

# 恒压应力下超薄栅 nMOSFET 软击穿后的 衬底电流特性\*

王彦刚 许铭真 谭长华 段小蓉

(北京大学微电子学研究所, 北京 100871)

**摘要:** 研究了在恒压应力下超薄栅 nMOSFET 软击穿后的衬底电流特性. 软击穿时间由衬底电流随时间的弛豫特性和器件输出特性测量时监测的衬底电流突变确定. 发现软击穿时间的威布尔斜率和衬底特征击穿电流随温度的升高而增大. 用类渗流模型模拟了软击穿后衬底电流与栅电压的关系. 利用变频光泵效应讨论了超薄栅 MOSFET 低电压应力下衬底电流的来源, 并解释了软击穿后衬底电流和栅电流之间的线性关系.

**关键词:** 衬底电流; 软击穿; 超薄栅氧化层; 威布尔分布; 变频光泵效应

EEACC: 2520E; 2810D

中图分类号: TN386 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2005)05-0999-06

## 1 引言

20 世纪 90 年代, 日本的 Okada 等人定义了 6nm 以下 MOSFET 栅氧化层的软击穿 (SBD) 事件<sup>[1]</sup>. 之后, 软击穿成为栅氧化层可靠性研究的焦点, 其中软击穿时器件参数的统计分析及其软击穿后器件常规特性的变化是该领域较为活跃的研究课题<sup>[2-6]</sup>. 研究者普遍认为软击穿是局部的氧化层失效, 在恒压应力下表现为栅氧化层漏电流 ( $I_g$ ) 的突变. 近来有人发现, 恒压应力下 nMOSFET 的衬底电流 ( $I_{sub}$ ) 也存在突变现象<sup>[5]</sup>, 从而为判定及分析软击穿现象提供了新的思路.

近年来, 有关 MOSFET 衬底电流的研究取得了很大进展. 本世纪初期, 孙自敏<sup>[7]</sup>, Li<sup>[8]</sup> 和 Gao<sup>[9]</sup> 等人分别提出了改进的深亚微米尺寸下 MOSFET 衬底电流模型; 其后, Chen 等人研究了衬底电流和氧化层击穿的关系<sup>[10]</sup>; Crupi 等人首次探讨了恒压应力下栅氧化层软击穿后栅电流与衬底电流的关系以及衬底电流的  $I-V$  特性<sup>[5]</sup>.

本文通过超薄栅氧化层 nMOSFET 的恒压应力实验, 对栅氧化层软击穿时间 ( $t_{BD}$ ) 和击穿时的衬底电流变化量 ( $I_{sub(SBD)}$ ) 进行了统计分析, 并对软击穿后的  $I_{sub(SBD)}-V_g$  曲线进行了理论分析, 另外还讨论了超薄栅 MOSFET 低电压应力下衬底电流的起源和软击穿后衬底电流与栅电流的关系.

## 2 实验

实验样品是由标准 CMOS 工艺制造的 nMOSFET, 栅氧化层厚度为 2nm, 面积为  $1.89 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$ . 实验时, 样品栅极加恒定电压 ( $CVS \quad V_g = -3.6V$ ), 源、漏及衬底接地. 器件特性由 HP4145B 半导体参数分析仪测量, 实验在 300 ~ 398 K 的温度之间进行, 实验过程中周期性地中断应力以测量器件的常规特性, 统计实验样品的个数在 10 ~ 15 之间.

## 3 结果和讨论

### 3.1 软击穿时间的判定

恒压应力下衬底电流的时间特性如图 1 所示.

\* 国家重点基础研究专项经费资助项目 (批准号: TG2000-036503)

王彦刚 男, 博士研究生, 主要从事超薄栅 MOS 器件栅氧化层可靠性的研究.

许铭真 女, 教授, 主要从事小尺寸 MOS 器件特性及其表征、半导体材料可靠性物理和器件可靠性物理的研究.

谭长华 男, 教授, 主要从事小尺寸器件物理及可靠性物理的研究.

2004-07-23 收到, 2004-09-10 定稿

人们一般利用栅电流的突增判定栅氧化层的软击穿,并把栅电流突增的前一时刻作为击穿时间.然而 Crupi 等人发现,软击穿时 nMOSFET 的衬底电流变化量 ( $I_{sub(SBD)}$ ) 比栅电流变化量 ( $I_{g(SBD)}$ ) 大两个数量级,因而可以利用  $I_{sub(SBD)}$  监控软击穿事件<sup>[5]</sup>.但是,有时软击穿时的电流跳变并不明显,击穿前较大的应力诱导漏电流 (SILC) 及较强的噪声会影响击穿时间的确定.因此,单纯利用电流 ( $I_{sub}$  或  $I_g$ ) 跳变来判定软击穿比较困难并可能产生误差.近来提出的噪声判断方法是辅助电流(电压)跳变判定软击穿事件的一个有效手段<sup>[11]</sup>.

