

恒流应力下 E²PROM 隧道氧化层的退化特性研究^{*}

李蕾蕾[†] 刘红侠 于宗光 郝 跃

(西安电子科技大学微电子学院, 宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室 西安 710071)

(2005 年 8 月 19 日收到, 2005 年 10 月 31 日收到修改稿)

在电容测量的基础上研究了薄隧道氧化层在恒定 Fowler-Nordheim (F-N) 隧穿电流下的退化情况. 这种退化是恒流应力和时间的函数, 对恒流应力大小的依赖性更加强烈, 隧道氧化层在 F-N 电流下的退化是注入电荷密度 (Q_{inj}) 的函数. 在较低 Q_{inj} 下氧化层中发生正电荷俘获, 在较高 Q_{inj} 下发生负电荷俘获, 导致栅压变化的反复.

关键词: E²PROM, 隧道氧化层, 退化, 恒流应力

PACC: 7220J, 7300, 7360

1. 引 言

为了得到更好的 E²PROM 器件特性, 需要不断减小氧化层厚度, 这使得氧化层中的电场和受电场影响的 F-N 隧穿电流越来越大, 此时氧化层退化对 E²PROM 器件影响很大. 随着电场的进一步增加, 在氧化层中出现了很多退化机理, 其中最显著的是界面陷阱和 SiO₂ 中电荷的陷落, 它们单独或者共同使得器件性能退化, 并导致器件失效.

集成度和可靠性对于 E²PROM 器件非常重要, 其工作总是与电荷穿过浮栅和衬底之间的隧道氧化层相关. F-N 隧穿是非挥发性存储器件的主要工作机理, 电流流过氧化层导致了氧化层质量的退化, 这种退化表现在器件的阈值电压 (V_T) 漂移、跨导 (g_m) 减小、亚阈值摆动增加和应力诱发氧化层漏电流 (stress induced leakage current, SILC) 的增加, 最终使得氧化层击穿^[1]. 因此流走过氧化层的电流对氧化层质量的影响必须加以考虑.

为了进一步提高 E²PROM 器件的性能, 首先必须弄清氧化层的退化机理. 之前有很多针对高场应力对薄氧化层影响的研究, 但是其中大部分只解决了 MOS 器件的问题, 从对 MOSFET 的研究来分析 E²PROM 的 Floating-Gate-Thin-Oxide (FLOTOX) 的隧道氧化层退化规律. 早先的研究表明氧化层的退化受工艺和器件参数影响很大, 这些影响的量级又直接

与详细工艺步骤相关. 由于 E²PROM 的制造与 MOSFET 不同, 所以对 MOSFET 的研究不能准确地揭示 E²PROM 氧化层的失效机理^[2]. 本文将从对 SILC 的研究来揭示 E²PROM 隧道氧化层的退化, 并从 F-N 隧穿电流引起的隧道氧化层退化来进一步揭示 E²PROM 隧道氧化层的退化本质.

在栅氧化层较厚的工艺中, SILC 并不很严重, 但是随着氧化层逐渐变薄, 应力诱发漏电增加得越来越快, 逐渐引起人们的重视, 尤其在 E²PROM 中, 隧道氧化层目前已经做到 10nm 以下, 在高压应力下, 氧化层的漏电直接影响了器件的耐久性^[2]. 随着氧化层膜厚减小, 这种漏电的机理主要集中在陷阱的充放电上, 因此可以用一定条件下的 SILC 来确定在该条件下某隧道氧化层中的情况, 得到对隧道氧化层的退化表征, 从而揭示 E²PROM 器件耐久性退化的实质^[3].

2. 实验研究与分析

实验采用的是(中国)华虹 NEC 公司的 LDD n 沟 E²PROM 器件, 主要研究应力下隧道氧化层中 SILC 的产生以及变化. 测量样品的隧道氧化层面积为 $0.16\mu\text{m}^2$, 厚度为 8.3nm, 阳极为浮栅 (FG), 阴极为漏端 (D).

