

基于表面势的氢化非晶硅薄膜晶体管直流特性研究*

陈晓雪 姚若河†

(华南理工大学电子与信息学院, 广州 510640)

(2012年1月8日收到; 2012年7月1日收到修改稿)

基于表面势模型, 在同时考虑深能态和带尾态分布下, 采用简化的费米-狄拉克函数计算得到统一的定域态模型, 并利用有效特征温度的概念, 推导出 a-Si:H TFT 统一的电流-电压 (I - V) 模型. 该模型可不分区地描述包括亚阈值区、线性区以及饱和区等 a-Si:H TFT 的所有工作区域. 与实验得到的 I - V 特性进行比较表明, 本模型能够准确地描述 a-Si:H TFT 的各个工作区的电流电压特性.

关键词: 非晶硅, 表面势, 薄膜晶体管, 有效特征温度

PACS: 71.23.Cq, 73.40.Cg, 85.30.Tv, 97.10.Ri

1 引言

非晶硅薄膜晶体管 (hydrogenated amorphous silicon thin film transistor, 简记为 a-Si:H TFT) 广泛应用于大型的有源矩阵图像显示系统^[1] 以及液晶显示中^[2]. 在现有的电学研究中, 研究者提出了基于器件物理的 a-Si:H TFT 直流模型研究主要分为两类: 一类是基于阈值电压的分区模型研究, 另一类是基于表面势的解析模型研究.

基于阈值电压的分区模型^[3-5] 认为, 当外加栅压大于阈值电压时, 表面势为一定值; 当外加栅压小于阈值电压时, 表面势与栅压之间呈线性变化关系. 在这些分区模型中, 各个区的漏电流方程之间需要使用光滑函数连接, 增加了电路仿真耗费的时间, 降低了仿真速度, 而且不能准确描述各个工作区之间的过渡状态.

基于表面势的解析模型中^[6], 可以通过求解表面势来得到沟道中产生的电荷总数以及自由载流子数量, 从而得到电流电压模型. 在文献 [4, 7] 中, 通过在开启区只考虑带尾态和在亚阈值区只考虑深能态的分布得到电流电压模型, 其存在的缺点是在这两个工作区内都低估了定域态的浓度, 从而隐性地高估了自由电子的浓度, 最终使得电流值高估,

与实际的物理模型偏离较大.

由于定域态的分布在很大程度上影响着器件的工作特性, 本文通过在泊松方程中同时考虑深能态和带尾态浓度, 并采用费米-狄拉克统计分布函数以及有效特征温度和有效电压的方法, 建立了基于表面势的 a-Si:H TFT 统一直流模型. 该模型只需一个电流电压 (I - V) 表达式就能描述 a-Si:H TFT 所有的工作区域, 包括亚阈值区、线性区以及饱和区. 为了验证模型的正确性, 与实验得到的 I - V 特性进行了比较, 结果证明本论文所提出的模型可以准确地解释 a-Si:H TFT 的各个工作区的电流电压特性.

2 电流电压的统一模型

本文采用的是应用最广的 n 沟道, 反交叠底栅型 a-Si:H TFT. 同时考虑受主定域态带尾态和深能态两部分, 其分布函数为^[4,8,9]

$$g(E) = g_d \exp\left(\frac{E - E_c}{kT_d}\right) + g_t \exp\left(\frac{E - E_c}{kT_t}\right), \quad (1)$$

其中 g_d , g_t 分别为深能态和带尾态在导带尾处的有效态密度, T_d , T_t 则为深能态和带尾态的特征温度.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61274085) 资助的课题.

† E-mail: phrhyao@scut.edu.cn

a-Si : H TFT 的定域态密度表示为^[9]

$$n_{\text{loc}} = \int_{E_v}^{E_c} g(E)f(E)dE, \quad (2)$$

其中, $f(E)$ 采用费米-狄拉克, 其分布为^[10]

$$f(E) = 1 - \exp\left(\frac{E - E_{\text{fn}}}{kT}\right), \quad (3)$$

$$E_v < E < E_{\text{fn}},$$

$$f(E) = \exp\left(-\frac{E - E_{\text{fn}}}{kT}\right), \quad (4)$$

$$E_{\text{fn}} \leq E < E_c,$$

E_c , E_v , E_{fn} 分别为导带能级、价带能级和准费米能级, k 为玻尔兹曼常数.