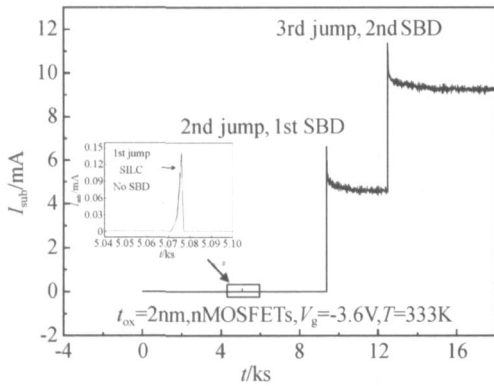


图 1 333 K 恒压应力下衬底电流随时间的变化  
Fig.1 Evolution of the substrate current at 333 K under CVS

为了更准确地判定软击穿,本文结合  $I_{sub}$  突变和器件输出特性测量时监测的  $I_{sub}-V_d$  曲线的突变来确定软击穿.定义  $I_{sub}$  的相对变化量比率为  $\Delta I_{sub(SBD)} / I_{sub(0)}$ ,图 1 样品的第一次电流突变时(图 1 插图),  $\Delta I_{sub} = 106$ ,第二次和第三次电流突变时,  $\Delta I_{sub} = 32$ ,  $\Delta I_{sub} = 1.33$ .图 2 为软击穿前后的  $I_{sub}-V_d$  特性,软击穿前(图 2(a))  $I_{sub}$  随漏电压增大而增加,而软击穿后(图 2(b))  $I_{sub}$  几乎与漏电压无关.如果某一次衬底电流突变前后测量的  $I_{sub}-V_d$  特性分别如图 2(a)和(b)所示,则认为该衬底电流的突变对应着栅氧化层的软击穿.软击穿前  $I_{sub}$  与  $V_d$  的关系可以用下式表示<sup>[12]</sup>:

$$I_{sub} = I_d (V_d - V_{dsat}) \exp\left[-\frac{B I_d}{V_d - V_{dsat}}\right]$$

其中  $I_d$  是漏电流; $V_{dsat}$ 是饱和漏电压; $l_d$ 是夹断区长度; $B$ 是与工艺相关的常数.随着  $V_d$  的增大, $I_{sub}$  迅速增大;随着  $V_g$  的增大, $I_{sub}$  减小(图 2(a)).但栅氧化层软击穿后形成了连接栅极和衬底的低阻通道,栅电流由该通道直接流向衬底,电流大小只与栅

电压有关而受漏电压的影响较小(图 2(b)).用以上方法,可以分辨某些小的  $I_{sub}$  突变是否对应着软击穿的发生.图 1 的第一次电流突变前后, $I_{sub}-V_d$  曲线形状没有发生变化,尽管此时的  $\Delta I_{sub}$  较大,但是栅氧化层仍然没有发生软击穿,瞬间的大电流对应着 SILC 的增大,而后两次的电流突变是由于软击穿引起的,因为  $I_{sub}-V_d$  曲线形状发生了变化.

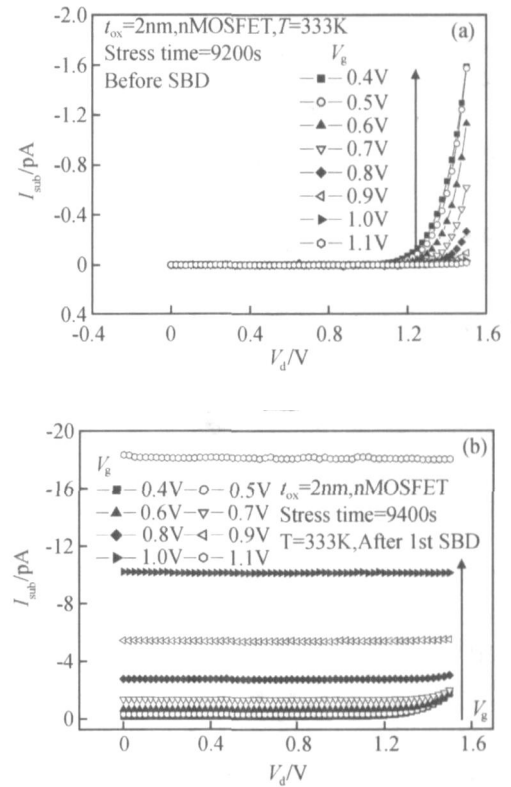


图 2 333 K nMOSFET 栅氧化层软击穿前(a)和后(b)的  $I_{sub}-V_d$  特性  
Fig.2 Characteristics of  $I_{sub}-V_d$  before (a) and after (b) nMOSFET gate oxide SBD at 333 K

