

一个非晶 InGaZnO 薄膜晶体管线性区陷阱态的提取方法

徐飘荣 强蕾 姚若河

A technique for extracting the density of states of the linear region in an amorphous InGaZnO thin film transistor

Xu Piao-Rong Qiang Lei Yao Ruo-He

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 137101 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.137101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.137101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I13>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

应变 Si n 型金属氧化物半导体场效应晶体管电荷模型

[Charge model of strained Si NMOSFET](#)

物理学报.2014, 63(1): 017101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.017101>

应变 Si NMOSFET 漏电流解析模型

[Analytical modeling for drain current of strained Si NMOSFET](#)

物理学报.2013, 62(23): 237103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.237103>

应变 SiGe p 型金属氧化物半导体场效应管栅电容特性研究

[Study on gate capacitance-voltage characteristics of strained-SiGe pMOSFET](#)

物理学报.2013, 62(12): 127102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.127102>

应变 Si NMOSFET 阈值电压集约物理模型

[Physical compact modeling for threshold voltage of strained Si NMOSFET](#)

物理学报.2013, 62(7): 077103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.077103>

亚 100 nm 应变 Si/SiGe nMOSFET 阈值电压二维解析模型

[Two-dimensional threshold voltage model of sub-100 nm strained-Si/SiGe nMOSFET](#)

物理学报.2011, 60(7): 077106 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.077106>

# 一个非晶InGaZnO薄膜晶体管线性区陷阱态的提取方法\*

徐飘荣 强蕾 姚若河†

(华南理工大学电子与信息学院, 广州 510640)

(2014年11月12日收到; 2015年1月29日收到修改稿)

非晶InGaZnO(a-IGZO)薄膜在制备过程中形成的缺陷和弱键以陷阱态的形式非均匀分布在a-IGZO的带隙中, 这些陷阱态会俘获栅压诱导的电荷, 影响a-IGZO薄膜晶体管线性区迁移率、沟道电子浓度等, 进而影响线性区的电学性能. 本文基于线性区沟道迁移率与沟道内的自由电荷与总电荷的比值成正比, 分离出自由电荷以及陷阱态电荷. 由转移特性和电容电压特性得到自由电荷以及陷阱态电荷对表面势的微分, 分离出自由电子浓度和陷阱态浓度. 通过对沟道层与栅绝缘层界面运用泊松方程以及高斯定理, 考虑了沟道表面势与栅压的非均匀性关系, 得出自由电子浓度以及陷阱态浓度与表面势的关系, 最后通过陷阱态浓度与表面势求导得到线性区对应的态密度.

**关键词:** 非晶InGaZnO, 薄膜晶体管, 陷阱态, 迁移率

**PACS:** 71.23.An, 73.20.At, 72.20.Fr

**DOI:** 10.7498/aps.64.137101

## 1 引言

非晶InGaZnO薄膜晶体管(a-IGZO TFT)凭借着较高迁移率、低温下可大面积制备等优点而广泛应用于AMLCD以及AMOLED. 由于制备工艺的影响, 非晶材料内部存在一些缺陷以及弱键、悬挂键. 这些缺陷以陷阱态的形式非均匀分布在非晶材料的带隙中. 与a-Si:H类似<sup>[1-6]</sup>, a-IGZO带隙间也存在着大量的陷阱态. 这些陷阱态会俘获栅压诱导的电荷, 影响a-IGZO TFT线性区迁移率、沟道电子浓度等, 进而影响线性区的电学性能.

a-IGZO TFT线性区态密度的提取可引用MOS结构的场效应特性和电容电压特性, 通过求得陷阱态浓度对表面势求二阶导来获取半导体带隙间的态密度分布<sup>[7]</sup>, 也可直接运用电容电压特性对静电势进行拟合逼近提取a-IGZO TFT的沟

道层态密度<sup>[8]</sup>, 但均没有考虑自由电子浓度对静电势的影响. 然而当a-IGZO TFT工作在线性区时, a-IGZO中的自由电子浓度很大, 甚至可以与陷阱态浓度相比拟, 因此并不能被忽略. Lee等<sup>[9]</sup>考虑了自由电子浓度的影响利用多频电容电压特性提取了a-IGZO TFT沟道层态密度, 但其模型需测试多个频率下的电容电压特性, 计算步骤较多.