结合 (2), (3) 和 (4) 式, 并根据图 1 中的变化关系 $E_{\text{fn}} - E_c = q\varphi - qV_{\text{ch}} - E_{\text{f0}}$ 积分得到定域态密度为

$$\begin{aligned} n_{\text{loc}} &= \left(g_d \frac{kT_d}{q} - \frac{g_d}{q \left(\frac{1}{kT} + \frac{1}{kT_d} \right)} + \frac{g_d}{q \left(\frac{1}{kT} - \frac{1}{kT_d} \right)} \right) \\ &\times \exp\left(\frac{q\varphi - qV_{\text{ch}} - E_{\text{f0}}}{kT_d}\right) \\ &+ \left(g_t \frac{kT_t}{q} - \frac{g_t}{q \left(\frac{1}{kT} + \frac{1}{kT_t} \right)} - \frac{g_t}{q \left(\frac{1}{kT_t} - \frac{1}{kT} \right)} \right) \\ &\times \exp\left(\frac{q\varphi - qV_{\text{ch}} - E_{\text{f0}}}{kT_t}\right) \\ &+ \left(\frac{g_t}{q \left(\frac{1}{kT_t} - \frac{1}{kT} \right)} - \frac{g_d}{q \left(\frac{1}{kT} - \frac{1}{kT_d} \right)} \right) \\ &\times \exp\left(\frac{q\varphi - qV_{\text{ch}} - E_{\text{f0}}}{kT}\right), \quad (5) \end{aligned}$$

其中, V_{ch} 为沟道电势.

沟道中的自由载流子密度表示为

$$n_{\text{free}} = N_c \exp\left(\frac{q\varphi - qV_{\text{ch}} - E_{\text{f0}}}{kT}\right), \quad (6)$$

其中, $E_{\text{f0}} = E_c - E_{\text{f-bulk}}$, $E_{\text{f-bulk}}$ 为本征费米能

级, 如图 1 所示.

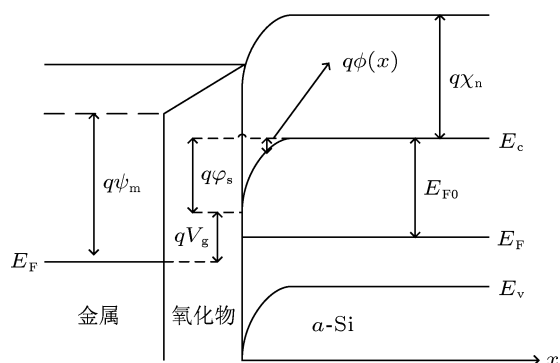


图 1 a-Si : H TFT 能带结构图

当器件工作在正向亚阈值区和开启区时, 表面势均为正值. 对于有源层较厚的 a-Si : H TFT 器件体内能带弯曲量逐渐趋向于零^[3,4].

一维泊松方程如下

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{dE}{dx} = \frac{q}{\varepsilon}(n_{\text{loc}} + n_{\text{free}}), \quad (7)$$

边界条件为

$$\text{当 } x = 0 \text{ 时, } \varphi = \varphi_s, \quad \frac{d\varphi}{dx} = -E_{\text{a-si}}, \quad (8)$$

$$\text{当 } x = x_d \text{ 时, } \varphi = 0, \quad \frac{d\varphi}{dx} = 0. \quad (9)$$

结合 (7), (8) 和 (9) 式求得电场如下:

$$\begin{aligned} E(\varphi) &= \left[\frac{2}{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{a-si}}} \left(kT_d n_D \exp\left(\frac{q\varphi - qV_{\text{ch}} - E_{\text{f0}}}{kT_d}\right) \right. \right. \\ &+ kT_t n_T \exp\left(\frac{q\varphi - qV_{\text{ch}} - E_{\text{f0}}}{kT_t}\right) \\ &\left. \left. + kT n_F \exp\left(\frac{q\varphi - qV_{\text{ch}} - E_{\text{f0}}}{kT}\right) \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (10) \end{aligned}$$

