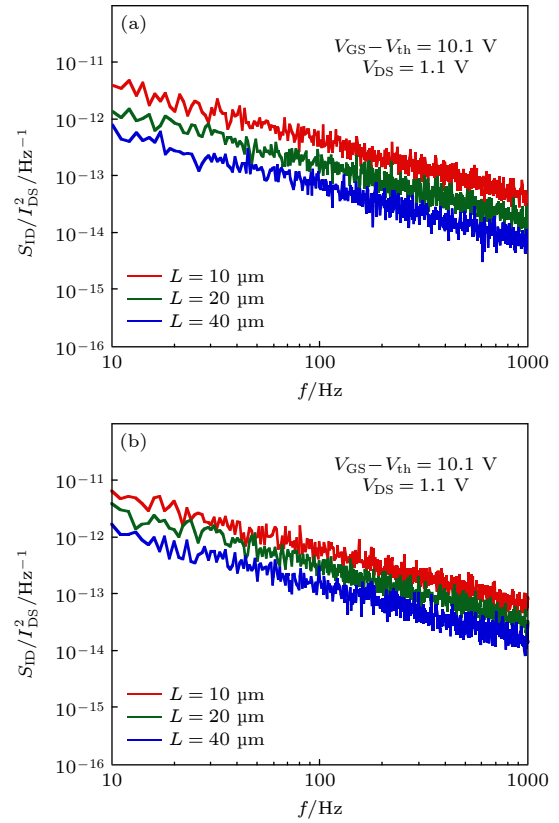


图4 不同沟道长度的IGO-TFT (a)和PrIGO-TFT (b)  $S_{ID}/I_{DS}^2$  随频率的变化

Fig. 4.  $S_{ID}/I_{DS}^2$  versus frequency in the (a) IGO-TFT and (b) PrIGO-TFT with different channel length.

根据图 4(a) 和图 4(b), 在  $f = 10$  Hz 时, 提取不同沟道长度器件对应的  $S_{ID}/I_{DS}^2$  值, 如图 5(a) 所示, IGO-TFT 和 PrIGO-TFT 的  $S_{ID}/I_{DS}^2$  值随的沟道长度的增加而线性减小, 对应的斜率分别为  $-1.08$  和  $-0.97$ , 均约等于  $-1$ . 因此, 基于该实验结果, 可以很明确地得出 IGO-TFT 和 PrIGO-TFT 器件的低频噪声主要来源于器件沟道区的闪烁噪声, 并且可以忽略源/漏接触区对器件低频噪声的影响。

确定了低频噪声的空间位置主要来源于沟道区后, 需进一步明确低频噪声的影响机理; 对于 MOS 管低频噪声的影响机理, 目前主流的解释有三种模型: 载流子数波动模型、迁移率波动模型、载流子数波动及其诱导迁移率波动模型<sup>[17]</sup>. 当器件工作在线性区时, 对于载流子数波动模型, 归一化的漏极电流噪声功率谱密度可以近似表示为<sup>[18]</sup>

$$\frac{S_{ID}}{I_{DS}^2} = \frac{k^* q}{f W L C_{ox}^2 (V_{GS} - V_{th})^2}. \quad (7)$$

式中,  $k^*$  取决于有源层与绝缘层界面附近缺陷俘获和释放载流子的效应;  $C_{ox}$  为单位面积的栅绝缘层

电容;  $f$  为频率. 对于迁移率波动模型, 归一化的漏极电流噪声功率谱密度可以近似表示为<sup>[19]</sup>

$$\frac{S_{ID}}{I_{DS}^2} = \frac{\alpha_H q}{f W L C_{ox} (V_{GS} - V_{th})}. \quad (8)$$

式中,  $\alpha_H$  为 Hooge 因子, 可用于评价不同器件和材料的品质. 另外一种模型是两种的混合模型, 载流子数波动及其诱导迁移率波动模型. 由 (7) 式和 (8) 式, 可以得出通过  $S_{ID}/I_{DS}^2$  与过驱动电压 ( $V_{GS} - V_{th}$ ) 之间的关系来判断 IGO-TFT 和 PrIGO-TFT 器件低频噪声的所适用的模型.

