

MOSFET 热载流子退化/寿命 模型参数提取*

杨谟华 于 奇 王向展 陈 勇 刘玉奎 肖 兵 杨沛锋 方 朋

(电子科技大学微电子科学与工程系 成都 610054)

孔学东 谭超元 钟征宇

(广州可靠性技术研究所 广州 510610)

摘要 基于 MOSFET 热载流子可靠性物理,并结合电应力条件下热载流子退化特征量 $\Delta I_{ds}/I_{ds0}$ 、 I_{sub} 等实测数据的拟合处理,发展了可表征退化物理意义的衬底电流与退化/寿命参数提取模型;进而由自动测试 ATE 与 CAD 技术相结合的监测系统,实现了载流子速度饱和和临界电场 E_{crit} 、有效导电长度 L_c 和寿命因子 H 、 m 、 n 提取.实验研究结果表明,模型及提取参数合理可信,并可进一步应用于 MOSFET 及其电路的退化/寿命模拟预测.

关键词: 模型参数,热载流子,退化/寿命, MOSFET

PACC: 7220, 7220H, 7220J, 7280C

文章编号: 0253-4177(2000)03-0268-06

Model Parameter Extraction for MOSFETs Hot Carrier Degradation/Age*

YANG Mo-hua, YU Qi, WANG Xiang-zhan, CHEN Yong, LIU Yu-kui,
XIAO Bing, YANG Pei-feng and FANG Peng

(Department of Microelectronics Science and Engineering, UESTC of China, Chengdu 610054, China)

KONG Xue-dong, TAN Chao-yuan and ZHONG Zheng-yu

(Institute of Reliability Technology, Guangzhou 510610, China)

Received 6 November 1998, revised manuscript received 5 February 1999

* 国家自然科学基金(编号: 69576004)和国防预研(基金)资助项目[Project Supported by National Natural Science Foundation of China Under Grant No. 69576004 and by Advanced Research Foundation for National Defence of China].

杨谟华 教授,目前主要从事 VLSI/ASIC 新技术及其可靠性技术和 SiGe/Si 能带工程领域研究.

孔学东 高工,目前主要从事 VLSI 可靠性物理、模拟和综合评估技术研究.

于 奇 讲师,主要从事 VLSI 电路设计及其可靠性物理与技术研究.

1998-11-06 收到,1999-02-05 定稿

Abstract In the light of both MOSFETs hot carrier reliability physics and fitting handling of their characteristics parameters $\Delta I_{ds}/I_{ds0}$, I_{sub} tested under electrical stress, a extraction models of the substrate current and degradation/age parameters are developed. Extraction of critical electric field E_{crit} for carrier velocity saturation, effective conduction length L_c and aging factors H , m , n are realized by a monitor system combining ATE and CAD techniques. Experimental results indicate that models and its parameters are reasonable and could be applied in degradation/age simulation and monitoring of MOSFETs devices/circuits.

Key Words: Model Parameter, Hot Carrier, Degradation/Aging, MOSFET

PACC: 7220, 7220H, 7220J, 7280C

Article ID: 0253-4177(2000)03-0268-06

1 引言

在亚微米/深亚微米 MOSFET VLSI 领域, 器件几何尺寸等比例缩小的同时, 器件工作电压并未随之按比例缩小, 使器件中纵向、横向电场强度增强, 沟道热载流子形成几率明显增大, 漏区附近高场区的雪崩倍增加剧, 热载流子效应更为显著, 导致器件电学特性如跨导 g_m 、阈值电压 V_{th} 、漏极电流 I_{ds} 等漂移退化程度加深. 因此, 热载流子效应已成为影响亚微米/深亚微米电路性能的主要可靠性因素之一, 其理论模型和失效机理对策分析研究成为当前热门课题^[1,2]. 传统的可靠性测控技术受“事后行动”的局限, 已远远不能适应现代 VLSI 电路/系统高复杂度、高密度发展趋势的需要, 急待探索新的可靠性技术手段. 基于内建可靠性的设想, 采取事前行为, 对 VLSI 电路器件进行可靠性监测与模拟, 再将所得可靠性信息反馈到先行设计中去, 即可提高电路系统的可靠性, 优化其性能.

本文将从 MOSFET 热载流子退化/寿命模型及衬底电流模型入手, 对用以表征热载流子退化的关键参量如 E_{crit} 、 L_c 、 H 、 m 、 n 等进行较详细的分析讨论, 建立相应的参数提取模型, 并结合现代自动测试 ATE 与 CAD 技术, 实现了 CD(Critical Dimension Bar) = $1\mu\text{m}$ 的 PCM 芯片可靠性监测和参数提取, 并应用于 MOS 器件电路可靠性模拟.