本文通过结合转移特性和低频电容电压特性提取线性区的态密度, 利用沟道迁移率与自由电子以及陷阱态的关系, 分离出自由电荷以及陷阱态电荷. 由转移特性和电容电压特性得到自由电荷以及陷阱态电荷对表面势的微分, 分离出自由电子浓度和陷阱态浓度. 通过对沟道层与栅绝缘层界面运用泊松方程以及高斯定理, 考虑沟道表面势与栅压的非均匀性关系, 得出自由电子浓度以及陷阱态浓度与表面势的关系, 最后通过陷阱态浓度与表面势求导得到线性区对应的态密度.

\* 国家自然科学基金(批准号: 61274085)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: pphryao@scut.edu.cn

## 2 模型

a-IGZO TFT 结构简图如图 1, 在 a-IGZO 沟道层与栅绝缘层界面运用泊松方程和高斯定理:

$$\frac{\partial^2 \varphi(x)}{\partial x^2} = -\frac{q}{\varepsilon_S} (n_{\text{free}} + n_{\text{trap}}), \quad (1)$$

$$Q_{\text{induced}} = C_{\text{ox}} (V_{\text{GS}} - V_{\text{FB}} - \varphi_S) \\ = \sqrt{2\varepsilon_S q} \int_{\varphi(x=T_d)}^{\varphi_S} (n_{\text{free}} + n_{\text{trap}}) d\varphi. \quad (2)$$

其中,  $\varphi(x)$  为与栅绝缘层相接触的沟道层表面的静电势,  $x$  为垂直沟道层与栅绝缘层界面指向源漏电极的方向,  $n_{\text{free}}$  是自由电子浓度,  $n_{\text{trap}}$  是陷阱态浓度,  $q$  为电子电荷量,  $\varepsilon_S$  为 IGZO 的介电常数,  $Q_{\text{induced}}$  为栅压诱导的总电荷,  $C_{\text{ox}}$  是栅绝缘层电容,  $V_{\text{GS}}$  为栅源电压 (栅压),  $V_{\text{FB}}$  是平带电压. 如图 1 所示, IGZO 沟道层与栅绝缘层界面 ( $x=0$ ) 处的表面势为  $\varphi_S$ ,  $L$  为沟道长度,  $T_d$  为有源层内耗尽层宽度,  $\varphi(x=T_d) = 0$  V.

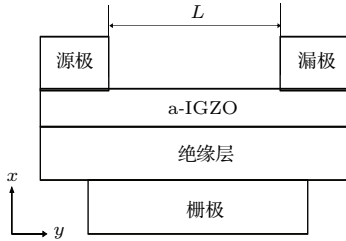


图 1 a-IGZO TFT 结构简图

Fig. 1. Structure illustration of the a-IGZO TFT.

根据静电势与静电场的关系, 自由电荷为

$$Q_{\text{free}} = q \int_x^{T_d} n_{\text{free}} dx \\ = q \int_{\varphi(x=T_d)}^{\varphi(x)} (n_{\text{free}}/E_{\text{igzo}}) d\varphi, \quad (3)$$

陷阱态电荷为

$$Q_{\text{trap}} = q \int_x^{T_d} n_{\text{trap}} dx \\ = q \int_{\varphi(x=T_d)}^{\varphi(x)} (n_{\text{trap}}/E_{\text{igzo}}) d\varphi, \quad (4)$$

其中,  $Q_{\text{free}}$ ,  $Q_{\text{trap}}$  分别为自由电荷和陷阱态电荷,  $E_{\text{igzo}}$  为静电势引起的静电场. 对沟道厚度积分得到沟道层的总电荷. 通过 (3) 和 (4) 式两边对表面势  $\varphi_S$  求导, 得到自由电子浓度与陷阱态浓度的

关系为

$$\frac{n_{\text{free}}}{n_{\text{trap}}} = \frac{dQ_{\text{free}}}{d\varphi_S} \bigg/ \frac{dQ_{\text{trap}}}{d\varphi_S}. \quad (5)$$

根据缺陷限制导电理论, 栅极诱导的电荷一部分被沟道带隙间的陷阱态俘获, 另一部分为沟道内自由移动的电子, 不考虑渗流导电, a-IGZO TFT 的沟道迁移率  $\mu_{\text{CH}}$  满足<sup>[10]</sup>

$$\mu_{\text{CH}} = \mu_0 \frac{Q_{\text{free}}}{Q_{\text{induced}}} = \mu_0 \frac{Q_{\text{free}}}{Q_{\text{trap}} + Q_{\text{free}}}, \quad (6)$$

