

应力导致的薄栅氧化层漏电流瞬态特性研究*

刘红侠 郝 跃

(西安电子科技大学微电子研究所,西安 710071)

(2001 年 3 月 27 日收到,2001 年 4 月 29 日收到修改稿)

分别研究了 FN 隧穿应力和热空穴(HH)应力导致的薄栅氧化层漏电流瞬态特性.在这两种应力条件下,应力导致的漏电流(SILC)与时间的关系均服从幂函数关系,但是二者的幂指数不同.热空穴应力导致的漏电流中,幂指数明显偏离 -1,热空穴应力导致的漏电流具有更加显著的瞬态特性.研究表明:热空穴 SILC 机制是由于氧化层空穴的退陷阱效应和正电荷辅助隧穿中心的湮没.利用热电子注入技术,正电荷辅助隧穿电流可被大大地减弱.

关键词:薄栅氧化层,应力导致的漏电流(SILC),FN 隧穿,热空穴应力,衬底热电子

PACC:7360H,0710

1 引 言

随着栅氧化层的减薄,应力导致的薄栅氧化层漏电特性目前已经成为 MOS 器件的主要可靠性因素.关于应力导致的漏电问题,目前已经提出了几种机制来解释应力导致的栅氧化层的漏电^[1-3].如正电荷辅助的隧穿,中性陷阱辅助的隧穿和由于势垒高度降低,在 Si/SiO₂ 界面的薄弱区热辅助的隧穿.在各种各样的氧化层应力条件下,热空穴应力导致的氧化层漏电被认为是闪烁 EEPROM 器件中最严重的问题.

目前尽管对应力导致的漏电进行了广泛的调查和研究,但是大部分研究结果是关于 FN(Fowler-Nordham)应力导致的氧化层漏电(stress induced leakage current, SILC),而且这些结果现在不尽相同,有些甚至互相矛盾. Dimaria 通过研究指出,正氧化层电荷在 FN 应力导致的漏电流中没有贡献^[4].与此相反, Teramoto 的实验结果表明, FN 应力导致的漏电流来源于高能电子产生的热空穴注入^[5]. Dumin 发现 FN 应力导致的漏电流包含瞬态成分和直流成分^[6]. Kato 通过实验证明了 SILC 使阈值电压漂移了 0.1 V^[7].

通过上述分析可以看出,对于 FN 应力产生的氧化层漏电问题仍然没有定论^[8],而对于热空穴 HH(hot hole)应力产生的氧化层漏电问题无论是国际

还是国内却研究的很少.本文分别对 FN 和 HH 应力导致的氧化层漏电进行了研究,研究了在这两种应力状态下漏电流的瞬态特性.研究结果指出 HH 应力下的 SILC 瞬态特性与 FN 应力下的 SILC 瞬态特性相似,即同样服从幂函数关系,但是幂指数不同,表现在双对数坐标系中为曲线的斜率不同.而且 HH 应力导致的总的瞬态电荷量明显大于 FN 应力导致的总的瞬态电荷量.这表明 HH 应力导致的漏电流机制不同于 FN 应力下的漏电流机制.研究结果表明,在 HH 应力条件下, SILC 的瞬态特性是由于氧化层空穴的退陷阱效应和正电荷辅助隧穿中心的湮没.利用热电子注入技术,正电荷辅助的隧穿电流(positive charge assisted tunneling, PCAT)可以被大大地减弱.

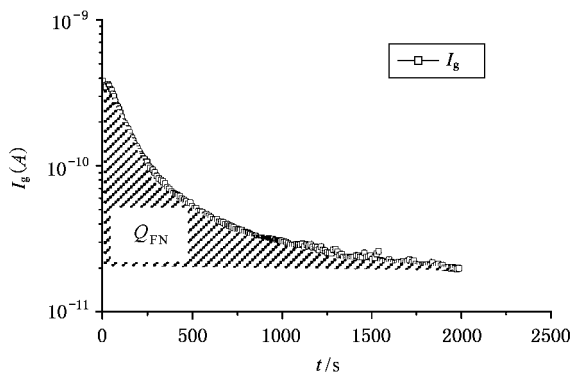
2 FN 应力下的 SILC 瞬态特性

实验样品所用器件是采用无锡华晶集团的 0.8 μm 硅栅 CMOS 工艺制造的表面沟道 NMOS 器件,掩埋沟道长度为 0.8 μm ,沟道宽度为 50 μm .栅氧化层厚度为 10 nm.