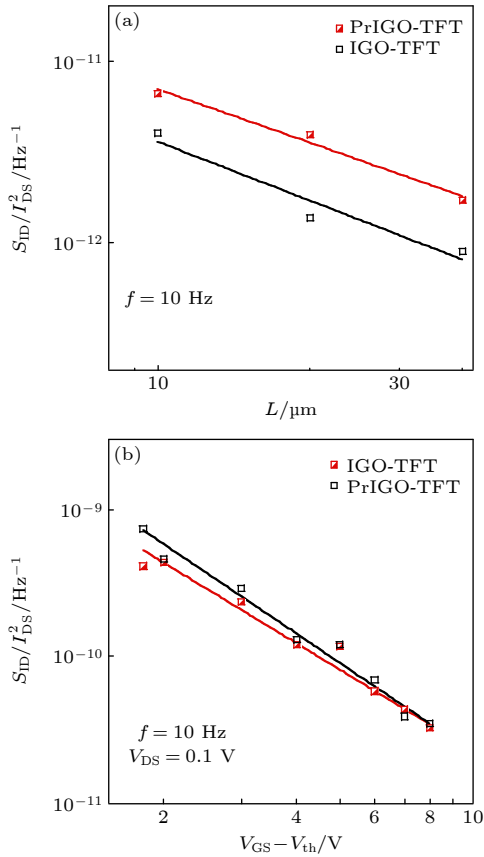


图 5 IGO-TFT 和 PrIGO-TFT (a)  $S_{ID}/I_{DS}^2$  随沟道长度的变化; (b)  $S_{ID}/I_{DS}^2$  随过驱动电压  $V_{GS} - V_{th}$  的变化

Fig. 5.  $S_{ID}/I_{DS}^2$  versus (a) channel length and (b) overdrive voltage ( $V_{GS} - V_{th}$ ) in the IGO-TFT and PrIGO-TFT.

为确定器件低频噪声的影响机理, 在  $V_{DS} = 0.1$  V 条件下, 变换不同的  $V_{GS} - V_{th}$ , 对器件  $S_{ID}/I_{DS}^2$  进行测量. 当频率  $f = 10$  Hz 时, 提取  $S_{ID}/I_{DS}^2$  随  $V_{GS} - V_{th}$  的变化关系如图 5(b) 所示. 由图 5(b) 可知, IGO-TFT 器件的  $S_{ID}/I_{DS}^2$  随  $V_{GS} - V_{th}$  的变化斜率约为 -1.8, 而 PrIGO-TFT 器件的  $S_{ID}/I_{DS}^2$  随  $V_{GS} - V_{th}$  的变化斜率约为 -2. 由 (7) 式和 (8) 式可知, 当斜率关系为 -1 时, 器件的低频噪声机理主要来源

于迁移率涨落模型; 当斜率关系为 -2 时, 器件的低频噪声机理主要来源于载流子数涨落模型. 对于 IGO-TFT 而言, 在低频噪声的影响机理中还包含了一小部分的迁移率涨落机理, 掺杂 Pr 元素后, 器件的低频噪声影响机理完全转化为了载流子数涨落机理. 从 IGO 和 PrIGO 薄膜的 XRD 结果可知 (如图 2(a) 所示), Pr 的掺入能抑制 IGO 薄膜的结晶, 导致晶格对载流子的散射减弱, 而迁移率的波动会受到晶格散射的影响<sup>[20]</sup>, 因此, 相对于 IGO-TFT 来说, 当掺入 Pr 元素后, 迁移率涨落的影响机理会削弱. 虽然 Pr 掺杂前后, 斜率有了轻微的变化, 但 IGO-TFT 和 PrIGO-TFT 器件的低频噪声特性主要还是受载流子数涨落机理的影响.

### 3.4 IGO-TFT 和 PrIGO-TFT 的缺陷态提取

进一步地, 在确定器件的低频噪声特性主要受载流子涨落机理决定后, 下面对器件的缺陷态密度进行提取.

根据载流子数涨落机理, 归一化的噪声功率谱密度可以被表示为<sup>[21]</sup>

$$\frac{S_{ID}}{I_{DS}^2} = \left( \frac{g_m}{I_{DS}} \right)^2 S_{vfb}. \quad (9)$$

