

超薄 SiO₂ 软击穿后 I-V 特性的饱和性质*

许铭真[†] 谭长华 段小蓉

(北京大学微电子研究院, 北京 100871)

摘要: 利用电子速度饱和概念和比例差值方法(proportional difference operator, PDO)研究了超薄 SiO₂ 在第一次软击穿以后栅电流随着栅电压的变化所呈现的饱和性质. 实验证明了第一次软击穿以后栅电流随着栅电压变化的 PDO 谱峰位、峰高与电子在第一次软击穿通道中运动的饱和速度及饱和电流密度相关. 基于缺陷散射机制, 得到的第一次软击穿通道的横截面积与文献报导的结果一致.

关键词: 超薄 SiO₂; 软击穿; I-V 饱和特性

PACC: 7755; 7340Q

中图分类号: TN386

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)S0-0193-04

1 引言

软击穿(soft breakdown, SBD)^[1,2]是超薄栅 SiO₂(厚度小于 5nm)纳米器件的主要失效模式, 在产生少数几次 SBD 后器件依然还能工作. 因此, 对于器件在 SBD 以后的 I-V 特性的研究, 受到广泛关注. 人们已经提出三类、五种电流模型: 变频跳跃导电(variable range hopping, VRH)模型^[3]、渗流(percolation)模型^[4]、量子点模型^[5]、多种隧道(tunneling)电流模型^[2,6,7]来解释 SBD 以后的 I-V 特性. 但是, 这些模型仅能在有限的电压范围内与实验相符合, 尚无一种模型能够解释较宽电压范围内的 I-V 特性. 特别是 SiO₂ 厚度小于 3nm 时, 在高压端出现的二次饱和现象, 上述模型均不能给出合理的解释. 因为在上述的模型中, 电流随电压的增加而增加, 并无饱和特征. 对于高压端出现的二次饱和区, 有人认为是与击穿通道的扩展电阻相关^[8], 而对于第一次饱和现象, 至今没有找到适当的解释. 本文利用电子速度饱和概念, 提出一种定量解释 SBD 以后 I-V 特性出现第一次饱和性质时的经验关系式.

2 模型

2.1 SBD I-V 特性的表述式

在低场(低电压区), 认为 I-V 特性有近似欧姆性质. 而在高场(高电压区), 由于电子在 SBD 通道中遇到声子散射, 使其迁移率下降. 此后, 当电子的

动能达到声学光子的能量(0.135eV)时, 其运动速度达到饱和值($\approx 2 \times 10^7$ cm/s)^[9], 电流也随之达到饱和值. 故得到新的可用来定量描述 SBD I-V 特性的表述式:

$$I = AJ = A\sigma F = AeN_{BD}\mu_0 F / (1 + \frac{F}{F_c}) \quad (1)$$

其中 F_c 是特征电场; N_{BD} 是发生 SBD 时 SiO₂ 中的体缺陷密度^[10,11], $N_{BD} = 1.26 \times 10^{20}$ cm⁻³; μ_0 是低场 SBD 通道迁移率, 而且 $\frac{1}{\mu_0} = \frac{1}{\mu_{SiO_2}} + \frac{1}{\mu_{Si_xO_y}}$, $\mu_{SiO_2} = 21$ cm²/(V·s), $\mu_{Si_xO_y} = 4$ cm²/(V·s), 于是, $\mu_0 \approx 3.4$ cm²/(V·s).

由(1)式描述 SBD I-V 特性的特征是:

当 $F/F_c \ll 1$ 时,

$$I = AeN_{BD}\mu_0 F \quad (2)$$

即, 电流 I 与电场 F 之间有线性关系.

当 $F/F_c \gg 1$ 时,

$$I = I_s = AeN_{BD}\mu_0 F_c = AeN_{BD}v_s = \text{const.} \quad (3)$$

即, 电流 I 趋于饱和值 I_s . 其中, 电子在 SiO₂ 中的饱和速度 v_s 与特征电场 F_c 之间维持近似的线性关系, 即 $v_s = \mu_0 F_c$.