其中,  $\mu$  是 a-IGZO 的导带迁移率. 通过 (6) 式分离出自由电荷和陷阱态电荷, 可得到如 (7) 和 (8) 式所示的自由电荷与陷阱态电荷与栅极诱导的电荷的关系.

$$Q_{\text{free}} = \frac{\mu_{\text{CH}}}{\mu_0} Q_{\text{induced}}, \quad (7)$$

$$Q_{\text{trap}} = \left(1 - \frac{\mu_{\text{CH}}}{\mu_0}\right) Q_{\text{induced}}. \quad (8)$$

基于 (5) 式所示的自由电子浓度和陷阱态浓度的关系式, 再分别由 (7) 和 (8) 式对表面势求导, 得到

$$\frac{dQ_{\text{free}}}{d\varphi_S} = \frac{1}{\mu_0} \left( \frac{d\mu_{\text{CH}}}{d\varphi_S} Q_{\text{induced}} + \mu_{\text{CH}} \frac{dQ_{\text{induced}}}{d\varphi_S} \right), \quad (9)$$

$$\frac{dQ_{\text{trap}}}{d\varphi_S} = \frac{dQ_{\text{induced}}}{d\varphi_S} - \frac{1}{\mu_0} \left( \frac{d\mu_{\text{CH}}}{d\varphi_S} Q_{\text{induced}} + \mu_{\text{CH}} \frac{dQ_{\text{induced}}}{d\varphi_S} \right). \quad (10)$$

栅压与表面势的关系可以从电容电压特性得到. 因此, 在 (9) 和 (10) 式当中, 可以利用栅压作为中间变量, 栅压诱导电荷对表面势的导数可由 (11) 式得到, 沟道迁移率与表面势的导数可由 (12) 式得到.

$$\frac{dQ_{\text{induced}}}{d\varphi_S} = \frac{dQ_{\text{induced}}}{dV_{\text{GS}}} \cdot \frac{dV_{\text{GS}}}{d\varphi_S}, \quad (11)$$

$$\frac{d\mu_{\text{CH}}}{d\varphi_S} = \frac{d\mu_{\text{CH}}}{dV_{\text{GS}}} \cdot \frac{dV_{\text{GS}}}{d\varphi_S}. \quad (12)$$

不考虑界面电荷, 其中 (11) 式第一项为源漏电极接地时测量的单位面积的栅极电容  $C_g$ , 第二项为高斯定理当中得到的表面势与栅压的关系为

$$\frac{dV_{\text{GS}}}{d\varphi_S} = \frac{C_{\text{ox}}}{C_{\text{ox}} - C_g}. \quad (13)$$

对于 (12) 式的第一项, 可以通过转移特性获取. 由 a-IGZO TFT 的转移特性曲线, 当器件工作

在线性区, 根据线性区电流公式, 沟道迁移率可由下式得到:

$$\mu_{CH} = \frac{L \cdot I_{DS}}{W \cdot V_{DS} \cdot Q_{induced}}, \quad (14)$$

其中,  $W$ ,  $L$  分别为 a-IGZO TFT 的沟道宽度和沟道长度,  $V_{DS}$  为漏源电压,  $I_{DS}$  为漏源电流. 因此, 沟道迁移率对栅压的导数为

$$\frac{d\mu_{CH}}{dV_{GS}} = \frac{L}{W \cdot Q_{induced} \cdot V_{DS}} \cdot \frac{dI_{DS}}{dV_{GS}} - \frac{\mu_{CH}}{Q_{induced}} \cdot \frac{C_g}{W \cdot L}. \quad (15)$$

通过把 (15) 式和 (13) 式代入到 (12) 式, (11) 式和 (12) 式代入到 (9) 式和 (10) 式得到自由电荷与陷阱态电荷对表面势的导数. 再把 (9) 式和 (10) 式代入到 (5) 式, 得到自由电子浓度与陷阱态浓度的关系. 然后把自由电子浓度和陷阱态浓度的关系式 (5) 以及栅压与表面势的关系式 (13) 代入到 (2) 式, 最后得到陷阱态浓度与表面势的关系. 最后通过陷阱态浓度对表面势求导得到态密度  $N$  为

