

非晶铟锌氧化物薄膜晶体管的低频噪声特性与分析*

刘远^{1)†} 吴为敬²⁾ 李斌³⁾ 恩云飞¹⁾ 王磊²⁾ 刘玉荣³⁾

1)(工业和信息化部电子第五研究所, 电子元器件可靠性物理及其应用技术国家重点实验室, 广州 510610)

2)(华南理工大学, 发光材料与器件国家重点实验室, 广州 510640)

3)(华南理工大学, 电子与信息学院, 广州 510640)

(2013年11月1日收到; 2014年1月8日收到修改稿)

本文针对底栅结构非晶铟锌氧化物薄膜晶体管的低频噪声特性开展实验与理论研究. 由实验结果可知: 受铟锌氧化物与二氧化硅界面处缺陷态俘获与释放载流子效应的影响, 器件沟道电流噪声功率谱密度随频率的变化遵循 $1/f^\gamma$ ($\gamma \approx 0.75$) 的变化规律; 此外, 器件沟道电流归一化噪声功率谱密度随沟道长度与沟道宽度的增加而减小, 证明器件低频噪声来源于沟道的闪烁噪声, 可忽略源漏结接触及寄生电阻对器件低频噪声的影响. 最后, 基于载流子数涨落及迁移率涨落模型, 提取 γ 因子与平均 Hooge 因子, 为评价材料及器件特性奠定基础.

关键词: 非晶铟锌氧化物, 薄膜晶体管, 低频噪声

PACS: 85.30.Tv, 77.55.hf, 73.50.Dn, 73.40.Qv

DOI: 10.7498/aps.63.098503

1 引言

非晶铟锌氧化物薄膜晶体管 (indium-zinc oxide thin film transistor, IZO TFT) 具有电子迁移率高、开关比大、均匀性好、透光性佳、电学稳定性好等优点, 在平板显示等领域取得广泛应用^[1,2], 其制备和电学性能的研究已成为国内外研究热点.

$1/f$ 噪声 (又称为闪烁噪声) 指半导体器件中功率谱密度与频率成反比的随机涨落现象, 其可敏感地反映半导体材料与器件的潜在缺陷. 基于 $1/f$ 噪声, 可分析界面处陷阱与氧化层陷阱的能量及空间分布, 表征半导体器件在各种外加应力作用下的退化过程. 作为一种非破坏性的可靠性表征方法, $1/f$ 噪声测量已广泛用于 BJT, MOS, GaN, 半导体激光器等器件的评价与筛选中^[3,4].

目前, 国外针对氧化物薄膜晶体管的低频噪声特性及测量方法进行初步研究, 讨论器件结构、制备工艺等对其低频噪声特性的影响^[5,6]; 但 IZO TFT 低频噪声的来源目前仍存在争议, 相关物理模型与参数提取方法亦不完善, 因而有必要对器件低频噪声特性及分析开展深入研究.

本文针对底栅结构 IZO 薄膜晶体管的低频噪声特性开展实验与理论研究, 分析器件低频噪声的来源与物理模型, 研究器件尺寸对其低频噪声特性的影响, 并提取相关器件与材料参数.

2 器件结构与测试系统

2.1 器件结构与参数

本文所用样品为底栅 IZO 薄膜晶体管, 其中有源层厚度为 30 nm, 栅绝缘层包括 50 nm 的二氧

* 国家自然科学基金 (批准号: 61204112, 61204089, 61306099)、中国博士后科学基金 (批准号: 2012M521628) 和中央高校基本科研业务费 (批准号: 2012ZM0003) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: liuyuan@ceprei.com

化硅层和 250 nm 的氮化硅层, 器件宽长比分别为 10/10, 10/20, 10/40, 10/50, 50/10 和 80/10; 薄膜晶体管横截面结构如图 1 所示.