式中,  $g_m$  表示器件的跨导;  $S_{vfb}$  表示平带电压功率谱密度, 通常由器件的有源层与栅绝缘层界面处电荷波动所引起, 可用来描述界面态及氧化层边界陷阱对界面处电荷的影响, 另外,  $S_{vfb}$  可以表达为

$$S_{vfb} = \frac{q^2 K T \lambda N_t}{W L C_{ox}^2 f}. \quad (10)$$

式中,  $N_t$  表示缺陷态密度;  $K T$  表示热电势;  $\lambda$  表示隧道衰减系数, 在  $\text{SiO}_2$  中约为 0.1 nm;  $C_{ox}$  表示栅绝缘层电容, 约为 16.5 nF/cm<sup>2</sup>. 由 (10) 式可得出  $N_t$  表达为

$$N_t = \frac{S_{vfb} W L C_{ox}^2 f}{q^2 K T \lambda}. \quad (11)$$

由 (9) 式、(10) 式和 (11) 式可知, 要想提取器件界面附近处的缺陷态密度  $N_t$ , 必须首先提取器件的平带电压功率谱密度  $S_{vfb}$ , 根据文献 [22] 的提取方法, IGO-TFT 和 PrIGO-TFT 器件的实际测量和拟合的  $S_{ID}/I_{DS}^2$  值随  $I_{DS}$  的变化关系如图 6(a) 和图 6(b) 所示, 提取的  $S_{vfb}$  分别为  $1.3 \times 10^{-9} \text{ V}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$  和  $1.6 \times 10^{-9} \text{ V}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$ . 基于 (11) 式可知, 对于 IGO-

TFT 和 PrIGO-TFT, 界面处的缺陷态密度  $N_t$  分别为  $7.76 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$  和  $9.55 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$ . 由  $N_t$  的结果可以得出, 当 Pr 元素掺杂到 IGO 薄膜后, PrIGO-TFT 器件的有源层与栅绝缘层界面附近处的缺陷态密度有一定的增加. 其原因可能是由于稀土元素 Pr 具有丰富的电子能级结构, Pr 元素在氧化物形式中有  $\text{Pr}^{3+}$  和  $\text{Pr}^{4+}$  离子存在,  $\text{Pr}^{4+}$  离子未被占用的  $4f$  轨道对电子具有较强的俘获作用 [23]. 因此, PrIGO-TFT 所提取的缺陷态密度  $N_t$  会比 IGO-TFT 的高.

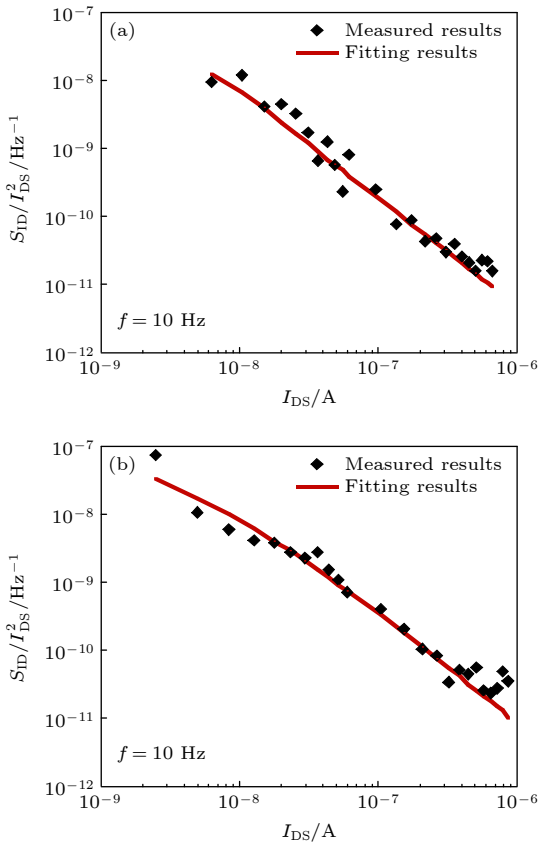


图 6 IGO-TFT (a) 和 PrIGO-TFT (b)  $S_{ID}/I_{DS}^2$  随沟道电流的变化

Fig. 6.  $S_{ID}/I_{DS}^2$  versus drain current in the (a) IGO-TFT and (b) PrIGO-TFT.

根据我们前期的研究结果, Pr 元素掺入到 IZO 基体中可以诱导出浅能级的缺陷态, 该缺陷态可以作为电离的氧空位与光生电子的复合中心, 能够有效地改善器件与光相关的稳定性. 通过低频噪声特性的研究可知, Pr 元素掺杂到 IGO 基体中亦可以诱导出类似的缺陷态. 类似于 IZO 体系, PrIGO-TFT 器件 NBIS 稳定性的提高仍可归因于缺陷辅助模型. 也即, 当有源层内的氧空位由于吸

收光子能量而发生电离, 其在浅能级附近形成离化的氧空位缺陷态; 同时, 离化的光生电子会迅速被 Pr 诱导的受主缺陷态所俘获, 该电子通过 Pr 离子的电子轨道与离化的氧空位缺陷态通过无辐射跃迁快速复合. 因此, Pr 掺杂后的 PrIGO-TFT 在 NBIS 条件下, 阈值电压偏移量大幅改善, 而且未表现出明显的亚阈值摆幅退化现象. 对于 IGO-TFT 和 PrIGO-TFT 器件的 SS 相同的情况, 推断这和 IGO 薄膜呈结晶态 (如图 2(a) 所示) 相关, 晶界散射效应会导致器件的 SS 增加; 而掺杂 Pr 的薄膜呈非晶态, 晶界散射较弱, 但是其引入了一定量的“受主缺陷”, 势垒散射增加; 因此导致了二者 SS 相当.