其中

$$n_D = g_d \frac{kT_d}{q} - \frac{g_d}{q \left(\frac{1}{kT} + \frac{1}{kT_d} \right)} + \frac{g_d}{q \left(\frac{1}{kT} - \frac{1}{kT_d} \right)}, \quad (11)$$

$$n_T = g_t \frac{kT_t}{q} - \frac{g_t}{q \left(\frac{1}{kT_t} + \frac{1}{kT} \right)} - \frac{g_t}{q \left(\frac{1}{kT_t} - \frac{1}{kT} \right)}, \quad (12)$$

$$n_F = g_d \frac{1}{q \left(\frac{1}{kT_d} - \frac{1}{kT} \right)} + g_t \frac{1}{q \left(\frac{1}{kT_t} - \frac{1}{kT} \right)}. \quad (13)$$

a-Si 积累层中的自由电子浓度表示为

$$N_{\text{free}} = \int_0^t N_c \exp\left(\frac{q\varphi - E_{f0}}{kT}\right) dx, \quad (14)$$

其中, x 表示垂直沟道的方向, 如图 1 所示, $x = 0$ 代表栅绝缘层与 a-Si 层界面处, $x = t$ 代表能带弯曲尾部.

利用转换关系 $dx = -\frac{d\varphi}{E(\varphi)}$ 代入 (14) 式, 得到关于表面势的积分为

$$N_{\text{free}} = \int_{\varphi(t)}^{\varphi_s} \frac{N_c \exp\left(\frac{q\varphi - E_{f0}}{kT}\right)}{E(\varphi)} d\varphi. \quad (15)$$

为了求解方程 (15), 本文利用本征非晶硅中平带处的有效电场 E_{eff} , 有效特征温度 T_{eff} 概念, 得到自由电子浓度的表达式如 (16) 式所示

$$N_{\text{free}} = \frac{N_c}{qE_{\text{eff}}} \frac{kT_{\text{eff}}}{kT_{\text{eff}} - kT} \times \exp\left((q\varphi_s - E_{f0}) \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{eff}}}\right)\right), \quad (16)$$

其中, $E_{\text{eff}}, T_{\text{eff}}$ 分别为

$$E_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{a-si}}} (kT_d n_D + kT_i n_T + kT n_F)}, \quad (17)$$

$$T_{\text{eff}} = \frac{q\varphi - qV_{\text{ch}} - E_{f0}}{k \log\left(\frac{E(\varphi)}{E_{\text{eff}}}\right)}. \quad (18)$$

有效特征温度 T_{eff} 反映了带尾态特征温度同深能态特征温度以及环境温度的关系, 且为表面势的函数. 图 2 给出了有效特征温度与表面势的变化关系, 模型中的表面势由 (19) 式求得. 从图中可以看出, 随着表面势的增加, 有效特征温度逐渐减小, 最后趋于不变. 这可以解释为^[11]: 当栅压很小时, 费米能级位于深能态内, 进入深能态中的感生电荷量远远大于进入带尾态中以及进入导带中的感生电荷量, 此时深能态起主要作用, 由于深能态的特征温度较高, 所以体现出来的有效特征温度较高; 随着栅压增加, 表面势增加, 费米能级进入带尾, 此时带尾态起主要作用, 由于带尾态的特征温度较深能态要小很多, 所以体现出来的有效特征温度变小. 对于图中有效特征温度趋于不变区域, 可解释为带尾态和深能态都被填满后, 大量电子进入导带, 自由电子占主导, 在外加温度不变的情况下, 有效特征温度与表面势基本无关. 可知有效特征温度综合体现了深能态、带尾态、自由电子随外加栅压的

变化关系, 且不需要分开去讨论带尾态和深能态.