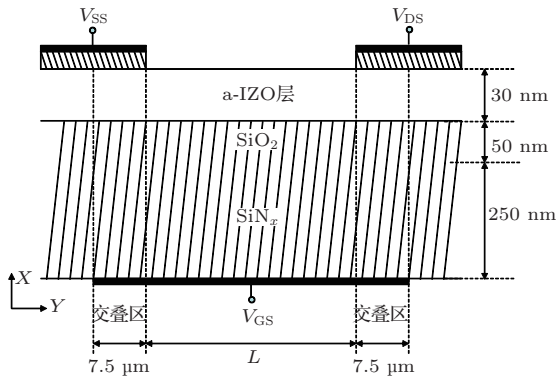


图1 IZO TFT 结构示意图

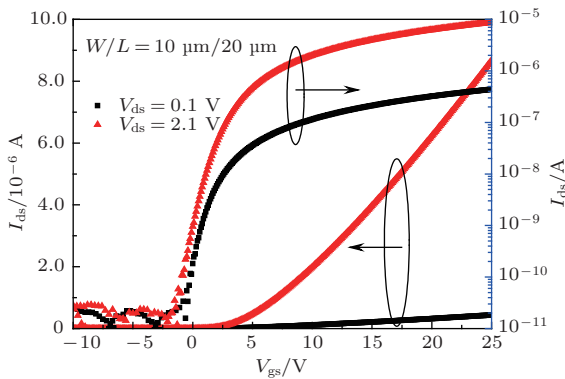


图2 (网刊彩色) IZO TFT 的转移特性曲线

IZO 薄膜晶体管转移特性曲线如图 2 所示. 由

图 2 可知: 器件阈值电压约为 4.7 V, 栅绝缘层电容为 18.2 nF/cm², 载流子有效迁移率约为 14.01 cm²·V⁻¹·s⁻¹, 亚阈斜率约为 1.06 V/dec, 电流开关比约为 10⁵. IZO 薄膜晶体管输出特性曲线如图 3 所示, 由图 3 可知器件饱和特性良好, 在漏源电压较小时无电流拥挤等现象发生.

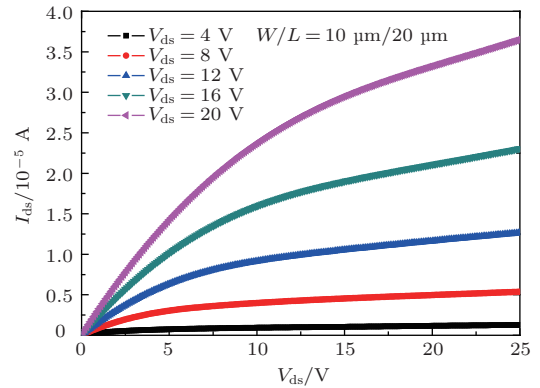


图3 (网刊彩色) IZO TFT 的输出特性曲线

2.2 低频噪声测量系统

功率谱密度 (power spectral density, PSD) 指每单位频率信号所携带的功率, 通常可由信号的频率密度乘于一个系数后求得. 通过测量噪声功率谱密度 (noise power spectral density), 即可描述噪声信号的能量随频率的分布情况; 如白噪声的功率谱密度为一直线; 而低频噪声的功率谱密度则与频率成反比.

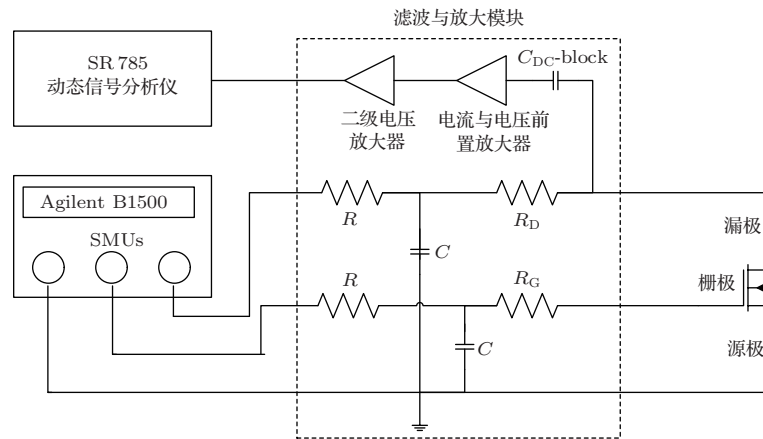


图4 IZO TFT 的低频噪声测量系统 [7]

针对 IZO 薄膜晶体管的低频噪声测量系统如图 4 所示. 系统采用半导体参数测试仪 Agilent B1500 的 SMU 单元监控器件电学参数的变化, 采

用 SR785 频谱分析仪测量器件沟道电流的噪声功率谱密度, 采用 Proplus 9812B 构建噪声测量系统的滤波与低频噪声放大单元 [7]. 在噪声测试过程

中, 所选用 R_G 为 0Ω , R_D 按照器件的偏置条件分别选用 33 及 $100 \text{ k}\Omega$.