FN 应力的条件如下, $V_{gs} = -10 \text{ V}$, $V_s = V_d = V_{sub} = 0 \text{ V}$, $t = 3600 \text{ s}$.对于上述施加应力后的实验样品,测量其瞬态特性,测量条件如下, $V_{gs} = 5 \text{ V}$, $V_s = V_d = V_{sub} = 0 \text{ V}$.实验结果见图 1(a).从图 1(a)可见,

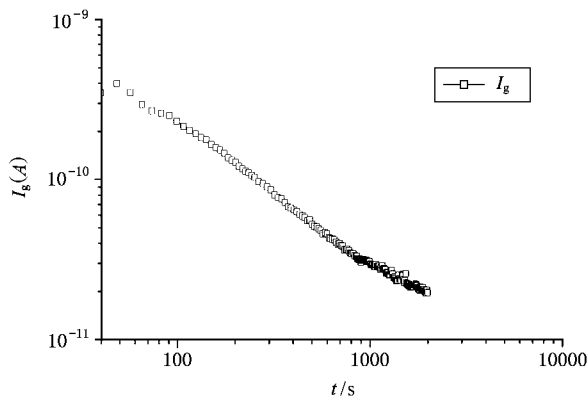
* 国家高技术研究发展计划(批准号 863-SOC-Y-3-6-1)资助的课题.

对于 FN 应力后的样品,其瞬态电流在 $t = 0$ 时, $I_g = 382 \text{ pA}$, 当 $t = 1995 \text{ s}$ 时, 瞬态电流的泄放达到饱和, $I_g = 20 \text{ pA}$. 其中 FN 应力后的 I_g-t 曲线阴影部分面积代表 FN SILC 中流到栅氧化层的总瞬态电流, 采用符号 Q_{FN} 表示. 把上述曲线画在双对数坐标系中,



(a) 半对数坐标系

如图 1(b) 所示. 即在双对数坐标系中, $\log I_g - \log t$ 曲线呈现线性关系. 这表明 I_g-t 之间符合幂指数函数关系. 即 $I_g(\text{FN}) \propto t^{-b}$. 通过拟合可以得出幂指数 $b = 0.9$.



(b) 双对数坐标系

图 1 FN 应力导致的薄栅氧化层栅电流瞬态特性

载流子的遂穿可以通过遂穿前位置的移动来获得. 载流子遂穿前的位置可以利用数学表达式来描述, 即

$$x(t) = (1/2\beta) \times \ln(t/t_0). \quad (1)$$

$x(t)$ 是遂穿前的位置, 与时间 t 有关. β 是遂穿常数, t_0 是遂穿过程的时间特征参数. 资料显示, β 是电场的函数^[9,10].

随着载流子遂穿通过栅氧化层位置的移动, 与陷阱放电相联系的电流可以表示为

$$I(t) = nqvA = N(x(t)) \cdot q \cdot dx/dt \cdot A. \quad (2)$$

$I(t)$ 是应力电压移去后的电流的瞬态值, A 是电容面积, $n = N(x(t))$ 是氧化层中的陷阱密度. q 是一个电子的电荷量, $v = dx/dt$ 是载流子遂穿位置移动的速度. 对 (1) 式进行微分可以得到电压应力移去后, 瞬态电流随着时间的依赖关系,

$$I(t) = (N(x(t)))qA)(2\beta t). \quad (3)$$

从上式可见, 应力电压移去后的瞬态电流值和氧化层中的陷阱密度数量成正比, 和时间成反比. 通常, 可以近似认为氧化层中的陷阱密度是均匀分布, 则应力电压移去后的瞬态电流与时间成倒数关系. 这从理论上证明我们的研究结果是正确的.

利用栅电流的瞬态值对时间的积分, 即图 1(a) 中曲线下阴影部分的面积, 可以计算出 FN 应力下, SILC 流入栅中的总电荷量 $Q_{\text{FN}} = 0.185 \text{ C/cm}^2$.

3 HH 应力下的 SILC 瞬态特性

目前研究的最多的 FN 应力下的 SILC 瞬态特性, 而对于 HH 应力下导致的 SILC 瞬态特性却很少研究. 本文研究了 HH 应力下的 SILC 瞬态特性, 实验样品与 FN 应力下所用的样品相同.