2.2 特征电场 F_c 、SBD 饱和电流密度 J_s 、电子在 SiO₂ 中的饱和速度 v_s 和第一次 SBD 通道面积 A_{SBD} 的确定

应用比例差分方法^[12~14], 由(1)式得到:

$$\Delta_p J = J(KF) - J(F) = \frac{(K-1)J_s F_c F}{(F_c + KF)(F_c + F)} \quad (4)$$

* 国家重点基础研究发展计划资助项目(批准号: TG2000036503)

[†] 通信作者. Email: mxu@pku.edu.cn

2005-10-11 收到, 2006-01-09 定稿

其中 比例差分常数 $K = 1.1$. 根据比例差分原理^[12], $\Delta_p J$ 是一个有极值的函数, 所以有 $\frac{\partial \Delta_p J(F)}{\partial F} \Big|_{F=F_p} = 0$, 于是得到峰位 F_p 和峰高 $\Delta_p J(F_p)$ 为:

$$F_p = F_c / K^{1/2} \tag{5}$$

$$\Delta_p J(F_p) = \left(\frac{\sqrt{K} - 1}{\sqrt{K} + 1} \right) J_s = 0.0238 J_s \tag{6}$$

由(5)和(3)式, 得到:

$$J_s = e N_{BD} \mu_0 F_c \tag{7}$$

$$F_c = K^{1/2} F_p \tag{8}$$

其中 $F_p = \frac{V_p - V_{FB} - 2\varphi_B}{T_{ox}}$; V_p 是第一次 SBD 以后的 $I_G - V_G$ 曲线的比例差值 (PDO) 谱峰位电压; V_{FB} 是平带电压; φ_B 是费米势; T_{ox} 是氧化层厚度.

$$v_s = J_s / e N_{BD} \tag{9}$$

$$A_{SBD} = \frac{J_s}{J_s} \tag{10}$$

3 实验验证与讨论

3.1 实验

实验样品为 nMOSFETs 和 MOSFETs, 氧化层厚度为 2.5nm, 栅面积为 $1.89 \times 10^{-6} \text{cm}^2$. 平带电压 V_{FB} 、费米势 φ_B 、氧化层厚度 T_{ox} 由量子力学模拟方法确定. 用 HP4156B 半导体参数测试仪器测量栅电流-时间、栅电流-电压特性. 实验的环境温度为 27~125°C. 图 1 给出应力电压为 3.6, 3.7, 3.8V, 温度为 105°C 的 nMOSFETs 栅电流与应力时间关系(a) 和 3.7V, 105°C 时的栅电流与栅电压的关系(b) 的典型实验结果. 可以看到第一次软击穿后的栅电流近似为常数 (47.7μA).

图 2(a) 和 (b) 分别给出应力电压 3.7V, 第一次 SBD 以后的典型的 $I_G - V_G$ 、归一化电导 G_N 和归一化的比例差值谱 $\Delta_p J(V_G)$.

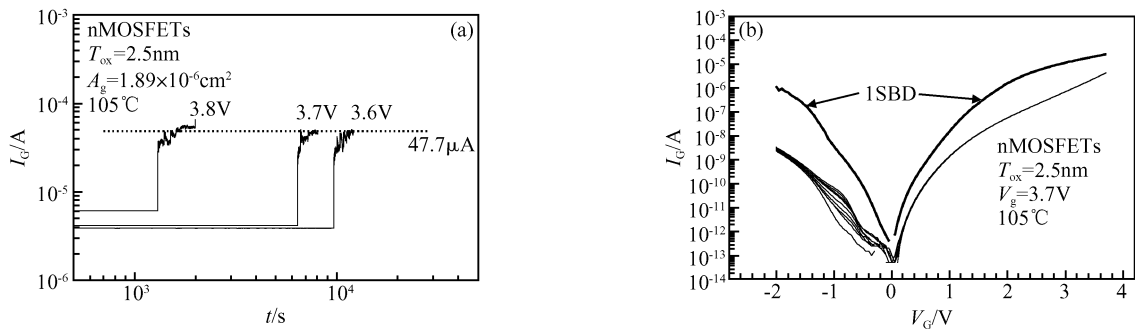


图 1 (a) 栅电流与应力时间关系; (b) 栅电流与栅电压的关系

Fig.1 (a) Gate current versus stress time; (b) Typical $I_G - V_G$ measured results