$$N \approx \frac{dn_{trap}}{d\varphi_S}. \quad (16)$$

### 3 结果和分析

为了验证上述模型, 依据文献 [9] 中的实验数据, 通过上述模型提取出线性区的态密度. 文献 [9] 中, Lee 等在室温条件下制备了反交叠底栅结构的 a-IGZO TFT. 沟道的宽度和长度分别为  $20 \mu\text{m}$  和  $5 \mu\text{m}$ . 栅绝缘层  $\text{SiO}_2$  的厚度为  $100 \text{ nm}$ . 有源层 a-IGZO 的厚度为  $70 \text{ nm}$ . 实验测试了 a-IGZO TFT 的转移特性以及频率为  $5 \text{ kHz}$  的电容电压特性. 文献 [9] 采用多个频率进行测试, 测试结果表明:  $5 \text{ kHz}$  测试的电容电压特性与更低频率的电容电压特性基本一致, 并且比较稳定, 没有出现过低频的电容波动以及过高频的电容偏移. 根据文献 [9] 测试的实验结果, 选取的模型参数如表 1. 其中, a-IGZO 的相对介电常数为  $11.5$  [11].

表 1 模型选取的参数

Table 1. Parameters used to calculate the DOS model.

参数	数值
a-IGZO 的相对介电常数 $\epsilon_S$	11.5
栅绝缘层单位面积电容 $C_{ox}/10^{-11} \text{ F}\cdot\text{m}^{-2}$	5.9
平带电压 $V_{FB}/\text{V}$	0
带迁移率 $\mu_0/\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$	12

模型中迁移率 (14) 式在线性区成立, 取  $V_{DS} = 0.1 \text{ V}$  使得 a-IGZO TFT 工作在线性区. 利用文献 [9] 中实验数据, 通过外推法得到阈值电压  $V_{TH}$  为  $0.85 \text{ V}$ . 如图 2 所示, 此时在 a-IGZO 与  $\text{SiO}_2$  的表面积累了一定的电子, 表面能带  $E_{C0}$  向下弯曲至  $E_C$ , 费米能级为  $E_F (V_{GS} = V_{TH})$ . 随着栅压的增大, 越来越多的自由电子聚集在 a-IGZO 与  $\text{SiO}_2$  的表面, 使得能带弯曲程度越大, 费米能级  $E_F$  向导带靠近. 当能带弯曲到  $E'_C$ , 费米能级达到导带,  $E'_F$  与  $E'_C$  重合. 因此, 提取的态密度范围为费米能级的变化区对应的态密度, 也就是  $E_F (V_{GS} = V_{TH})$  到  $E'_C (E'_F)$  之间的态密度. 假设所有填充的陷阱态都在费米能级以下.

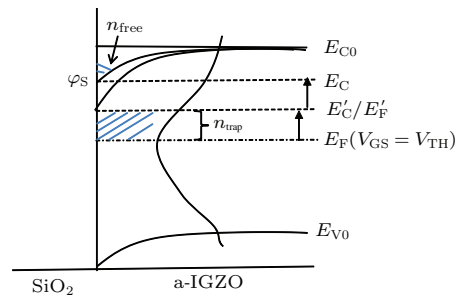


图 2 a-IGZO TFT 能带图

Fig. 2. Energy band diagram of the a-IGZO TFT.

通过电容电压特性由 (13) 式可以得到阈值电压以上的表面势与栅压的非线性关系如图 3 所示, 随着栅压的增大, 表面势非线性增大, 在栅压为  $4 \text{ V}$  时表面势接近平稳, 表明此时费米能级已到达导带底. 当  $V_{GS} = V_{TH}$  时, 表面势为  $0.7 \text{ V}$ . 而  $V_{GS} = 4 \text{ V}$  的情况下表面势趋于定值, 此时 TFT 仍工作在线性区, 费米能级与导带底重合, 表面势约为  $1.1 \text{ V}$ . 因此, 此模型提取的是靠近导带底约  $0.4 \text{ eV}$  的类受主态密度.

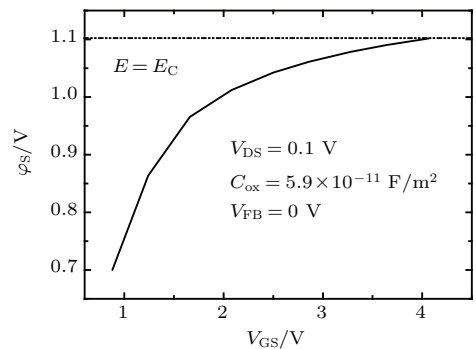


图 3 表面势  $\varphi_S$  与栅压  $V_{GS}$  之间的非线性关系

Fig. 3. The nonlinear relation between  $\varphi_S$  and  $V_{GS}$ .