HH 应力的条件如下, $V_g = -5 \text{ V}$, $V_d = 8 \text{ V}$, $V_s = V_{\text{sub}} = 0 \text{ V}$, $t = 3600 \text{ s}$. 对于上述施加应力的实验样品, 测量其瞬态特性, 测量条件如下, $V_g = 5 \text{ V}$, $V_s = V_d = V_{\text{sub}} = 0 \text{ V}$. 实验结果见图 2(a). 从图 2(a) 可见, 对于 HH 应力后的样品, 其瞬态电流在 $t = 0$ 时, $I_g = 683 \text{ pA}$, 当 $t = 3561 \text{ s}$ 时, 瞬态电流的泄放达到饱和, $I_g = 64 \text{ pA}$. 同样, 用 HH 应力后 I_g-t 曲线阴影下的面积代表 HH SILC 中流到栅氧化层的总瞬态电流, 用符号 Q_{HH} 表示. 把上述曲线画在双对数坐标系中, 如图 2(b) 所示. 同样, 施加 HH 应力后, 在双对数坐标系中, $\log I_g - \log t$ 曲线呈现线性关系. 这表明 HH 应力后的 I_g-t 之间符合幂指数函数关系. 即 $I_g(\text{HH}) \propto t^{-b}$. 通过拟合可以得出幂指数 $b = 0.6$. 利用栅电流的瞬态值对时间的积分, 即图 2(a) 中曲线下阴影部分的面积, 可以计算出 HH 应力下, SILC 流入栅中的总电荷量 $Q_{\text{HH}} = 0.815 \text{ C/cm}^2$.

通过上述 FN 隧穿应力和 HH 应力两个实验的

对比,可以明显看出二者的不同.对于 FN 应力实验 $\log I_g - \log t$ 曲线的斜率为 -0.9 ,接近于 -1 .与通常文献的研究结果相似.而 HH 应力实验中 $\log I_g - \log t$ 曲线的斜率为 -0.6 ,明显偏离 -1 .这表明 HH 应力实验中,瞬态电流的泄放速率较慢.另一方面,HH 中

SILC 表现出更加明显的瞬态特性.HH 应力的瞬态电流的初始值为 $I_g = 683 \text{ pA}$,而 FN 应力的瞬态电流的初始值为 $I_g = 382 \text{ pA}$,从实验的测量和计算结果可知, $Q_{\text{HH}} > Q_{\text{FN}}$,这表明 HH 中 SILC 一定有另外的漏电流机制在起作用.

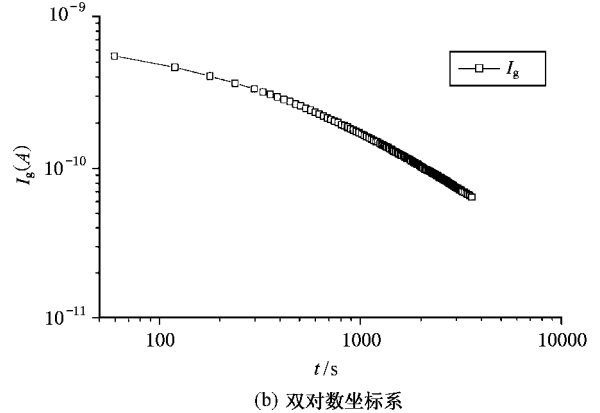
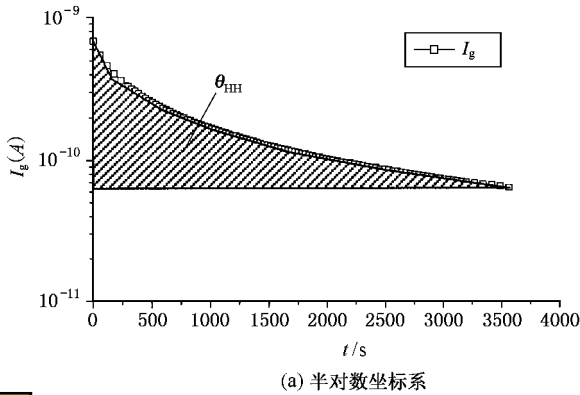


图 2 HH 应力导致的薄栅氧化层栅电流瞬态特性

4 结果讨论

为了解释 HH SILC 不同于 FN SILC 的新特点,提出了 HH SILC 的物理机制.FN 应力和 HH 应力后的薄栅氧化层 SILC 瞬态过程如图 3 所示.FN 应力实验的偏置条件为 $V_{\text{gs}} = -10 \text{ V}$, $V_{\text{s}} = V_{\text{d}} = V_{\text{sub}} = 0$

$V_{\text{d}}, t = 3600 \text{ s}$.栅为反向偏置,在这样的偏置条件下,电子可以通过隧穿进入栅氧化层中.应力结束后,测量条件如下, $V_{\text{gs}} = 5 \text{ V}$, $V_{\text{s}} = V_{\text{d}} = V_{\text{sub}} = 0 \text{ V}$.此时,陷入氧化层的电子会在栅氧化层正电场的作用下,由于退陷阱效应而重新进入栅,形成电子电流 I_e ,被栅收集,如图 3(a)所示.