2 理论模型

2.1 MOSFET 热载流子退化/寿命模型

由于热载流子注入诱生的 Si-SiO₂ 界面态是热载流子效应的主要体现, 也是引起其他器件参数退化的关键因素. 虽然通过电荷泵技术等可测得界面态密度 N_{it} , 但其沿沟道方向的分布及在能量空间的分布难以精确测定与模拟, 要以界面态作为热载流子退化表征非常困难. 而器件漏极电流 I_{ds} 、跨导 g_m 、阈值电压 V_{th} 是对热载流子效应敏感的主要电气参数, 受界面态的影响也较明显^[3], 因此宜采用这三个参数的退化量 $\Delta I_{ds}/I_{ds0}$ 、 $\Delta g_m/g_{m0}$ 、 ΔV_{th} 作衡量热载流子退化的表征量, 统以 ΔD 表示, 其中 I_{ds0} 、 g_{m0} 为受应力前的器件漏电流和跨导. 大量实验证实, ΔD 与受应力时间 t 幂函数关系. 借助“晕载流子”概念, 可导得 MOSFET 热载流子退化模型^[4]

$$\Delta D = A t^n = C_1 \left[\frac{I_{ds}}{W} \exp \left[- \frac{\phi_i}{q\lambda E_m} \right] \right]^n t^n \quad (1)$$

其中 ϕ_i 为热载流子注入 Si-SiO₂ 界面诱生新的界面态所需的临界能量; λ 系衬底电子平均自由程; E_m 即沟道最大横向电场强度, n 和 C_1 是与工艺相关因子; W 系沟宽. 可见 A 是与界面态关联密切的系数, 也充分体现了器件退化量主要取决于界面态的事实. 由于 ϕ_i 、 λ 、 E_m 都是表示材料微观特性的物理量, 不易通过

器件电学特性测试直接测定或提取,因此,需要对 A 进行适当物理转换,以便于其中参数的获取.

由普遍引用的衬底电流表达式^[5]

$$I_{\text{sub}} = C_2 I_{\text{ds}} \exp \left[- \frac{\phi_t}{q \lambda E_m} \right] \quad (2)$$

可得易于参数提取的 A 的转换形式

$$\begin{aligned} A &= C_1 \left[\frac{I_{\text{ds}}}{W} \exp \left[- \frac{\phi_t}{q \lambda E_m} \right] \right]^n \\ &= C_1 \left[\frac{I_{\text{ds}}}{W} \exp \left[- \frac{\phi_t}{q \lambda E_m} \right] \frac{\phi_t}{\phi_t} \right]^n = \left[\frac{I_{\text{ds}}}{WH} \left(\frac{I_{\text{sub}}}{I_{\text{ds}}} \right)^m \right]^n \end{aligned} \quad (3)$$

其中 ϕ_t 为发生碰撞电离的临界能量; H 、 m 、 n 均为与材料及工艺相关的因子. 于是, MOSFET 热载流子退化模型可表为

$$\Delta D = A t^n = \left[\left[\frac{I_{\text{ds}}}{WH} \left(\frac{I_{\text{sub}}}{I_{\text{ds}}} \right)^m \right] t \right]^n \quad (4)$$

进而得出用于推算器件退化达到一定程度 ΔD_t 所需的时间,即器件的寿命

$$\tau = \frac{WH}{I_{\text{ds}}} \left(\frac{I_{\text{sub}}}{I_{\text{ds}}} \right)^{-m} \Delta D_t^{1/n} = WH (I_{\text{sub}})^{-m} I_{\text{ds}}^{m-1} \Delta D_t^{1/n} \quad (5)$$