自由电子浓度和陷阱态浓度与栅压的关系如图4. 随着栅压的增大, 自由电子浓度和陷阱态浓度都增大. 这可以解释为栅压的增大使得导带附近被填充的受主态浓度也越多, 费米能级向导带靠近, 与上述机理一致. 在亚阈值区, 陷阱态浓度大于自由电子的浓度, 而当栅压在阈值电压以上, 自由电子浓度慢慢增大, 直到费米能级快要到达导带底时, 自由电子浓度超过陷阱态浓度.

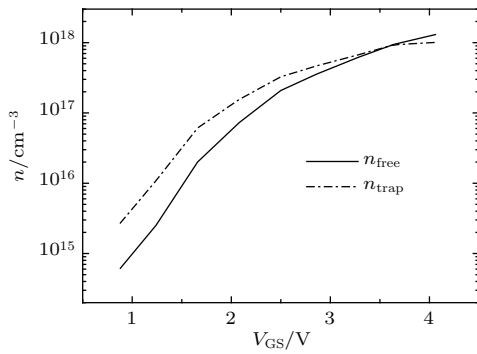


图4 自由电子浓度、陷阱态浓度与栅压的关系  
Fig. 4. The free carrier density ( $n_{\text{free}}$ ) and the trapped carrier density ( $n_{\text{trap}}$ ) as a function of  $V_{\text{GS}}$ .

通过模型提取的线性区态密度与文献[9]的实验结果基本一致, 如图5所示. 由图5可见, 随着  $E - E_C$  越偏离零, 模型提取的态密度与文献[9]得到的态密度偏差越大, 这是由于 TFT 的源漏电极与沟道层接触形成串联电阻  $R_S$ .  $R_S$  与沟道层与源漏电极的势垒高度差等有关. 实验表明,  $R_S$  随着栅压的负向增加而增大[9,12,13]. 由于本文的模型没有考虑  $R_S$  的影响, 因此, 随着栅压负向增大, 即  $E - E_C$  越偏零时, 得到的态密度与文献[9]所得的态密度偏差越大.

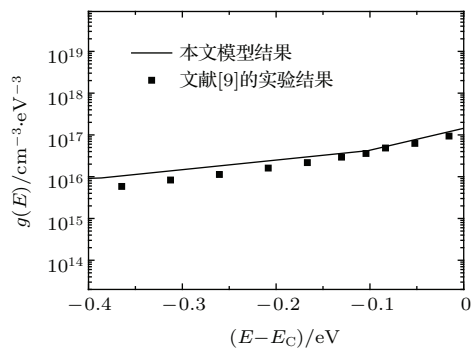


图5 提取的 a-IGZO TFT 的态密度  
Fig. 5. The extracted DOS of the a-IGZO TFT.

文献[9]采用多频电容电压特性法提取非晶 IGZO 薄膜的态密度, 通过将所提取得到的态密度

代入到 TCAD 仿真器件的输出特性和转移特性, 由仿真结果与实验测试到的器件输出特性和转移特性的一致性来验证所提取得到的态密度的准确性. 在文献[9]中, 首先, 用二端 LCR 测量仪测试栅极与源级(源级与漏极互连), 得到并联的总电容和总电阻; 其次, 根据 a-IGZO TFT 的结构对总电容和总电阻的组成成分进行细分, 栅绝缘层可以等效为一个电容, 与 a-IGZO 沟道层以及沟道层与源漏电极的接触电阻串联, 其中, a-IGZO 沟道层看成沟道电阻和电容的并联; 再次, 因为 a-IGZO 沟道层的导电沟道由自由电荷与陷阱态电荷两成分组成, 因此, 工作在积累状态的自由电荷可以看成是一个自由电荷电容, 陷阱态电荷则因为陷阱对自由运动的电子会进行俘获释放看成一个陷阱态电荷电容和电阻的串联; 最后, 测试的总电容就包括栅绝缘层电容、自由电荷电容以及陷阱态电荷电容, 这个电容不会受到器件结构的电阻影响. 通过各个步骤之间建立等式, 解出各个参数. 这种方法比较精确, 但是计算步骤繁多. 相比之下, 本文模型避免了多次电路等效以及多个频率测试下的各种换算, 简单可行的提取了线性区的态密度.