## 4 结 论

本文通过稀土元素 Pr 掺杂 IGO, 制备出高稳定性的薄膜晶体管. 由实验结果分析可知: IGO-TFT 和 PrIGO-TFT 器件的低频噪声随频率的变化均满足  $1/f$  ( $\gamma \approx 0.8$ ) 变化关系; 通过研究不同沟道长度对 IGO-TFT 和 PrIGO-TFT 器件低频噪声的影响, 明确了器件的噪声主要来源于沟道区, 源/漏接触区对器件低频噪声的影响可以被忽略. 在器件的线性区, 通过沟道电流归一化噪声功率谱密度与过驱动电压函数关系的线性拟合, 确定 IGO-TFT 和 PrIGO-TFT 器件的低频噪声主要受载流子数涨落机理的影响. 根据载流子数涨落机理的模型, 提取 IGO-TFT 和 PrIGO-TFT 界面处的缺陷态密度分别为  $7.76 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$  和  $9.55 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$ . Pr 元素可以在 IGO 体系中诱导出缺陷态, 该缺陷态可以作为电离的氧空位与离化电子复合中心, 促进器件 NBIS 稳定性提高.

## 参考文献

- [1] Nomura K, Ohta H, Takagi A, Kamiya T, Hirano M, Hosono H 2004 *Nature* **432** 488
- [2] Ebata K, Tomai S, Tsuruma Y, Iitsuka T, Matsuzaki S, Yano K 2012 *Appl. Phys. Express* **5** 11102
- [3] Xiao P, Dong T, Lan L, Lin Z, Song W, Song E, Sun S, Li Y, Gao P, Luo D, Xu M, Peng J 2016 *Phys. Status Solidi RRL* **10** 493
- [4] Park H, Bae J, Kang H, Kim D H, Jung P, Park H, Lee S, Bae J U, Yoon S Y, Kang I 2019 *SID Int. Symp. Digest Techn. Papers* **50** 1222
- [5] Cheng Y, Chang S, Chang S 2019 *Mater. Res. Express* **6** 106445



- [6] Chen T, Chang T, Hsieh T, Tsai C, Chen S, Lin C, Hung M, Tu C, Chang J, Chen P 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 192103
- [7] Chowdhury M D H, Migliorato P, Jang J 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 173506
- [8] Ryu B, Noh H, Choi E, Chang K J 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 22108
- [9] Xu H, Xu M, Li M, Chen Z, Zou J, Wu W, Qiao X, Tao H, Wang L, Ning H, Ma D, Peng J 2019 *ACS Appl. Mater. Interfaces.* **11** 5232
- [10] Fung T, Baek G, Kanicki J 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 74518
- [11] Wang L, Liu Y, Geng K, Chen Y, En Y 2018 *Chin. Phys. B* **27** 68504
- [12] Cho I, Cheong W, Hwang C, Lee J, Kwon H, Lee J 2009 *IEEE Electron Device Lett.* **30** 828
- [13] Song A, Javaid K, Liang Y, Wu W, Yu J, Liang L, Zhang H, Lan L, Chang T, Cao H 2018 *Phys. Status Solidi RRL* **12** 1800034
- [14] Wang J, Liu Y, Liu Y R, Wu W J, Luo X Y, Liu K, Li B, En Y F 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 128501 (in Chinese) [王静, 刘远, 刘玉荣, 吴为敬, 罗心月, 刘凯, 李斌, 恩云飞 2016 物理学报 **65** 128501]
- [15] Liu Y, He H Y, Chen R S, Li B, En Y F, Chen Y Q 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 237101 (in Chinese) [刘远, 何红宇, 陈荣盛, 李斌, 恩云飞, 陈义强 2017 物理学报 **66** 237101]
- [16] Deen M J, Rumyantsev S L, Landheer D, Xu D X 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 2234
- [17] Choi H, Jeon S, Kim H, Shin J, Kim C, Chung U 2011 *IEEE Electron Device Lett.* **32** 1083
- [18] Liu Y, He H, Chen R, En Y, Li B, Chen Y 2018 *IEEE J. Electron Devi.* **6** 271
- [19] Kim S, Jeon Y, Lee J, Ahn B D, Park S Y, Park J, Kim J H, Park J, Kim D M, Kim D H 2010 *IEEE Electron Device Lett.* **31** 1236
- [20] Vandamme L K J, Hooge F N 2008 *IEEE Trans. Electron Devices* **55** 3070
- [21] Cai M, Yao R 2017 *J. Appl. Phys.* **122** 154503
- [22] Ghibaudo G, Roux O, Nguyen-Duc C, Balestra F, Brini J 1991 *Phys. Status Solidi A* **124** 571
- [23] Petit L, Svane A, Szotek Z, Temmerman W M 2005 *Phys. Rev. B* **72** 205118