利用式(4)、(5)可进行器件退化/寿命模拟,但须确保 H 、 m 、 n 提取准确,且 I_{ds} 、 I_{sub} 理论模型合理可靠. I_{ds} 模型可采用适用于小尺寸器件的 BSIM2、BSIM3 模型^[6] 及其他亚微米/深亚微米 I_{ds} 模型. 而(2)式所示的 I_{sub} 表达式也包含不易测量的微观物理量 ϕ_t 、 λ 等,一般表达成 I - V 形式. 根据雪崩电离理论,得饱和区衬底电流模型^[7]

$$I_{\text{sub}} = \frac{A_i}{B_i} I_{\text{ds}} (V_{\text{ds}} - V_{\text{dsat}}) \exp \left[- \frac{B_i L_c}{V_{\text{ds}} - V_{\text{dsat}}} \right] \quad (6)$$

$$\text{其中 } A_i = \begin{cases} 2 \times 10^2 \mu\text{m}^{-1} & (\text{NMOS}) \\ 1 \times 10^3 \mu\text{m}^{-1} & (\text{PMOS}) \end{cases} \quad B_i = \begin{cases} 1.7 \times 10^2 \text{V}/\mu\text{m} & (\text{NMOS}) \\ 3.4 \times 10^2 \text{V}/\mu\text{m} & (\text{PMOS}) \end{cases}$$

V_{dsat} 为漏极电流 I_{ds} 饱和时的漏源电压, L_c 是有效导电长度.

小尺寸器件中,由于很强的沟道横向电场可能使沟道载流子速度饱和,从而在沟道尚未“失断”时,漏极电流 I_{ds} 就已饱和. 因此 V_{dsat} 不再是长沟道情况下的 $V_{\text{GS}} - V_{\text{th}}$, 而应重新计量

$$V_{\text{dsat}} = \frac{E_{\text{crit}} L (V_{\text{GS}} - V_{\text{th}})}{E_{\text{crit}} L + (V_{\text{GS}} - V_{\text{th}})} \quad (7)$$

式中 E_{crit} 为沟道载流子速度饱和和临界电场强度; L 为沟道长度.

MOSFET 热载流子退化/寿命模型建立之后,还需建立参数提取模型,设定适当的监测量,以准确提取参数,用于电路器件的可靠性模拟.

2.2 衬底电流模型参数提取

由式(6)、(7)知,衬底电流模型参数主要含有 E_{crit} 和 L_c . E_{crit} 可通过先提取 V_{dsat} , 再代入(7)式求得. 要注意, E_{crit} 与栅、衬偏置相关,即

$$E_{\text{crit}} = E_{\text{crit}0} + E_{\text{crit}g} V_{\text{gs}} + E_{\text{crit}b} V_{\text{bs}} \quad (8)$$

有效导电长度 L_c 与 $\sqrt{T_{\text{ox}}}$ (T_{ox} 系栅氧厚)成正比,并与偏置电压 V_{gs} 、 V_{ds} 、 V_{bs} 相关,可由一组固定偏置条件下 I_{sub} 的测试数据拟合得到

$$L_c(V_{\text{gs}}, V_{\text{ds}}, V_{\text{bs}}) = \sqrt{T_{\text{ox}}} [L_1 + L_2 (V_{\text{gs}})^4] \quad (9)$$

式中

$$L_1 = L_{c0} + L_{c1} V_{\text{bs}} + [L_{c2} + L_{c3} V_{\text{bs}}] V_{\text{ds}}$$

$$L_2 = L_{c4} + L_{c5} V_{\text{bs}} + [L_{c6} + L_{c7} V_{\text{bs}}] V_{\text{ds}}$$

其中 $L_{c0} \sim L_{c7}$ 均为与偏置相关因子,根据多组不同偏置条件下 I_{sub} 的测试数据分别求解,即可得出 $L_{c0} \sim L_{c7}$.

2.3 退化/寿命模型参数 H 、 m 、 n 提取

在 MOSFET 退化模型式(4)中, H 、 m 、 n 为与材料、工艺相关的因子, 退化模拟对其值极为敏感, 因此对这三个参数进行准确提取尤为重要。

实验中, 兹选择较易直接测试的 $\Delta I_{ds}/I_{ds0}$ 作为退化表征量

$$\frac{\Delta I_{ds}}{I_{ds0}} = \left[\frac{I_{ds}}{WH} \left(\frac{I_{sub}}{I_{ds}} \right)^m t \right]^n \quad (10)$$

分别在不同老化阶段测出对应的 I_{ds} 、 I_{sub} , 然后进行数据处理和参数提取。

对(10)式两边分别取对数:

$$\lg \left(\frac{\Delta I_{ds}}{I_{ds0}} \right) = n \lg t + n \lg \left[\frac{I_{ds}}{WH} \left(\frac{I_{sub}}{I_{ds}} \right)^m \right] \quad (11)$$