在加应力之前, 先测量了氧化层的漏电流 (如图 1 所示). 从图 1 中发现未使用过的隧道氧化层的漏

^{*} 国家高技术研究发展计划(批准号 2004AA1Z1070)和国家自然科学基金(批准号 60376024)资助的课题.

[†] E-mail: LLL225@yahoo.com.cn

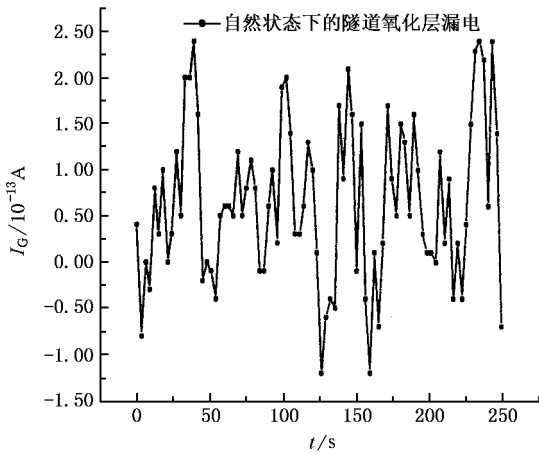


图 1 自然状态下的漏电流变化

电偏大,这和存储于氧化层中的电荷有关.然后,对氧化层进行电压扫描结果在图 2 中给出.在氧化层两端加电压进行扫描时,电流逐渐增大,然后突然减小.此时氧化层表现为阻性,该电阻大小约为 5000Ω,但是当电压从 4.30V 增加到 4.35V 时,电流骤然下降 3 个数量级.说明在氧化层两端加电压时,氧化层中的电荷获得能量,从界面陷阱中退陷在两极复合.这些电荷可能是存储在浮栅上的电荷在长期放置期间向衬底移动,也有可能是在制造时引入的,它们中的一部分进入隧道氧化层,并被界面陷阱俘获并且固定下来.即对器件的擦/写和放置会使隧道氧化层的界面陷阱俘获到一些电荷.

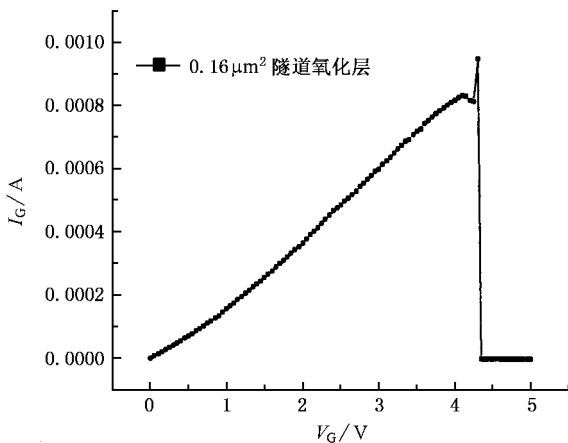


图 2 对隧道氧化层进行低压放电

进一步,对氧化层施加一个恒定电流应力,大小为 $3.2 \times 10^{-4} \text{ A}$,分别持续 50s,100s,150s,200s,250s,300s,400s,450s,500s,监测无端压时的漏电情况.图 3 给出了实验结果.应力之后,分别研究 SILC

与应力大小和时间的关系.开始第一次电流注入(50s)后,SILC 漏电在 $10^{-13} \text{ A} \sim 10^{-14} \text{ A}$ 之间摆动,与施加应力前的 SILC 相比变化不大.此后,电流应力不变,逐渐增加应力持续时间,连续再进行九次实验,发现每次应力后的 SILC 都在 $10^{-13} \text{ A} \sim 10^{-14} \text{ A}$ 之间变化.