## 4 结 论

在 a-IGZO TFT 中, 基于线性区沟道迁移率与沟道内的自由电荷以及总电荷的经验关系, 分离出自由电荷以及陷阱态电荷. 由转移特性和电容电压特性得到自由电荷以及陷阱态电荷对表面势的微分, 分离出自由电子浓度和陷阱态浓度. 通过对沟道层与栅绝缘层界面运用泊松方程以及高斯定理, 考虑了沟道表面势与栅压的非均匀性关系, 得出自由电子浓度以及陷阱态浓度与表面势的关系, 最后通过陷阱态浓度与表面势求得线性区对应的态密度. 此方法简单易行, 满足一般器件的线性区态密度计算要求.

## 参考文献

- [1] Qiang L, Yao R H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 087303 (in Chinese) [强蕾, 姚若河 2012 物理学报 **61** 087303]
- [2] Hou G F, Geng X H, Zhang X D, Sun J, Zhang J J, Zhao Y 2011 *Chin. Phys. B* **20** 077802
- [3] Qiang L, Yao R H 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 97301



- [4] Huang L, Jin J, Shi W M, Yuan Z J, Yang W G, Cao Z C, Wang L J, Zhou J, Lou Q H 2014 *Chin. Phys. B* **23** 034208
- [5] Qiang L, Yao R H 2013 *Solid-State Electron.* **81** 13
- [6] Chen X X, Yao R H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 237104 (in Chinese) [陈晓雪, 姚若河 2012 物理学报 **61** 237104]
- [7] Suzuki T, Osaka Y, Hirose M 1982 *Jpn. J. Appl. Phys.* **21** L159
- [8] Kimura M, Nakanishi T, Nomura K, Kamiya T, Hosono H 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 133512
- [9] Lee S, Park S, Kim S, Jeon Y, Jeon K, Park J H, Park J, Song I, Kim C J, Park Y, Kim D M, Kim D H 2010 *IEEE Electron Device Lett.* **31** 231
- [10] Park S, Cho E N, Yun I 2013 *IEEE Trans. Electron Devices* **60** 1689
- [11] Zaumseil J, Baldwin K W, Rogers J A 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 6117
- [12] Park J, Kim C, Kim S, Song I, Kim S, Kang D, Lim H, Yin H, Jung R, Lee E, Lee J, Kwon K-W, Park Y 2008 *IEEE Electron Device Lett.* **29** 879
- [13] Hur I, Bae H, Kim W, Kim J, Jeong H K, Jo C, Jun S, Lee J, Kim Y H, Kim D H, Kim D M 2013 *IEEE Electron Device Lett.* **34** 250

## A technique for extracting the density of states of the linear region in an amorphous InGaZnO thin film transistor\*

Xu Piao-Rong Qiang Lei Yao Ruo-He<sup>†</sup>

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

( Received 12 November 2014; revised manuscript received 29 January 2015 )

### Abstract

Defects and weak bonds generated in the fabricating process of amorphous InGaZnO(a-IGZO) films distribute non-uniformly in the band gap of the a-IGZO film in the form of traps. These traps would capture the charges induced by gate voltage, and affect the linear region mobility, channel carrier density and so on, then the electrical properties in the linear region of a-IGZO thin film transistor. The model used is based on the mobility in linear region which is in direct proportion to the ratio of the free charge to the total induced charge in the channel, and then the free charge and the trapped charge are separated. From the ratio of the density of free carriers to that of the trapped, a direct relationship with the derivative of the free charge with respect to surface potential, and the derivative of the trapped charge with respect to surface potential is calculated by bringing in the gate voltage that serves as an intermediate variable between the linear region mobility and the total induced charge. In this way, the free carrier density and the trapped carrier density can be separated by using the transfer characteristic and capacitor-voltage characteristic. Poisson's equation and Gauss theorem are applied to the interface between the channel layer and the insulating layer. In consideration of the non-uniform characteristic between the surface potential and the gate voltage, the relationship between the free carrier density and the surface potential, the trapped carrier density and the surface potential are obtained. Finally, the density of states in the linear region could be gained by differentiating the trapped carrier density with respect to surface potential.

**Keywords:** amorphous InGaZnO, thin film transistor, density of states, mobility

**PACS:** 71.23.An, 73.20.At, 72.20.Fr

**DOI:** 10.7498/aps.64.137101

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61274085).

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