3 实验结果与分析

3.1 IZO TFT 的低频噪声特性与影响机理

基于所搭建的低频噪声测量系统, 在栅压 V_{GS} 为 10 V 情况下, 所测得器件沟道电流 I_{DS} 涨落的功率谱密度 S_{ID} 随漏源电压 V_{DS} 的变化如图 5 所示. 由图 5 可知: 在频率较低时 ($f < 20 \text{ Hz}$), S_{ID} 随频率的变化遵循 $1/f$ 的变化规律, 满足经典的 $1/f$ 噪声理论 [8]; 当频率介于 20 Hz 至 3 kHz 时, S_{ID} 随频率的变化遵循 $1/f^\gamma$ 的变化规律, $\gamma \approx 0.75$, 此时沟道电流的随机涨落受 IZO/ SiO_2 界面附近缺陷俘获和释放载流子的影响 [9]; 当频率高于 3 kHz 时, S_{ID} 随频率的变化加剧, 这是受产生-复合效应 (G-R 噪声) 的影响. 此外, 随着器件漏源电压的增加, 沟道电流随之增加, 因而 S_{ID} 将随漏源电压 V_{DS} 增加而增加.

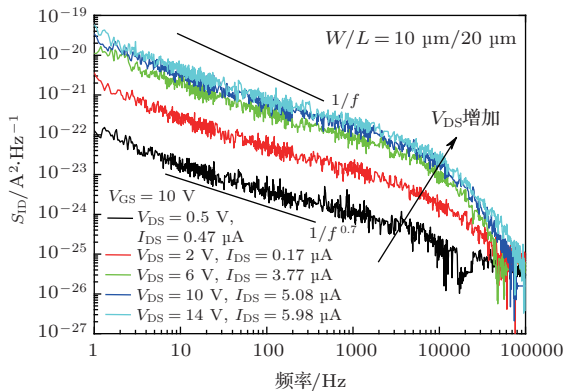


图 5 (网刊彩色) 不同 V_{ds} 下 IZO TFT 的沟道电流噪声功率谱密度 S_{ID}

由 MOSFET 低频噪声的物理模型可知: $1/f$ 噪声主要由载流子数涨落及迁移率涨落机理所引起, 前者主要基于 McWhorter 模型, 而后者则基于 Hooge 经验方程. 当器件工作在线性区时, 若器件低频噪声特性主要受迁移率涨落机理的影响, 则器件沟道电流归一化噪声功率谱密度 S_{ID}/I_D^2 可近似表征为 [10]

$$S_{ID}/I_D^2 = \frac{\alpha_H q}{f W L C_{ox} (V_{gs} - V_{th})}, \quad (1)$$

式中, f 为频率, C_{ox} 为单位面积的栅氧化层电容, α_H 为 Hooge 因子, 其可用于评价不同器件与材料

低频噪声的大小. 若器件低频噪声特性主要受载流子数涨落机理的影响, 则 S_{ID}/I_D^2 可近似表征为 [11]

$$S_{ID}/I_D^2 = \frac{k^* q}{f W L C_{ox}^2 (V_{gs} - V_{th})^2}, \quad (2)$$

式中, k^* 取决于 IZO/ SiO_2 界面附近缺陷俘获和释加载流子的效应.