由 $\lg \left(\frac{\Delta I_{ds}}{I_{ds0}} \right) - \lg t$ 关系曲线求出其斜率即为 n 。当 n 一旦确定, 再对(10)式作以变换

$$\lg \left(\frac{t I_{ds}}{W} \right) = -m \lg \left(\frac{I_{sub}}{I_{ds}} \right) + \frac{1}{n} \lg \left(\frac{\Delta I_{ds}}{I_{ds0}} \right) + \lg H \quad (12)$$

与求 n 的过程相类似, 分别求出 $\lg \left(\frac{t I_{ds}}{W} \right) - \lg \left(\frac{I_{sub}}{I_{ds}} \right)$ 关系曲线的斜率和截距, 就可推算出 H 、 m 值。

3 模型参数提取及其结果

基于上述理论模型, 遵循 IEEE488 标准, 以微机通过 GPIB 接口控制半导体参数测试仪 HP4145, 对样片进行监测可完成数据采集与处理, 实现参数提取。

实验所用样片为华晶集团 CD=1 μ m 的 PCM 芯片, 栅氧化层厚度 T_{ox} =20nm, W/L_{eff} =50 μ m/1.0 μ m, 测试温度 T =27 $^{\circ}$ C。测试方法为封装后芯片插入屏蔽盒测试, 以保证测试过程中良好的光电屏蔽。

测试时必须选取适当的电应力条件, 以形成较明显的 I_{sub} , 避免噪声电流干扰引起过大的数据偏差。测试偏置设为: V_{CC} =5V, V_{DD} =5V, V_{BB} =-3V, 并针对不同参数的提取设定相应的变化步长。

首先通过监测系统监控采集用于提取 E_{crit} 、 L_c 的数据。提取不同 V_{gs} 、 V_{bs} 下的 V_{dsat} , 由(7)式算出不同偏置下的 E_{crit} , 再对(8)式(三组以上)联立求解, 得到 E_{crit} 参数

$$E_{crit0} = 1.74 \times 10^4 \text{V/cm}, E_{critg} = 6.41 \times 10^3 \text{cm}^{-1}, E_{critb} = 1.74 \times 10^3 \text{cm}^{-1}$$

然后, 再将不同偏置下的 V_{dsat} 代入(6)式中, 利用测得的 I_{sub} 、 I_{ds} 求出 L_c , 再根据 L_c 表达式(9), 分别算出 $L_{c0} \sim L_{c7}$

$$L_{c0} = 0.011 \text{cm}^{1/2}, L_{c1} = 9.8 \times 10^{-4} \text{cm}^{1/2} \cdot \text{V}^{-1}, L_{c2} = 2.9 \times 10^{-4} \text{cm}^{1/2} \cdot \text{V}^{-1}, L_{c3} = -1.4 \times 10^{-4} \text{cm}^{1/2} \cdot \text{V}^{-2}, L_{c4} = -2.3 \times 10^{-5} \text{cm}^{1/2} \cdot \text{V}^{-4}, L_{c5} = 1.9 \times 10^{-6} \text{cm}^{1/2} \cdot \text{V}^{-5}, L_{c6} = 4.9 \times 10^{-6} \text{cm}^{1/2} \cdot \text{V}^{-5}, L_{c7} = -2.2 \times 10^{-7} \text{cm}^{1/2} \cdot \text{V}^{-6}.$$

图1、图2为用本文方法提取的 E_{crit} 、 L_c 对归一化衬底电流 I_{sub}/I_{ds0} 模拟结果和文献[7]方法提取所得结果与测试数据之间的比较。其中图1为 V_{gs} 等于 2V, 3V, 4V 时, $(I_{sub}/I_{ds0}) - V_{ds}$ 关系曲线, 图2为 V_{ds} 等于 3.5V, 4.5V, 5V 时 $(I_{sub}/I_{ds0}) - V_{gs}$ 特性曲线, 由图可见:

(1) 在相同的 V_{gs} (图1)或相同的 V_{ds} (图2)中, V_{bs} 变化, 两种模拟结果与实测数据的偏差基本不变, 说明两者都较好地反映了 L_c 与 V_{bs} 的关系。

(2) 在图1中, V_{gs} 较小(2V)时, 两种提取模型所得参数的模拟结果均能与测试数据较好吻合。随着 V_{gs} 增大, 两者与测试数据偏差都有增加趋势, 文献[7]方法提取的尤为明显, 说明其提取模型对 L_c 与 V_{gs} 关系的表达不够精确。