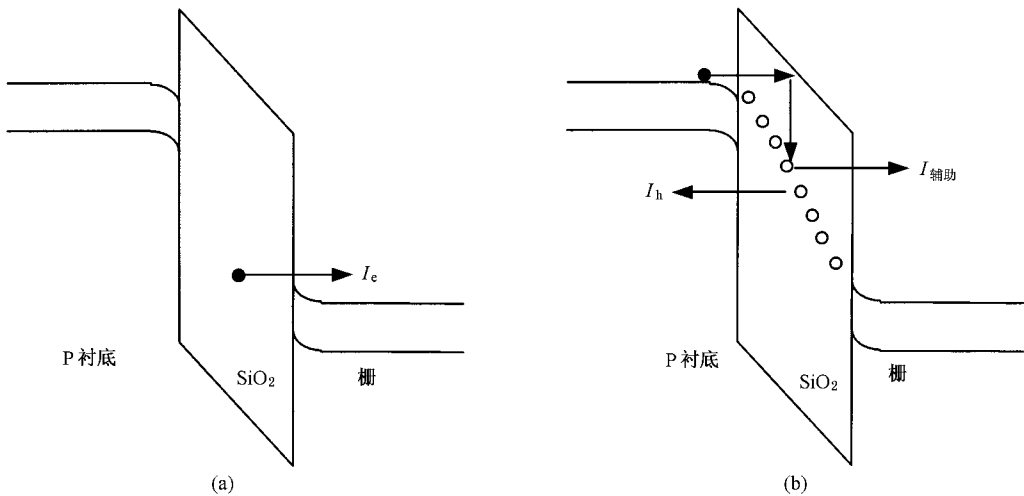


图 3 FN 应力和 HH 应力后的薄栅氧化层 SILC 瞬态过程示意图

对于 HH SILC 效应,研究认为 HH SILC 由两部分组成,其中一部分漏电流是和空穴陷阱相关的放电电流 I_h .另外一部分是正电荷辅助的电子隧穿电

流 I_{assist} .HH 应力实验的偏置条件为, $V_{\text{gs}} = -5 \text{ V}$, $V_{\text{d}} = 8 \text{ V}$, $V_{\text{s}} = V_{\text{sub}} = 0 \text{ V}$, $t = 3600 \text{ s}$.在这样的偏置条件下,漏端和衬底 pn 结的反向偏置会产生很强的

电场,从而产生大量的电子空穴对,栅漏之间的电场有利于漏端产生的热空穴注入栅氧化层,被氧化层陷阱俘获.经过长时间的应力($t = 3600$ s)氧化层陷阱的填充基本达到饱和.应力结束后进行测量,测量条件如下, $V_{gs} = 5$ V, $V_s = V_d = V_{sub} = 0$ V.在上述的测量条件下,栅电极正向偏置,被陷阱俘获的热空穴由于退陷阱效应形成与空穴陷阱相关的放电电流 I_h .另外一部分是正电荷辅助的电子隧穿电流 I_{assist} .对于 $Q_{HH} > Q_{FN}$ 的这一部分电荷,则对应于电子隧穿电流 I_{assist} . I_{assist} 的瞬态效应来源于正氧化层电荷帮助电子隧穿通过氧化层,而在测量瞬态电流的过程中,这些正电荷隧穿进入 Si 衬底,被 Si 衬底所收集.

为了验证 HH SILC 的正电荷辅助的隧穿电流机制,对中性正电荷辅助的隧穿电流中心进行衬底热电子 SHE (substrate hot electron) 注入.注入条件为 $V_{gs} = 5$ V, $V_{sub} = -6$ V, $V_s = V_d = 0$ V, $t = 600$ s.由于衬底注入电流相对较大,通过注入电子的复合或者补偿,正氧化层电荷被中和. HH SILC 中正电荷的中和效应见图 4.衬底电子填充后,很大的 HH SILC 瞬态电流被大幅度减少,填充后的稳态电流大约为

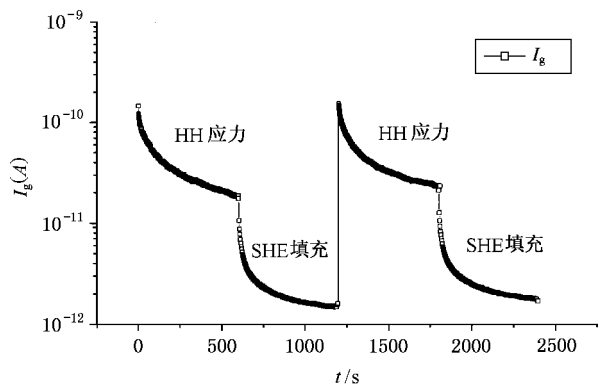


图 4 HH SILC 栅电流瞬态特性和 SHE 填充效应

1.5 pA. 再一次施加 HH 应力,则 HH SILC 重新出现.把 HH 应力和 SHE 应力的填充过程重复两个周期,值得注意的是在这两个周期的重复过程中,经过了两次 SHE 填充后, I_g-t 曲线并没有观察到明显的不同.可见 SHE 填充本身并没有引入额外的陷阱.