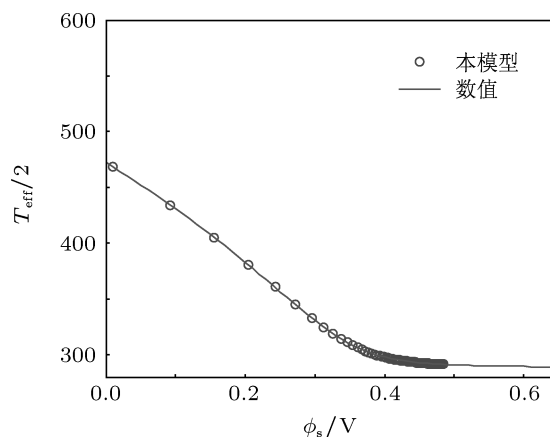


图 2 有效特征温度与表面势的变化关系

根据高斯定理, 并结合 (16)—(18) 式有

$$V_{\text{gs}} - V_{\text{fb}} - \varphi_s = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{a-si}}}{C_{\text{ox}}} E_{\text{eff}} \times \exp\left(\frac{q\varphi_s - qV_{\text{ch}} - E_{f0}}{kT_{\text{eff}}}\right). \quad (19)$$

由 (19) 式可迭代求得的表面势与文献 [12] 中求得表面势进行了对比, 如图 3 所示, 可见有效特征温度求得表面势的准确性.

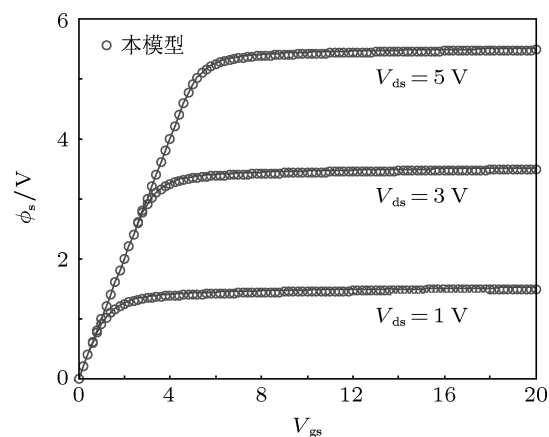


图 3 表面势与栅压的变化关系曲线

应用逐次沟道近似^[12]得到电流方程为

$$I_{\text{ds}} = -\mu_0 W Q_{\text{free}} \frac{dV_{\text{ch}}}{dy} = -\mu_0 W Q_{\text{free}} \frac{dV_{\text{ch}}}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dy}, \quad (20)$$

在方程 (19) 两边对 φ 进行求导可得

$$-C_{\text{ox}} = \varepsilon_0 \varepsilon_{\text{a-si}} E_{\text{eff}} \exp\left(\frac{q\varphi_s - qV_{\text{ch}} - E_{f0}}{kT_{\text{eff}}}\right)$$

$$\times \left(\frac{q}{kT_{\text{eff}}} \right) \left(1 - \frac{dV_{\text{ch}}}{d\varphi} \right), \quad (21)$$

定义 $V_{\text{teff}} = \frac{kT_{\text{eff}}}{q}$ 为有效电压. (21) 式变形得

$$\begin{aligned} \frac{dV_{\text{ch}}}{d\varphi} &= \frac{C_{\text{ox}}V_{\text{teff}}}{\varepsilon_0\varepsilon_{\text{a-si}}E_{\text{eff}}} \\ &\times \exp\left(-\frac{q\varphi_{\text{s}} - qV_{\text{ch}} - E_{\text{f0}}}{kT_{\text{eff}}}\right) + 1 \\ &= \frac{C_{\text{ox}}V_{\text{teff}}}{Q_i} + 1. \end{aligned} \quad (22)$$

又

$$\begin{aligned} Q_{\text{free}} &= qN_{\text{free}} \\ &\approx \frac{N_{\text{c}}}{qE_{\text{eff}}} \frac{kT_{\text{eff}}}{kT_{\text{eff}} - kT} Q_i \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T} - 1 \right) \\ &\times \left(\frac{1}{\varepsilon_0\varepsilon_{\text{a-si}}E_{\text{eff}}} \right) \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T} - 1 \right). \end{aligned} \quad (23)$$