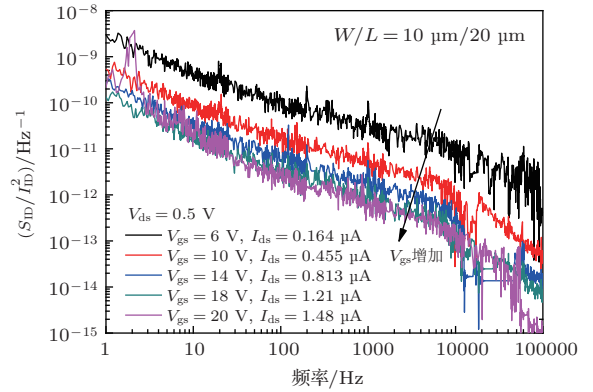


图 6 (网刊彩色) 不同 V_{gs} 下 IZO TFT 的沟道电流噪声功率谱密度 S_{ID}

为研究 IZO 薄膜晶体管低频噪声的来源, 对漏源电压为 0.5 V 时器件沟道电流归一化噪声功率谱密度 S_{ID}/I_D^2 进行测量, 如图 6 所示. 基于图 6, 可提取 S_{ID}/I_D^2 随过驱动电压 ($V_{gs}-V_{th}$) 的变化, 如图 7 所示. 由图 7 可知: S_{ID}/I_D^2 随 $V_{gs}-V_{th}$ 的变化斜率介于 -1.21 至 -1.59 之间, 这说明器件的低频噪声特性同时受到迁移率涨落机理及载流子数涨落机理的影响.

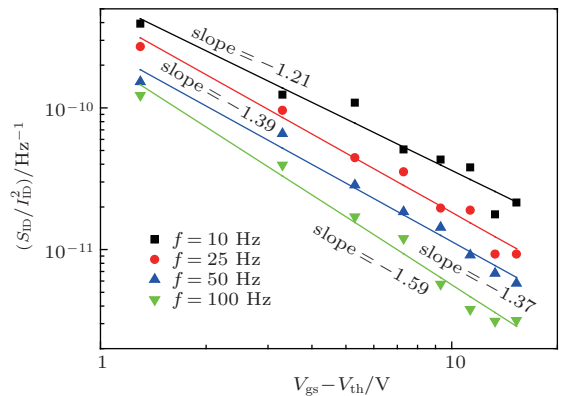


图 7 IZO TFT 中 S_{ID}/I_D^2 随过驱动电压 $V_{gs}-V_{th}$ 的变化

3.2 IZO TFT 的低频噪声参数与提取

3.2.1 IZO TFT 的 γ 因子与缺陷态参数

由图 5 和图 7 可知, 受 IZO/ SiO_2 界面附近缺陷俘获和释放载流子效应的影响 [9], 器件沟道电流

归一化噪声功率谱密度随过驱动电压的变化斜率介于-1.21至-1.59之间,因而沟道电流噪声功率谱密度随频率的变化遵循 $1/f^{0.75}$ 的变化规律,基于此特性可分析器件表面缺陷的数量及其特征温度值.

由文献[12]可知:受IZO/SiO₂界面附近缺陷俘获和释放载流子的影响,器件 S_{ID}/I_D^2 特性可近似表征为

$$S_{ID}/I_D^2 = (g_m/I_D)^2 S_{vfb}, \quad (3)$$

式中, g_m 为器件跨导; S_{vfb} 为平带电压功率谱密度,通常由IZO/SiO₂表面处电荷波动所引起,可描述界面态及氧化层边界陷阱对表面处电荷的影响, S_{vfb} 可表征为[12]

$$S_{vfb} = \frac{S_{vfb0}}{1 - \exp[-(E_C - E_F)/E_0]}, \quad (4)$$

式中,

$$S_{vfb0} = \frac{(qKT)^2 N_t(E_F)}{WLC_{ox}^2} \times \frac{2\pi\tau_0^{1-\gamma}}{E_0 \sin(\gamma\pi/2) (2\pi f)^\gamma}, \quad (5)$$

式中 $N_t(E_F)$ 为缺陷态密度, τ 为时间常数; 由图5可知: S_{vfb} 遵循 $1/f^\gamma$ 的变化规律, 其中 γ 可表征为

$$\gamma = 1 - KT/E_0 = 1 - T/T_C. \quad (6)$$

由于 γ 约等于 0.75, 故从(6)式中即可提取器件界面附近缺陷态的特征温度约为 1200 °C.