### 3.2 软击穿后器件特性分析

图 3 是恒压应力下结合  $I_{sub}$  突变和  $I_{sub}-V_d$  曲线变化得到的第一次软击穿时间  $t_{BD}$  的威布尔分布图,威布尔斜率  $m$  随温度的升高而增大.这是因为栅氧化层击穿是缺陷产生、积累并逐步形成连接两极低阻通道的过程,高温下,缺陷产生加快,加速了栅氧化层的退化使得  $t_{BD}$  减小并趋向集中.

相同应力条件下第一次软击穿时的  $I_{sub(SBD)}$  的威布尔分布如图 4 所示,实验发现特征击穿电流 ( $63\% I_{sub(SBD)}$ ) 随实验温度的升高而增大,这一结果与文献[4]的报道不同.可能的原因是高温下击穿

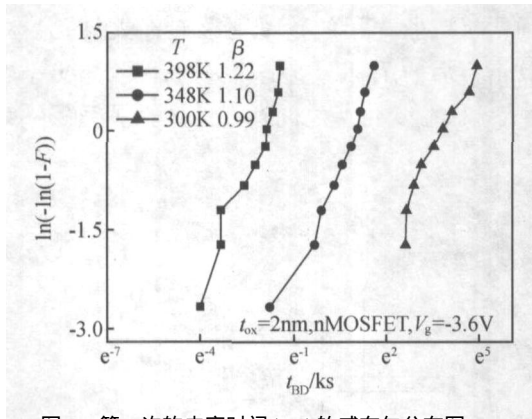


图 3 第一次软击穿时间 ( $t_{BD}$ ) 的威布尔分布图

Fig. 3 Weibull distribution of the first time to soft breakdown ( $t_{BD}$ )

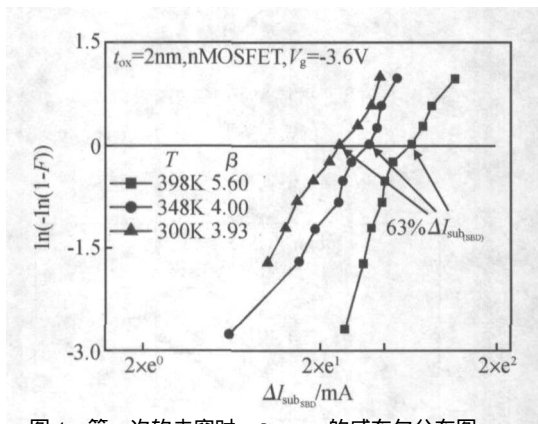


图 4 第一次软击穿时  $I_{sub(SBD)}$  的威布尔分布图

Fig. 4 Weibull distribution of the  $I_{sub(SBD)}$  for the first SBD

点面积变大,导致产生比低温时更大的泄漏电流,使得特征击穿电流增大。

图 5(a) 是恒压应力下软击穿前后样品的  $I_{sub}-V_g$  特性。软击穿后,低栅压区衬底电流迅速增大,电流与栅压近似成幂函数关系,而高栅压区电流与栅压近似成指数关系。我们引入类渗流导电(percolation-like conduction, PLC)模型来描述衬底电流与栅电压的关系:

$$I_{sub} = a/V_g/b \exp(c/V_g)$$

参数  $a$  反映软击穿前衬底电流大小;参数  $b$  称为微分电导;参数  $c$  是与势垒高度和电子有效质量相关的隧穿几率。在实验电压范围内,该模型可以很好地符合实验数据。图 5(b) 给出应力电压为  $-3.6V$ ,实验温度为  $333K$  时,两次软击穿后  $I_{sub}-V_g$  曲线的模拟结果,两次软击穿后  $I_{sub}-V_g$  曲线的模型参数  $a$  分别为  $4 \times 10^{-4}$  和  $8 \times 10^{-4} A$ ,而  $b$  和  $c$  分别相同( $b =$