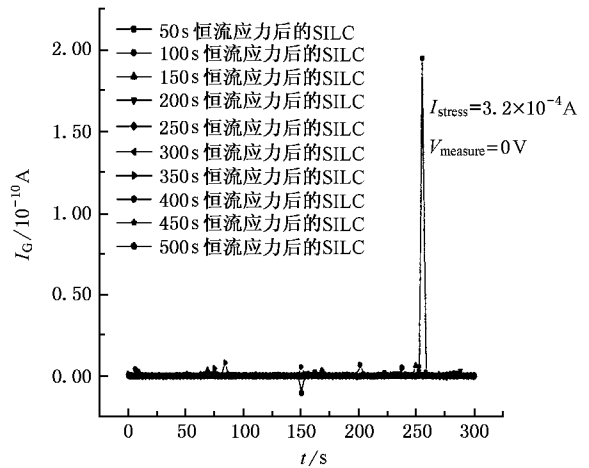


图 3 应力后的 SILC

为了深入研究隧道氧化层在应力下发生击穿的情况,又给器件施加了 10mA 的恒流应力,持续 150s,在应力前后对氧化层进行电压扫描,得到图 4,此时氧化层的退化明显,在较低电压下漏电就开始急剧增加.

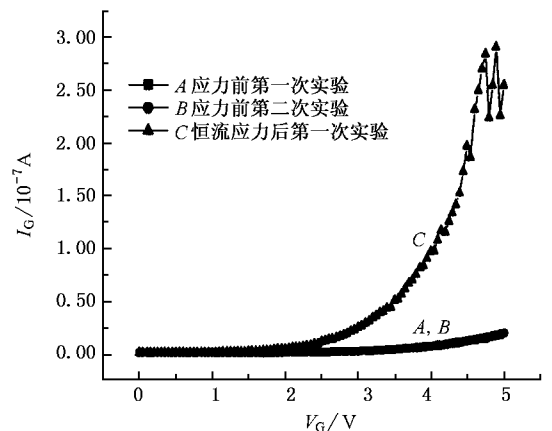


图 4 对氧化层施加恒流应力前后的漏电比较

图 5 是图 4 之后有时间间隔地对氧化层做击穿实验(不施加电流应力).发现不仅电流变小,且使 SILC 达到 10^{-8} A 的电压也开始减小.由于电流注入导致的退化随时间的推移有自愈合趋势,因此可以认为器件在电流注入后漏电增大,击穿电压也

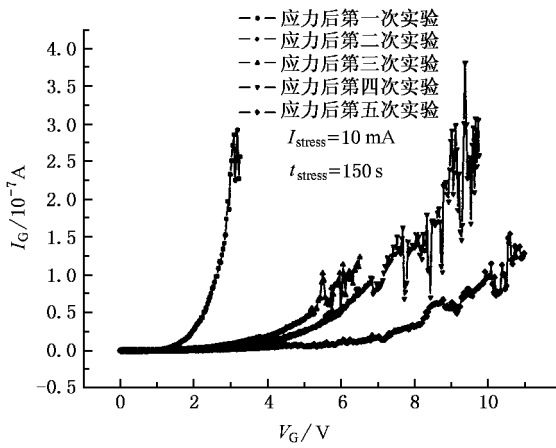


图5 恒流应力后不同时间内的氧化层退化

随之变小,但是放置一段时间后这种退化情况会有部分恢复. SILC 大小随时间的变化可以表示为^[4] $I_{\text{SILC}} \propto t^{-n}$, n 是能量因子,考察栅漏电时 n 约为 0.7,考察衬底漏电时为 1.

之前的实验都是在低压下进行的,为了进一步揭示器件的击穿特性,进行了高压下的击穿实验.当继续加大扫描电压,得到图 6 中的曲线 A,此时在电压从 12.90V 增加到 12.93V 时电流突然减小 3 个数量级.再次对器件做电压扫描,得到曲线 B,此时电流非常小,并且在电压增加时电流改变也不大.说明端压超过 12.9V 时,由于电流过大使得电极附近产生大量的热,导致电极附近的材料熔融.此时电极悬空,器件损毁,这种损伤不可恢复.