# Analysis of low frequency noise characteristics of praseodymium doped indium gallium oxide thin film transistor\*

Zhu Yu-Bo<sup>1)3)</sup> Xu Hua<sup>2)†</sup> Li Min<sup>2)</sup> Xu Miao<sup>2)3)</sup> Peng Jun-Biao<sup>3)‡</sup>

1) (*School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China*)

2) (*Guangzhou New Vision Opto-electronic Technology Co., Ltd., Guangzhou 510530, China*)

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

(Received 25 February 2021; revised manuscript received 19 March 2021)

## Abstract

Metal oxide thin film transistors (MOTFTs) have been extensively investigated in the display industry because of their attractive characteristics, including high performances, low processing temperatures, and simple fabrication. However, under the actual working condition, the characteristics of TFTs are easily affected by the light irradiation caused the negative gate bias stress (NBIS). Therefore, the NBIS stability of MOTFT is a crucial issue that must be solved before their commercialization into an optoelectronic device. In this article, praseodymium-doped indium gallium oxide (PrIGO) is employed as the channel layer of thin film transistor (TFT). The TFTs with Pr doping exhibit a remarkable enhancement in NBIS stability. The structure and chemical composition of PrIGO film are analyzed by X-ray diffraction (XRD) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), respectively. Besides, to further explore the mechanism for the improvement of NBIS stability, the low-frequency noise characteristics of IGO-TFT device and PrIGO-TFT device are studied. According to the low frequency noise characterization and analysis results, the correspondence between the normalized drain current noise power spectral density ( $S_{ID}/I_{DS}^2$ ) and frequency shows  $1/f_f$  ( $\gamma \approx 0.8$ ) low frequency noise behavior for IGO-TFT device and PrIGO-TFT device. In addition, by studying the influences of different channel lengths on the low frequency noise of the IGO-TFT and PrIGO-TFT devices, it can be concluded that the low frequency noise of the device comes mainly from the channel region rather than from the source/drain contact region. In the linear region of the IGO-TFT device and PrIGO-TFT device, according to the linear fitting of the  $S_{ID}/I_{DS}^2$  versus the overdrive voltage ( $V_{GS} - V_{th}$ ), it is proved that the low frequency noise of the IGO-TFT device and the PrIGO-TFT device are mainly affected by the carrier number fluctuation model. Finally, based on the carrier number fluctuation model, the defect state density at the interface between active layer and gate insulating layer is extracted to be  $7.76 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$  and  $9.55 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$  for IGO-TFT and PrIGO-TFT devices, respectively. We speculate that the Pr element can induce defect states in the IGO system, and the trap states induced by Pr ions facilitate the capture of free electrons by positively charged oxygen vacancies, which lead the photo-induced carrier in conduction band to be suppressed.

**Keywords:** indium gallium oxide, thin film transistor, low-frequency noise

**PACS:** 85.30.Tv, 73.50.Dn, 73.40.Qv

**DOI:** 10.7498/aps.70.20210368

\* Project supported by the Key-Area Research and Development Program of Guangdong Province, China (Grant Nos. 2019B010924004, 2019B010934001, 2019B010925001), the Guangdong Provincial International Science & Technology Cooperation Program, China (Grant No. 2018A050506022), and Ji Hua Laboratory Scientific Research Project, China (Grant No. X190221TF191).

† Corresponding author. E-mail: [xuhua@newvision-cn.com](mailto:xuhua@newvision-cn.com)

‡ Corresponding author. E-mail: [psjbpeng@scut.edu.cn](mailto:psjbpeng@scut.edu.cn)