结合 (20)—(23) 式, 并从 φ_{ss} 到 φ_{sd} 进行积分得

$$\begin{aligned} I_{\text{ds}} &= \frac{\mu_0 W}{L} \frac{N_{\text{c}}}{E_{\text{eff}}} \frac{kT_{\text{eff}}}{kT_{\text{eff}} - kT} \\ &\times \left(\frac{1}{\varepsilon_0\varepsilon_{\text{a-si}}E_{\text{eff}}} \right) \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T} - 1 \right) C_{\text{ox}} \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T} - 1 \right) \\ &\times \left(\frac{V_{\text{teff}}T}{T_{\text{eff}} - T} \left((\Delta\varphi_{\text{ss}}) \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T} - 1 \right) \right. \right. \\ &\left. \left. - (\Delta\varphi_{\text{sd}}) \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T} - 1 \right) \right) \right) \\ &+ \frac{T_{\text{eff}}}{T} \left((\Delta\varphi_{\text{ss}}) \frac{T_{\text{eff}}}{T} - (\Delta\varphi_{\text{sd}}) \frac{T_{\text{eff}}}{T} \right), \end{aligned} \quad (24)$$

其中

$$\Delta\varphi_{\text{ss}} = V_{\text{gs}} - V_{\text{fb}} - \varphi_{\text{ss}}, \quad (25)$$

$$\Delta\varphi_{\text{sd}} = V_{\text{gs}} - V_{\text{fb}} - \varphi_{\text{sd}}, \quad (26)$$

φ_{ss} , φ_{sd} 分别是源端和漏端的表面势, 可由 (19) 式求得.

由此, 便得到了本论文的电流电压统一模型.

3 模型与实验数据的对比

为了验证本模型的正确性, 把它同实验数据进行了对比, 本文采用的是沟道长度为 $8 \mu\text{m}$ 以及沟道宽度采用的是 $80 \mu\text{m}$ 的 TFT. 实验数据采用的是文献 [13] 中的数据. 各个参数值详见表 1.

图 4 给出了本模型得到的转移特性曲线, 图 4(a) 表示的是漏电流与栅电压在不同漏电压下

的变化关系, 从图中的变化曲线中可以观察到, 在漏电压不变的情况下, 漏电流随着栅电压的增加而增加, 这是因为自由载流子随栅电压变化, 栅压增

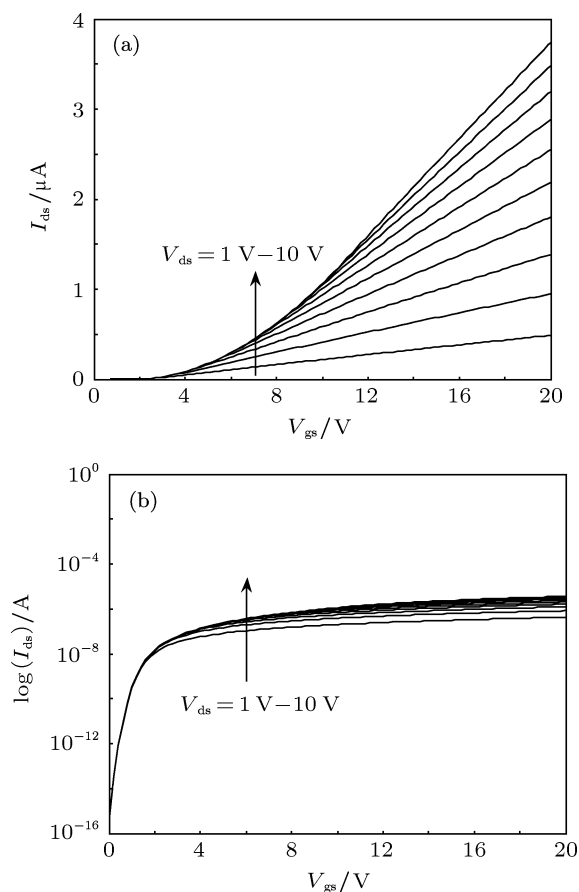


图 4 a-Si H TFT 的转移特性曲线 (a) $I_{\text{ds}}-V_{\text{gs}}$ 变化关系曲线; (b) $V_{\text{gs}}-\log(I_{\text{ds}})$ 变化关系曲线