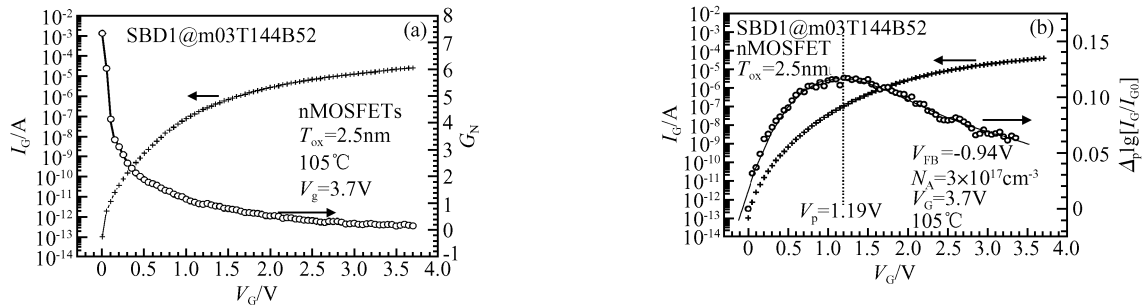


图 2 (a) 第一次 SBD 以后的典型的 $I_G - V_G$ 、归一化电导 G_N ; (b) 第一次 SBD 以后的典型的 $I_G - V_G$ 、归一化的比例差值谱 $\Delta_p J(V_G)$

Fig.2 (a) Typical $I_G - V_G$ curves and normalized conduction G_N after first SBD; (b) Typical $I_G - V_G$ curves and normalized proportional difference spectrum $\Delta_p J(V_G)$ after first SBD

由图 2(a) 可以看出第一次 SBD 以后的归一化电导 G_N 随着栅电压的增加而下降, 这个实验结果不能用已有的模型^[2~7] 解释. 由图 2(b) 比例差值谱

$\Delta_p J(V_G)$ 的谱峰位 V_p 和谱峰高度 $\Delta_p J(V_p)$ 给出特征电场 F_c 、SBD 饱和电流密度 J_s 、电子在 SiO_2 中的饱和速度 v_s 和第一次 SBD 通道的横截面积

A_{SBD} .

3.2 关键参数的测量与分析结果

由图 2(b) 得到 PDO 谱峰位 $V_p = 1.2\text{V}$. 用(5)和(7)式得到特征临界电场 $F_c \approx 5.7\text{MV/cm}$ 和 $J_s = eN_{\text{BD}}v_s = 4 \times 10^8\text{A/cm}^2$, 电子在 SBD 通道中的饱和速度 $v_s \approx 2.01 \times 10^7\text{cm/s}$, SBD 通道的横截面积 $A_{\text{SBD}} \approx 1.08 \times 10^{-13}\text{cm}^2$. 不同应力电压、应力极性、应力温度(27~125°C)条件下得到的统计实验结果一致.

4 结论

利用电子速度饱和概念描述第一次 SBD 以后的栅电流-栅电压(I_G - V_G)的第一次饱和性质, 并得到 SBD 通道的横截面积为 $1.1 \times 10^{-13}\text{cm}^2$. 这与他人^[15]得到的测量结果($2 \times 10^{-13}\text{cm}^2$)在数量级上接近. 因此, 第一次 SBD 以后第一次饱和电流的出现可能是 SBD 通道中电子速度饱和所致. 第一次 SBD 以后的第一次饱和电流密度、电子在 SBD 通道中的饱和速度 v_s 、SBD 通道的横截面积与应力电压、应力极性、应力温度仅有微弱关系. 该模型也适用于 pMOSFET.