5 结 论

随着栅氧化层的逐渐减薄,应力导致的薄栅氧化层漏电特性已经成为限制小尺寸 MOS 器件的主要可靠性因素.本文分别对 FN 和 HH 应力导致的氧化层漏电进行了研究,研究了在这两种应力状态下漏电流的瞬态特性.研究结果指出,无论是 FN 应力还是 HH 应力,其漏电流的瞬态特性 (I_g-t 曲线) 都服从幂函数关系,反应在双对数坐标系中为线性关系,但是二者的斜率有着明显的不同,在 FN 应力条件下, I_g-t 曲线的斜率为 -0.9 , 接近 -1 . 这与文献中的研究结果是一致的.而在 HH 应力条件下, I_g-t 曲线的斜率偏离 -1 , 大约只有 -0.6 . 这表明 FN 应力条件下瞬态电流的泄放速率大于 HH 应力条件下瞬态电流的泄放速率.而且在这两种应力条件下,流入栅氧化层的总的瞬态电荷量有着显著的不同. HH 应力导致的总的瞬态电荷量明显大于 FN 应力导致的总的瞬态电荷量.这表明 HH 应力导致的漏电流机制不同于 FN 应力下的漏电流机制.通过比较这两种漏电流的瞬态特性,指出在 HH 应力条件下, SILC 的瞬态特性是由于氧化层空穴的退陷阱效应和正电荷辅助隧穿中心的湮没. HH 应力后,利用衬底热电子注入技术,正电荷辅助的隧穿电流漏电流可以被大大减弱.

[1] J. Maserjian, N. Zamani, *J. Vac. Sci. Tech.*, **20**(1992), 743.
 [2] R. Ofan, C. Hu, *IEEE Electron Device Lett.*, **12**(1991), 632.
 [3] P. Olivio, T. Nguyen, B. Ricco, *IEEE Trans. Electron Device*, **35**(1988), 2259.
 [4] D. J. Dimaria, E. Cartier, *J. Appl. Phys.*, **78**(1995), 3883.
 [5] A. Teramoto, K. Kobayashi et al., *Proc. Int. Reliability Phys. Symp.*, 1996, 113.
 [6] D. J. Dumin, J. Maddux, *IEEE Trans. Electron Device*, **40**(1993), 986.

[7] M. Kato, N. Miyamoto, H. Kume, et al., *IEDM Tech. Dig.*, 1994, 45.
 [8] H. X. Liu, Y. Hao, *Acta Physica Sinica*, **49**(2000), 1163 [in Chinese] 刘红侠,郝跃, *物理学报*, **49**(2000), 1163.
 [9] T. R. Oldham, A. J. Lelis, F. B. Mclean, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **33**(1986), 1203.
 [10] D. P. Wong, D. J. Dumin, *Mat. Res. Society Symp. Proc.*, 1993, 284.

STUDY ON STRESS INDEUCED LEAKAGE CURRENT TRANSIENT CHARACTERISTICS IN THIN GATE OXIDE*

LIU HONG-XIA HAO YUE

(*Institute of Microelectronics , Xidian University , Xi 'an 710071 , China*)

(Received 27 March 2001 ; revised manuscript received 29 April 2001)

ABSTRACT

FN tunneling and hot hole (HH) stress induced leakage current (SILC) transient characteristics in thin gate oxide are investigated. Under both stress conditions , the stress induced leakage current obeys a power-law time dependence with different power factor. For HH SILC , the power factor significantly departs from -1 . HH SILC is found to have a more pronounced transient effect. The results show that HH SILC can be attributed to positive oxide detrapping and annihilation of positive charge-assisted tunneling current. The latter can be diminished by substrate hot electron injection.

Keywords : thin gate oxide , stress induced leakage current (SILC) , FN tunneling , hot hole stress , substrate hot electron

PACC : 7360H , 0710

* Project supported by the National High Technology Development Program of China (Grant No. 863-SOC-Y-3-6-1).