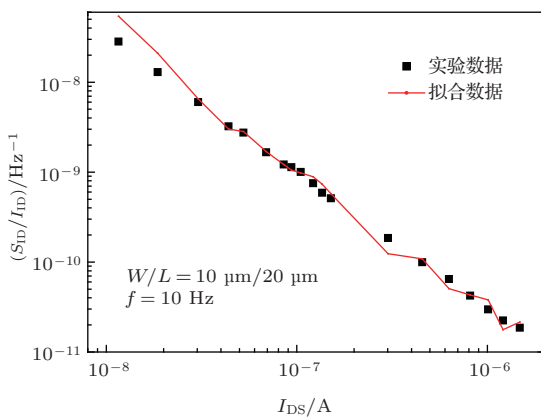


图8 IZO TFT中 S_{ID}/I_D^2 随沟道电流的变化

为提取器件界面附近的缺陷态密度, 必须首先提取器件的平带电压功率谱密度 S_{vfb0} . 基于文献[13]给出的拟合方法, 可提取 S_{vfb0} 约为 3.03×10^{-9}

V^2/Hz , IZO TFT中实验与拟合所得 S_{ID}/I_D^2 随沟道电流的变化如图8所示. 基于(5)式, 可数值求解得到界面处缺陷态密度约为 $8.19 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$.

3.2.2 IZO TFT的平均Hooge因子

基于迁移率涨落模型, 可评估薄膜晶体管及所有源层材料特性的好坏. 由(1)式可知, 器件Hooge因子可近似表征为[10]

$$\alpha_H = S_{ID}/I_D^2 f WLC_{ox} (V_{gs} - V_{th})/q. \quad (7)$$

基于(7)式, 由图6中可估算器件的平均Hooge因子 α_H 约为 1.01×10^{-3} , 如图9所示.

由文献可知: 在MOSFET中, α_H 介于 10^{-6} 至 10^{-4} 之间[14]; 在多晶硅薄膜晶体管中, α_H 约为 10^{-3} 至 10^{-2} [15]; 在非晶硅薄膜晶体管中, α_H 约为 2×10^{-2} 至 10^{-1} [16]; 在有机薄膜晶体管中, α_H 约为 $5-20$ [17]. 由此可知, IZO薄膜晶体管的材料特性较非晶硅、多晶硅和有机薄膜晶体管更好.

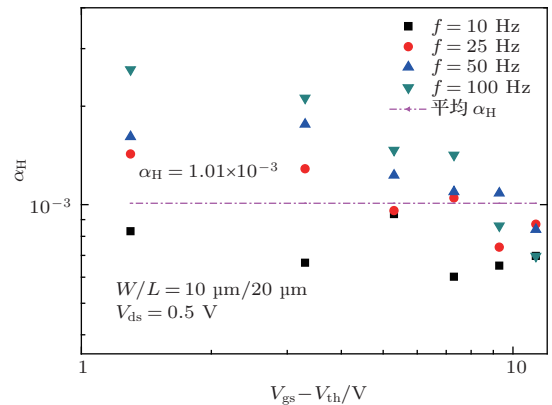


图9 IZO TFT的平均Hooge因子

3.3 沟道长度与宽度对IZO TFT低频噪声特性的影响

由于器件栅-漏/源交叠区长度较大(7.5 μm), 有必要进一步明确IZO TFT低频噪声的来源, 了解源/漏结接触及寄生电阻对器件低频噪声的影响. 在过驱动电压为6.3 V, 漏源电压为1 V情况下, 分别对宽长比分别为10 μm/10 μm, 10 μm/20 μm, 10 μm/50 μm, 50 μm/10 μm, 80 μm/10 μm, 240 μm/10 μm等六种器件低频噪声进行测量, 如图10所示.

若器件低频噪声主要由沟道导通电阻所引起, 而并未受到源/漏结接触的影响, 在迁移率涨

落和载流子涨落两种机理中, 基于(1)式和(2)式, S_{ID}/I_D^2 特性均将随沟道长度 L 与沟道宽度 W 的增加而线性减小.