(3) 在图2中, 随着 V_{ds} 的减小, 文献[7]的模拟结果与测试数据偏差显著增大。主要原因在于较大的 V_{ds} 削弱了漏区附近纵向电场对沟道热载流子的影响, 体现出来则为 V_{gs} 对 L_c 影响减弱。本文建立的提取模型对这一内在联系予以充分考虑, 如实表达了 L_c 与 V_{gs} 的关系, 从而保证了 V_{ds} 较宽变化范围内模拟结果与测试数据的较好符合。

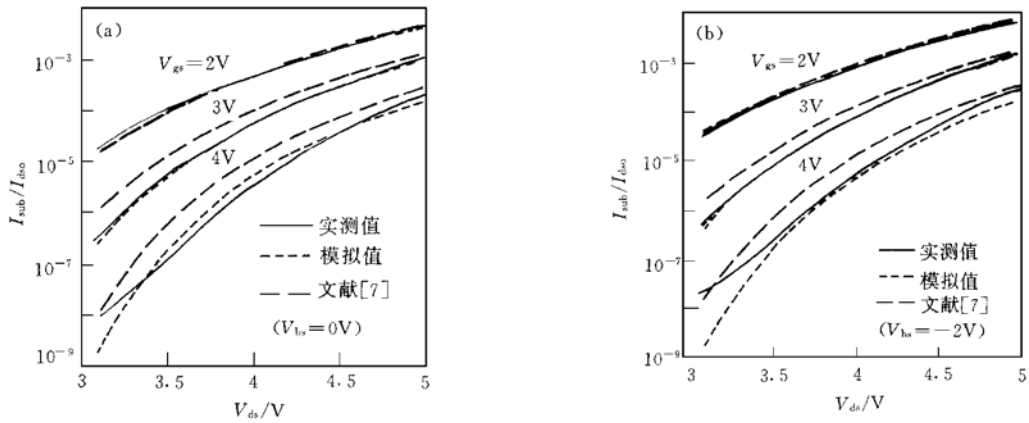


图 1 $(I_{sub}/I_{ds0})-V_{ds}$ 关系曲线
(a) $V_{ds}/V(V_{bs}=0V)$, (b) $V_{ds}/V(V_{bs}=-2V)$.

FIG. 1 $(I_{sub}/I_{ds0})-V_{ds}$ Curve

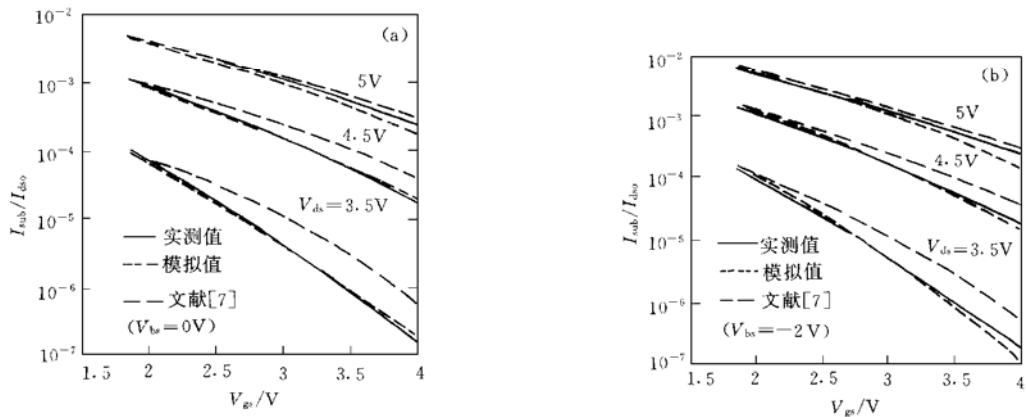


图 2 $(I_{sub}/I_{ds0})-V_{gs}$ 特性曲线
(a) $V_{gs}/V(V_{bs}=0V)$, (b) $V_{gs}/V(V_{bs}=-2V)$.

FIG. 2 $(I_{sub}/I_{ds0})-V_{gs}$ Characteristic Curve.