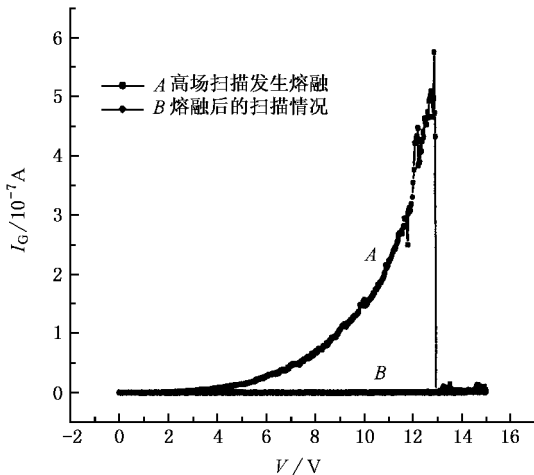


图6 熔融前后的电流情况

为了进一步揭示隧道氧化层在 F-N 电流应力下的退化情况,对样品进行栅注入实验(对栅施加恒

流应力),同时监控栅压(V_G)的变化.图 7 中, ΔV_G 随 Q_{inj} 改变会出现一个转折点,当 Q_{inj} 小于这个数值时 ΔV_G 随 Q_{inj} 的增加而减小;但是当 Q_{inj} 大于该点时就随 Q_{inj} 的增加而增大.其中 $Q_{\text{inj}} = J \times t$, t 为应力作用时间.表明在较低的 F-N 电流应力下,氧化层中不仅产生了负电荷,也产生正电荷,两种电荷对电场的作用相互抵消一部分.当 F-N 电流注入量较小时,正电荷占主导,使得 V_G 增大;当 F-N 电流注入量逐渐增大以后,负电荷影响力开始增大,使 V_G 增大的趋势放缓,并使 V_G 逐渐减小.这和已发现的阈值电压窗口先打开,然后闭合规律是一致的^[5,6].这种闭合主要是由于隧道氧化层中产生越来越多的负电荷陷阱,使得栅压不断减小引起的,严重影响了 E²PROM 的工作性能,也是 E²PROM 器件失效的直接现象.

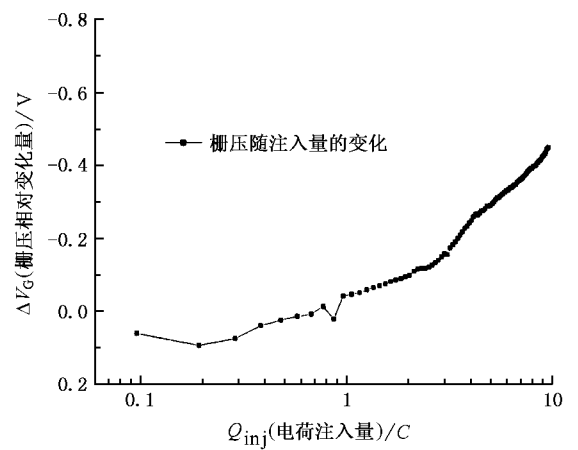


图7 栅压随注入量的变化

3. 讨 论

E²PROM 的擦/写都是通过 F-N 隧穿来实现的,此时电子将穿过一个三角能带进入氧化层的导带.空穴也有可能通过 F-N 效应从 Si 隧穿至氧化层的价带,但是由于这个三角能带对空穴来说太高了,这种现象的发生概率是很小的,所以通常 E²PROM 以 n 管为主.利用 WKB 近似和金属自由电子模型,可以得到 0K 时的 F-N 电流密度

$$J(T = 0\text{K}) = \left(\frac{q^3 E_{\text{ox}}^2}{8\pi \hbar \phi_b} \right) \cdot \exp \left[\frac{-4(2m)^{1/2} \phi_b^{3/2}}{3\hbar q E_{\text{ox}}} \right], \quad (1)$$

m 是自由电子的有效质量, E_{ox} 是氧化层中的电场强

度 ϕ_b 是势垒高度, F-N 隧穿强烈依赖于氧化层中的场强, 在 E^2 PROM 中一般需要场强 $> 9 \text{ MV/cm}^{[7]}$. 通过 F-N 电流公式和 FLOTOX E^2 PROM 的电容模型得到隧穿电流^[8]:

$$I_{\text{tun}} = \iint_A \alpha E^2 e^{-\beta/E} dA = A_T \alpha E_T^2 e^{-\beta/E} \quad (2)$$