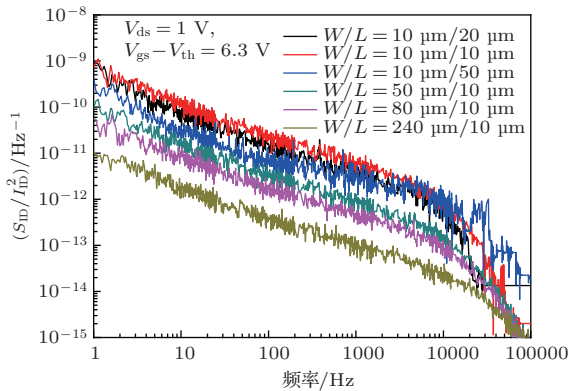


图10 (网刊彩色) 不同尺寸 IZO TFT 中沟道电流归一化噪声功率谱密度

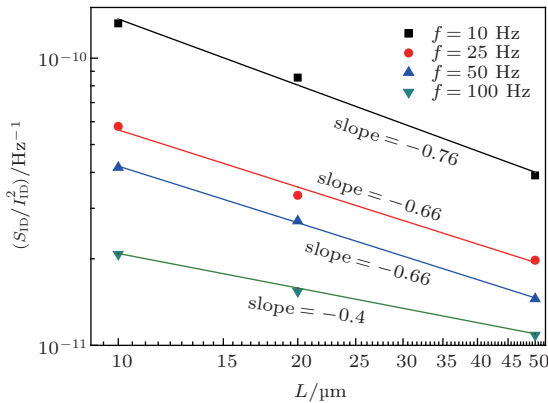


图11 IZO TFT 中 S_{ID}/I_D^2 随沟道长度 L 的变化

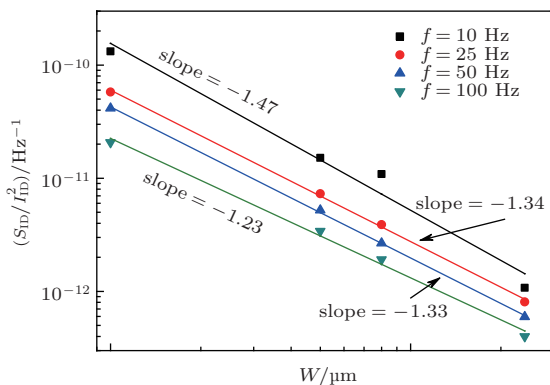


图12 IZO TFT 中 S_{ID}/I_D^2 随沟道长度 W 的变化

在四个固定频率 ($f = 10$ Hz, 25 Hz, 50 Hz 和 100 Hz) 情况下, 可提取不同沟道长度与沟道宽度 IZO TFT 的 S_{ID}/I_D^2 值, 如图 11 和图 12 所示. 由图 11 可知: IZO TFT 的 S_{ID}/I_D^2 值将随沟道长度的

增加而线性减小, 斜率介于 -0.4 至 -0.76 之间, 这主要是受表面处缺陷俘获和释放载流子的影响; 若界面处缺陷俘获和释放载流子的效应可被忽略, 则低频下该斜率将趋向于 -1 . 基于该实验结果, 将明确器件的低频噪声主要来源于器件沟道区的闪烁噪声, 并可忽略源/漏结接触及寄生电阻对器件低频噪声的影响.

由图 12 可知: IZO TFT 的 S_{ID}/I_D^2 值将随沟道宽度的增加而线性减小, 斜率介于 -1.23 至 -1.47 之间, 该结果亦证明器件的低频噪声主要来源于器件沟道区的闪烁噪声, 与相关理论及实验分析结果相符合.

4 结 论

本文对 IZO 薄膜晶体管的低频噪声特性展开实验研究. 由实验结果可知, 受 IZO 与 SiO_2 界面附近缺陷态俘获和释放载流子的影响, 器件低频噪声随频率的变化遵循 $1/f^{0.75}$ 的变化规律, 本文对该结果进行理论解释, 并提取缺陷态的相关参数. 随后, 基于迁移率涨落模型, 提取器件的平均 Hooge 因子, 评估器件的材料及工艺性能, 表明 IZO 薄膜晶体管的材料特性优于非晶硅、多晶硅和有机薄膜晶体管. 最后, 研究沟道长度与沟道宽度对器件低频噪声特性的影响, 可明确器件的低频噪声主要来源于沟道区的闪烁噪声, 源/漏结接触及寄生电阻对器件低频噪声的影响可被忽略.