(4) 通过图 1、图 2 的对比表明,在较宽的偏置(V_{gs} , V_{ds} , V_{bs})变化范围内,利用本文提取模型所得参数模拟结果与实测数据均符合良好,这意味着所建模型合理可靠。

$E_{crit} \setminus L_c$ 一经获得,接下来着手提取 H 、 m 、 n 。将采集得到的 I_{ds} 、 I_{sub} 等数据处理转换,画出 $\lg \left[\frac{\Delta I_{ds}}{I_{sub}} \right] - \lg t$ 关系曲线,根据式 (11) 求出其斜率即为 $n=0.22$ 。再按类似过程利用式 (12) 求出 H 、 m 、 n ,其值分别为 $H=9.2 \times 10^7 A \cdot s / (mV^{1/n})$, $m=3.8$ 。

将 H 、 m 、 n 值代入式 (10) 对器件退化量进行模拟计算,并与实测数据比较,如图 3 所示,两者吻合较好,说明提取的参数合理正确,可用于器件退化/寿命的可靠性模拟,同时曲线也体现出 $\Delta I_{ds}/I_{ds0}$ 与受电应力时间 t 确实呈幂函数关系。

4 MOSFET 退化/寿命模拟

根据提取得到的参数,结合 MOSFET 退化/寿命模型,采用内插-外推算法,可对 MOSFET 热载流子退化/寿命进行预测模拟,工作条件为 $V_{gs}=3V$, $V_{ds}=7V$, $V_{bs}=0V$ 时,器件退化 $\Delta I_{ds}/I_{ds0}=10\%$ 所需时间(寿命) $\tau=1.17$ 年,器件工作 20 年后,器件退化量 $\Delta I_{ds}/I_{ds0}=18.6\%$ 。

可见 MOSFET 热载流子退化在应力早期尤为明显.因为在 Si-SiO₂ 界面,可被注入的热载流子诱生界面态的 Si-H 弱键等不稳定状态数目较多,界面态的产生及界面态上的电荷俘获/释放频繁,对器件影响较大^[8].应力时间增长,界面态数目基本处于动态平衡,退化程度减弱。

在此所做的模拟为直流应力下的情形,要进行交流应力退化模拟,可根据直流应力退化的机理,对交流信号按时间分成若干小区域,使得在这一区域内,信号变化较小,可视为直流应力,然后对整个应力时间积分即

$$\Delta D = \left[\int_0^{\tau} \frac{I_{ds}}{WH} \left(\frac{I_{sub}}{I_{ds0}} \right)^m dt \right]^n \quad (13)$$

按本文所建模型提取的参数由于考虑到偏置的影响因素,在交流应力下将仍然适用。

5 结论

本文依据 MOSFET 热载流子可靠性物理和实验研究,发展建立了衬底电流与退化/寿命特征参数提取模型并实现了表征量 E_{crit} , L_c , H , m , n 的有效提取,模型参数应用于器件退化模拟与实测结果较为吻合。

基于上述讨论的理论及提取模型,通过系统化编程,结合相应的电路模拟软件 SPICE 等,可实现电路级热载流子退化的可靠性监测与模拟.我们在这方面已经展开较深入的工作,并将继续作出报道。

致谢 华晶集团中央研究所、电子部二十四所提供了样片及测试技术支持,在此深表谢意。

参 考 文 献

- [1] D. S. Ang, C. H. Ling, IEEE Electron Device Lett., 1998, **19**(1): 23.
- [2] Amanda Duncan, Umberto Ravaoli, IEEE Trans. Electron Devices, 1998, **45**(4): 867.
- [3] M. S. Liang, IEDM Tech. Digest, 1983, 186~ 189.
- [4] S. Tam, Ping-keung Ko, IEEE Trans. Electron Devices, 1984, **31**(9): 1116~ 1125.
- [5] C. Hu, Simon. Tam, Fu-chen Hsu, IEEE Trans. Electron Devices, 1985, **32**(2): 375~ 384.
- [6] J. H. Huang, IEEE Custom Integrated Circuits Conference, 1993, 14. 2. 1~ 14. 2. 4.
- [7] Peter M. Lee, Mary M. Kuo, IEDM Tech. Digest, December 1988, 134~ 137.
- [8] 张炯,吴正立,李瑞伟,半导体学报, 1998, **19**(5): 369 [ZHANG Jong, WU Zhengli, LI Ruiwei, Chinese Journal of Semiconductors, 1998, **19**(5): 369(in Chinese)].

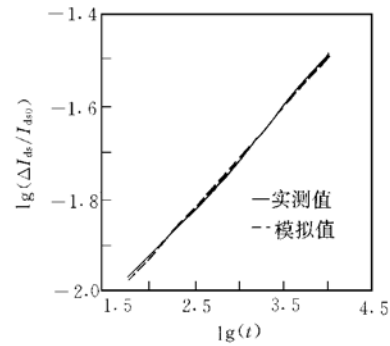


图3 $\Delta I_{ds}/I_{ds0}$ 随工作时间 t 变化规律

FIG. 3 $\Delta I_{ds}/I_{ds0}$ vs Work Time t