α, β 来源于 Kolodny 测量, $\alpha = 1.88 E - 6A/V^2$, $\beta = 2.55 E + 8V/\text{cm}$, A_T 是发生隧穿的氧化层面积, 即隧道孔的面积. 退化测试中的隧穿电流的特性变化对考察隧道氧化层的退化很有意义, 当隧道孔面积固定的时候, I_{tun} 就取决于氧化层中的场强^[9]:

$$E = \frac{V_{\text{app}} - V_{\text{fb}}}{t_{\text{ox}}}, \quad (3)$$

V_{app} 是外加偏压, 由于在电荷穿过氧化层时部分被陷阱俘获, 此时被俘电荷的有效数量是

$$q_{\text{eq}} = \int_0^{t_{\text{ox}}} \Delta \rho(x) dx, \quad (4)$$

荷心为

$$t_c = \int_0^{t_{\text{ox}}} x \Delta \rho(x) dx / \int_0^{t_{\text{ox}}} \Delta \rho(x) dx, \quad (5)$$

$\Delta \rho(x)$ 是 x 处被陷阱俘获的电荷密度. 那么由于部分电荷被俘导致的场强变化量是 $\Delta E = -\Delta V_{\text{fb}}/t_{\text{ox}}$, 由平带电压变化引起的电场减小量是

$$\Delta E_1 = (q_{\text{eq}}/\epsilon) [1 - t_c/t_{\text{ox}}],$$

从 F-N 电流的角度计算此时电场减小量 $\Delta E = (3\Delta E_1 E q t_c) / (2\Phi_b)$, 其中 Φ_b 是氧化层势垒高度, 该公式适用于少量电荷被俘获的情况. 在 WKB 近似隧穿概率的基础上得到

$$\Delta E = (3\Delta E_1 E q t_c / 2\Phi_b) [1 - (2\Phi_b) / (3q t_{\text{ox}} E)]$$

适用于多数情况, 如隧穿距离 $d = \Phi_b/qE$ 与 t_{ox} 相比拟, 那么此时被俘电荷对 I_{tun} 影响不大. 在 F-N 注入时, 在非注入界面产生正电荷, 使注入电场和 I_{tun} 增大, 同时这些正电荷逐渐消失并且在非注入界面会产生负电荷, 使得 I_{tun} 减小, 同时使栅压的变化放慢. 在持续的 F-N 电流应力下, 电荷被氧化层陷阱俘获,

必须改变栅压来保证通过氧化层的电流不变.

电荷在隧道氧化层中被陷阱俘获的状况直接体现在 SILC 上. 实验得到图 3、图 4, 此时 SILC 随应力的增加而变大, 诱生陷阱的密度也变大, 即诱生陷阱的密度与 SILC 成正比, 并且发现 SILC 对恒流应力大小的依赖大于对时间的依赖, 故有

$$N_T(t) \propto \frac{I_{\text{SILC}}(t)}{A}, \quad (6)$$

A 是隧道氧化层面积, $I_{\text{SILC}}(t)$ 是 t 时刻的 SILC 大小, $N_T(t)$ 是 t 时刻的诱生陷阱密度. 图 7 中, 由诱生陷阱导致的栅压变化与 Q_{inj} 相关, 关系是