参考文献

- [1] Lan L, Xiong N, Xiao P, Li M, Xu H, Yao R, Wen S, Peng J 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 242102
- [2] Zhang G M, Guo L Q, Zhao K S, Yan Z H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 137201 (in Chinese)[张耕铭, 郭立强, 赵孔胜, 颜钟惠 2013 物理学报 **62** 137201]
- [3] Huang Y C, Liu D F, Liang J S, Gong H M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2261 (in Chinese)[黄杨程, 刘大福, 梁晋穗等 2005 物理学报 **54** 2261]
- [4] Fung T C, Baek G, Kanicki J 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 074518
- [5] Kim S, Jeon Y, Lee J H, Ahn B D, Park S Y, Park J H, Kim J H, Park J, Kim D M, Kim D H 2010 *IEEE Electron Device Lett.* **31** 1236
- [6] Lee J M, Cheong W S, Hwang C S, Cho I T, Kwon H I, Lee J H 2009 *IEEE Electron Device Lett.* **30** 505
- [7] Choi H S, Jeon S, Kim H, Shin J, Kim C, Chung U I 2011 *IEEE Electron Device Lett.* **32** 1083

- [8] 9812B noise analyzer user's manual. 2008 (ProPlus Design Solutions, Inc.)
- [9] Vandamme L K J, Hooge 2008 *IEEE Trans. Electron Device* **55** 3070
- [10] Dimitriadis C A, Brini J, Lee J I, Farmakis F V, Kamarinos 1999 *J. Appl. Phys.* **85** 3934
- [11] Hooge F N 1994 *IEEE Trans. Electron Device* **41** 1926
- [12] Rigaud D, Valenza M, Rhayem J 2002 *IEE Proc. Circuits Devices Syst.* **149** 75
- [13] Ghibaudo G, Roux O, Nguyen-Duc C, Balestra F, Brini J 1991 *Phys. Status Solidi A* **124** 571
- [14] Ioannidis E G, Tsormpatzoglou A, Tassis D H, Dimitriadis, Templier F, Kamarinos G 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 106103
- [15] Vandamme L K J, Hooge F N 2008 *IEEE Trans. Electron Device* **55** 3070
- [16] Mercha A, Pichon L, Carin R, Mourgues K, Bonnaud O 2001 *Thin Solid Films* **383** 303
- [17] Rhayem J, Rigaud D, Valenza M, Szydlo, Lebrun H 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 1983
- [18] Vandamme L K J, Feyaerts R, Trefan G, Detcheverry C 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 719

Analysis of low-frequency noise in the amorphous indium zinc oxide thin film transistors*

Liu Yuan^{1)†} Wu Wei-Jing²⁾ Li Bin³⁾ En Yun-Fei¹⁾ Wang Lei²⁾ Liu Yu-Rong³⁾

1) (Science and Technology on Reliability Physics and Application of Electronic Component Laboratory, CEPREI, Guangzhou 510610, China)

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

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

(Received 1 November 2013; revised manuscript received 8 January 2014)

Abstract

Properties of low-frequency noise in the amorphous InZnO thin film transistors have been investigated in this paper. Due to the emission and trapping processes of carriers between trapping states located in the interface between the IZO layer and gate insulator, the drain current spectral density shows a $1/f^\gamma$ ($\gamma = 0.75$) low-frequency noise behavior. In addition, the normalized drain current spectral density is decreased linearly with the increase of gate length and width. This property confirms that the low-frequency noise in the IZO TFTs is due to the flicker noise in the channel, the contribution of source/drain contact and parasitic resistances can be ignored. Finally, based on the number fluctuation theory and the mobility fluctuation theory, the γ and average Hooge's parameters have been extracted to estimate the quality of devices and materials.

Keywords: amorphous indium-zinc oxide, thin film transistor, low-frequency noise

PACS: 85.30.Tv, 77.55.hf, 73.50.Dn, 73.40.Qv

DOI: 10.7498/aps.63.098503

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61204112, 61204089, 61306099), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No.2012M521628), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant No. 2012ZM0003).

† Corresponding author. E-mail: liuyuan@ceprei.com