表 1 本论文中用到的实验数据 [13]

参数名	标记符号	参数值	单位
能带迁移率	μ_0	17	$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}^{-1}$
沟道长度	L	8	μm
沟道宽度	W	80	μm
导带底处深能态密度	g_{d}	8×10^{18}	$\text{cm}^3 \cdot \text{eV}^{-1}$
导带底处带尾态密度	g_{t}	2.2×10^{22}	$\text{cm}^3 \cdot \text{eV}^{-1}$
深能态特征温度	T_{d}	997	K
带尾态特征温度	T_{t}	278	K
本征层费米能级	E_{f0}	0.65	eV
a-Si 层厚度	T_{i}	50	μm
绝缘层厚度	T_{ox}	300	μm
a-Si 相对介电常数	$\varepsilon_{\text{a-si}}$	11.9	—
绝缘层介电常数	ε_{ox}	6×10^{-11}	F/m
真空介电常数	ε_0	8.854×10^{12}	F/m
平带电压	V_{fb}	0.7	V
a-Si 禁带宽度	E_{g}	1.72	eV
沟道长度调制参数	λ	0.011	1/V

大, 进入导带的自由载流子增多, 从而漏电流增大. 还可以看到, 当漏电压增加一定值后, 漏电流随漏电压的变化并不明显, 这是因为电流已经趋于饱和. 图 4(b) 中给出的是栅压同电流对数的变化关系, 同样可以观察到饱和现象.

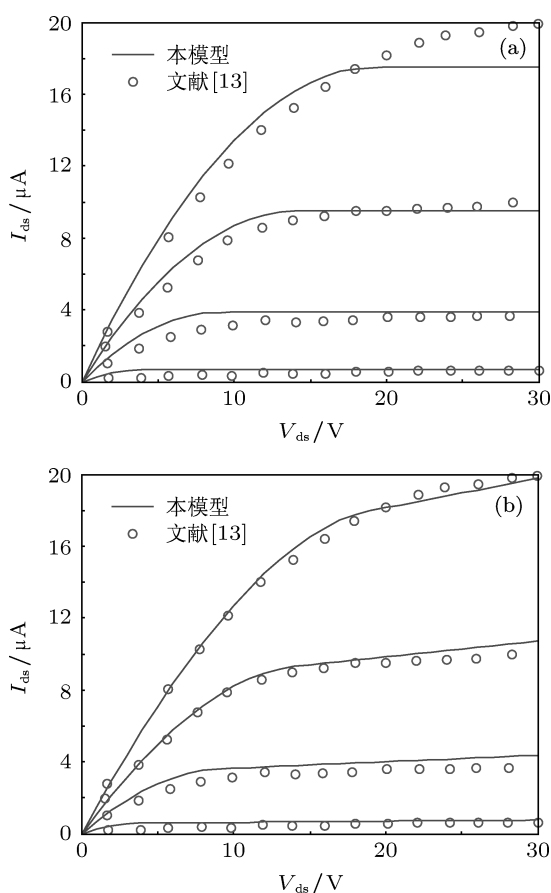


图 5 I - V 输出特性曲线 (a) 调制前的输出特性曲线与文献 [13] 数据的对比; (b) 调制后的输出特性曲线与文献 [13] 数据的对比

图 5(a) 是由 (24) 式得出的 I - V 输出特性曲线, 可以看到, 在饱和区实验数据与模型有一定的偏离,

这是因为在短沟道器件中存在沟道长度调制 (channel length modulate, 简记为 CLM) 效应, 考虑沟道长度调制效应后, (24) 式修正为