$$|\Delta V_G| \propto Q_{\text{inj}} = I_{\text{FN}} \times t, \quad (7)$$

$$|\Delta V_G| \propto N_T(t), \quad (8)$$

ΔV_G 是经过 t 时间的 F-N 应力后的栅压变化量, Q_{inj} 是注入量. 认为正电荷的产生源于隧道氧化层中的空穴陷阱俘获了因碰撞电离产生的空穴和部分获得足够能量后退陷的被俘电荷; 负电荷是由于注入到氧化层中的电子被电子陷阱俘获最终显示负极性^[10]. 但是必须要注意的是在 Q_{inj} 的不同阶段 $N_T(f)$ 所代表的陷阱是不同的, 在注入量较小的时候正电荷陷阱占主导地位, 当注入量大于某个临界值时负电荷陷阱的影响开始增强, 而且这种增强是持续不间断的, 直到失效.

4. 结 论

本文通过对恒流应力下的 SILC 的研究, 提出了一种研究 E^2 PROM 耐久性的方法, 揭示了 E^2 PROM 的薄隧道氧化层在 F-N 隧穿电流下的退化情况及其失效机理. 这种退化由恒流应力大小及其作用时间决定, 是注入电荷密度 (Q_{inj}) 的函数, 并且在较低 Q_{inj} 下氧化层中以正电荷俘获为主, 在较高 Q_{inj} 下以负电荷俘获为主, 导致栅压变化的反复, 负电荷俘获逐渐占优势, 不断增强, 最终使得器件失效.

[1] Park Y B, Schroder D K 1998 *IEEE Transactions on Electron Devices* **45** 1361

[2] Runnion E F, Gladstone S M, Scott R S et al 1997 *IEEE Transactions on Electron Devices* **44** 993

[3] Versari R, Pieracci A, Morigi D et al 2000 *IEEE Transactions on Electron Devices* **47** 1297

[4] Wang T H, Zous N K, Yeh C C 2002 *IEEE Transactions on Electron Devices* **49** 910

[5] Liu Y, Xu Z, Xiao M, Yu Z G, Zhao W B 1998 *Microelectronic Technology* **26** 33 [刘允, 徐征, 肖明, 于宗光, 赵文彬 1998 微电子技术 **26** 33]

[6] Zous N K, Chen Y J, Chin C Y et al 2004 *IEEE Transactions on*

- Electron Devices* **51** 722
- [7] Nkansah F D 2001 *Ph. D. Thesis* (Electrical Engineering Lehigh University) pp23—29
- [8] Linton T D , Blakey P A , Neikirk D P 1992 *IEEE Transactions on Electron Devices* **39** 844
- [9] Witters J S , Groeseneken G , MAES H E 1989 *IEEE Transactions on Electron Devices* **36** 1666
- [10] Yu Z G , Xu Z , Ye S Y , Zhang G H , Huang W , Wang W Y , Xu J Y 2000 *Acta Electronica Sinica* **28** 70 (in Chinese) 于宗光、徐征、叶守银、张国华、黄卫、王万业、许居衍 2000 电子学报 **28** 70]

Degradation of tunnel oxide in E²PROM under constant current stress^{*}

Li Lei-Lei[†] Liu Hong-Xia Yu Zong-Guang Hao Yue

(Key Laboratory of Ministry of Education for Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices ,
School of Microelectronics of Xidian University , Xi'an 710071 , China)

(Received 19 August 2005 ; revised manuscript received 31 October 2005)

Abstract

The degradation of thin tunnel gate oxide under constant Fowler-Nordheim current stress was studied using capacitors. The degradation is a function of constant current and time , which depends more on the magnitude of constant current. Thus the degradation is a strong function of injected charge density Q_{inj} . Positive charge trapping is usually dominant at lower Q_{inj} followed by negative charge trapping at higher Q_{inj} , causing a reversal of gate voltage change.

Keywords : E²PROM , tunnel oxide , degradation , constant current stress

PACC : 7220J , 7300 , 7360

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2004AA1Z1070) and the Major Research Plan of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60376024).

[†] E-mail : LLL225@ yahoo. com. cn