参考文献

- [1] Okada K, Kawasaki S, Hirofuji Y. New experimental findings on stress induced leakage current of ultra thin silicon dioxides. EXT Abst SSDM, 1994:565
- [2] Lee S H, Cho B J, Kim J C, et al. Quasibreakdown of ultrathin gate oxide under high field stress. IEDM Tech Dig, 1994:605
- [3] Okada K, Taniguchi K. Electrical stress-induced variable range hopping conduction in ultrathin silicon dioxide. Appl Phys Lett, 1997, 70:351
- [4] Houssa M, Nigam T, Mertens P W, et al. Soft breakdown in ultrathin gate oxides: correlation with the percolation theory of nonlinear conductors. Appl Phys Lett, 1998, 73:514
- [5] Miranda E, Suñé J. Analytic model of leakage current through multiple breakdown paths in SiO₂ films. Int Rel Phys Sym Proceedings, 2001:367
- [6] Miranda E, Suñé J. Mesoscopic approach to the soft breakdown failure mode in ultrathin SiO₂ films. Appl Phys Lett, 2001, 78:225
- [7] Nigam T, Martin S, Abusch-Magder D. Temperature dependence and conduction mechanism after analog soft breakdown. Int Rel Phys Proceedings, 2003:417
- [8] Hosoi T, Kamakura P L Re, Taniguchi K. A new model of time evolution of gate leakage current after soft breakdown in ultra-thin gate oxides. IEDM Tech Dig, 2002:155
- [9] Hughes R C. High field electronic properties of SiO₂. Solid State Electron, 1978, 21:251
- [10] Xu M Z, Tan C H. Extended Arrhenius law of time - to - breakdown of ultrathin gate oxides. Appl Phys Lett, 2003, 82(15):2482
- [11] Xu M Z, Tan C H. Low field stress induced double donor defect in MOS structures. Solid State Commun, 2003, 128:279
- [12] Xu M Z, Tan C H, He Y D, et al. A spectral analysis method to directly determine minority carrier generation lifetime using the pulsed MOS structure. Solid State Electron, 1994, 37:31
- [13] Tan C H, Xu M Z, Wang Y Y. Application of the difference subthreshold swing analysis to study generation interface trap in MOS structures due to Fowler-Nordheim aging. IEEE Electron Device Lett, 1994, 15:257
- [14] Tan C H, Xu M Z, Wang Z O. Proportional difference operator method and its application in studying subthreshold behavior of MOSFETs. Solid State Electron, 2000, 44:1059
- [15] Crup F, Degraeve R, Groeseneken G, et al. On the properties of the gate and substrate current after soft breakdown in ultrathin breakdown in ultrathin oxide layers. IEEE Trans Electron Devices, 1998, 45:2329

Saturation Behavior of Ultrathin Gate Oxides After Soft Breakdown^{*}

Xu Mingzhen[†], Tan Changhua, and Duan Xiaorong

(*Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract: The physical origin of post soft breakdown (SBD) current saturation behavior of ultrathin gate oxides is discussed on the basis of electron velocity saturation concept. The post soft breakdown current-voltage (I - V) characteristic is studied with the proportional difference operator (PDO) method. It is shown that the proportional difference of the soft breakdown I - V curve is a peak function. Its peak position and height are related to the saturation velocity of electron in SBD path and the saturation current density through the SBD path, respectively. In addition a simple and useful method of defining and characterizing the SBD path cross-section in SiO_2 based on the defect scattering mechanism is also presented.

Key words: ultrathin SiO_2 ; soft breakdown; I - V saturation characteristics

PACC: 7755; 7340Q

Article ID: 0253-4177(2006)S0-0193-04

^{*} Project supported the State Key Development Program for Basic Research of China(No. TG2000036503)

[†] Corresponding author. Email: mxu@pku.edu.cn

Received 11 October 2005, revised manuscript received 9 January 2006