$$I_{ds} = \frac{\mu_0 W N_c}{L E_{eff}} \frac{kT k T_{eff}}{kT_{eff} - kT} \times \left(\frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_{a-si} E_{eff}} \right)^{\left(\frac{T_{eff}}{T} - 1 \right)} C_{ox}^{\left(\frac{T_{eff}}{T} - 1 \right)} \times \left(\frac{V_{teff} T}{T_{eff} - T} \left((\Delta\varphi_{ss})^{\left(\frac{T_{eff}}{T} - 1 \right)} - (\Delta\varphi_{sd})^{\left(\frac{T_{eff}}{T} - 1 \right)} \right) + \frac{T_{eff}}{T} \left((\Delta\varphi_{ss})^{\frac{T_{eff}}{T}} - (\Delta\varphi_{sd})^{\frac{T_{eff}}{T}} \right) \right) \times (1 + \lambda V_{ds}). \quad (27)$$

由 (27) 式得到的电流电压特性曲线如图 5(b) 所示, 曲线与实验数据符合良好. 从图中可以观察到所有的正向工作区包括亚阈值区、线性区以及饱和区. 至此, 通过唯一的电流电压模型对 a-Si:H TFT 的所有正向工作区域进行了正确的描述.

4 结论

本文通过在泊松方程中同时考虑深能态和带尾态浓度, 并采用费米-狄拉克统计分布函数以及有效特征温度和有效电压的方法, 建立得到了基于表面势的 a-Si:H TFT 统一直流模型. 该模型只需要通过单一的 I - V 表达式就能描述 a-Si:H TFT 所有的正向工作区域, 包括亚阈值区、线性区以及饱和区. 经过与实验得到的 I - V 特性比较, 验证了本模型的准确性.

[1] Rahn J T, Lemmi F, Lu J P, Mei P, Apte R B, Street R A 1999 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **46** 457
 [2] Ibaraki N 1994 *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* **336** 749
 [3] Shur M, Hack M 1984 *J. Appl. Phys.* **55** 3831
 [4] Leroux T 1986 *Solid-State Electronics* **29** 47
 [5] Chung K Y, Neudeck G W 1987 *J. Appl. Phys.* **62** 4617
 [6] Colalongo L 2001 *Solid-State Electronics* **45** 1525
 [7] Khakzar K, Luder E H 1992 *IEEE Trans. Electron Devices* **39** 1428

[8] Valdinoci M, Gnudi A, Rudan M, Fortunato G 1994 *Numerical Modeling of Processes and Devices for Integrated Circuits International Workshop on Honolulu, HI, USA, June 5-6 1994* p19
 [9] Shaw J G, Hack M 1988 *J. Appl. Phys.* **64** 4562
 [10] Chen S S, Kuo J B 1994 *IEEE Trans. Electron Devices* **41** 1169
 [11] Shur M, Hack M, Shaw J G 1989 *J. Appl. Phys.* **66** 3372
 [12] Liu Y, Yao R H, Li B, Deng W L 2008 *J. Dis. Tech.* **4** 180
 [13] Hafdi Z, Aida M S 2005 *Jpn. J. Appl. Phys.* **44** 1192

DC characteristic research based on surface potential for a-Si : H thin-film transistor*

Chen Xiao-Xue Yao Ruo-He[†]

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

(Received 8 January 2012; revised manuscript received 1 July 2012)

Abstract

In this paper, based on the surface potential model, taking into account both the deep and tail state distributions simultaneously, and using the simplified Fermi-Dirac function, a unified local-state model is obtained. Using the effective characteristic temperature, the unified current-voltage (I - V) model for a-Si : H thin-film transistor a-Si : H TFT is developed. This model can describes all operating regions including subthreshold region, linear area and saturated zone through a single equation. By comparison with the experimental data, it is shown that this model can accurately describe the current voltage characteristic of the a-Si : H TFT.

Keywords: a-Si, surface potential, TFT, effective characteristic temperature

PACS: 71.23.Cq, 73.40.Cg, 85.30.Tv, 97.10.Ri

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

[†] E-mail: phrhyao@scut.edu.cn