$6, c = -1.5$ ),这说明两次软击穿后衬底电流的机制相同。

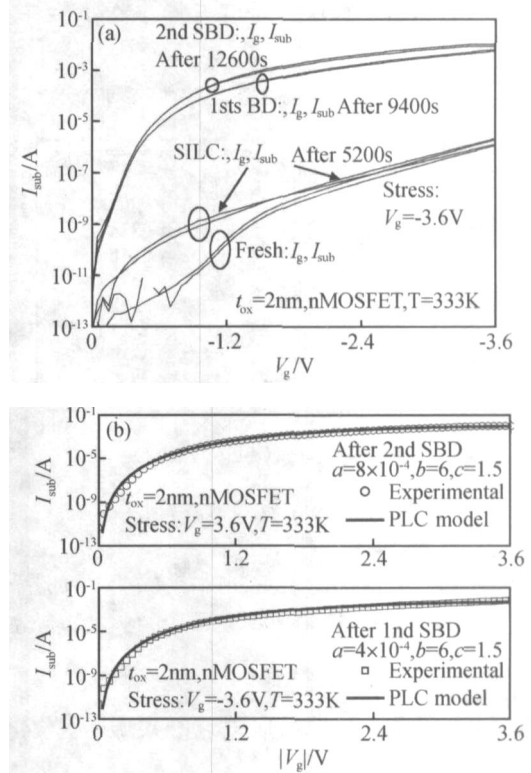


图 5 (a) 333 K 恒压应力下,软击穿前、后 nMOSFETs 的  $I_{sub}-V_g$  特性;(b) 333 K 软击穿后的  $I_{sub}-V_g$  特性

Fig. 5 (a)  $I_{sub}-V_g$  characteristics of nMOSFETs before and after SBDs under CVS at 333 K;(b)  $I_{sub}-V_g$  characteristics after SBDs at 333 K

相同电应力条件 ( $-3.6V$ ),  $300 \sim 398K$  温度下的 nMOSFET 第一次软击穿后衬底电流随栅电压变化的实验和模拟结果如图 6。各实验温度下模拟参数如表 1 所示。在  $333 \sim 398K$  温区,参数  $b$  和  $c$  相同,说明在这个温度区第一次软击穿后衬底电流的机制是相同的,  $300K$  的结果有待进一步研究。在本文的实验中,软击穿后测量的衬底电流与栅电压

表 1  $300 \sim 398K$  温度下,栅氧化层第一次软击穿后  $I_{sub}-V_g$  特性的模型参数

Table 1 Modeling parameters of  $I_{sub}-V_g$  after the first gate oxide SBD for  $300 \sim 398K$

T/ K	a	b	c
300	$9 \times 10^{-3}$	4	- 1.5
333	$4 \times 10^{-4}$	6	- 1.5
348	$4 \times 10^{-4}$	6	- 1.5
378	$5 \times 10^{-4}$	6	- 1.5
398	$6 \times 10^{-4}$	6	- 1.5

的关系与模拟曲线吻合得很好,从而提供了另一种判定软击穿事件的方法,即利用衬底电流与栅电压关系判定软击穿,该方法的可行性正在进一步地验证.

小,而阴极吸收光子的数量则影响着  $I_{sub}$  的大小.因此,软击穿后的  $I_g$  和  $I_{sub}$  是相关的,图 8 给出了软击穿后  $I_g$  和  $I_{sub}$  变化量之间存在的线性关系.

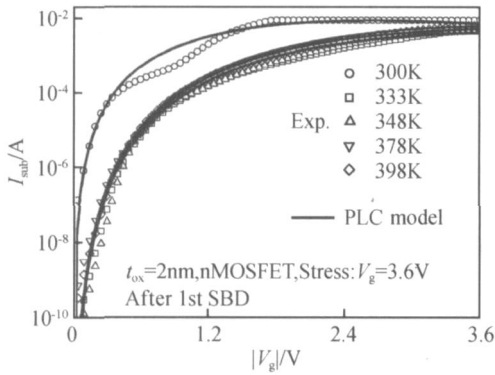


图 6 300 ~ 398 K 温度下栅氧化层第一次软击穿后  $I_{sub}$ - $V_g$  特性的实验和模拟结果

Fig. 6 Experiments and simulations of  $I_{sub}$ - $V_g$  characteristics after the first SBD for 300 ~ 398 K temperature region

### 3.3 超薄栅 MOS 器件衬底电流的来源

低压下,阴极电子隧穿到达阳极后所释放的能量不能打断氧化层中的弱键而形成缺陷,已有的阳极空穴注入(AHI)和价带电子隧穿的衬底电流模型将不再适用<sup>[13]</sup>.超薄栅下的衬底电流具有新的机制,Crupi 等用 FN 电流机制模拟了软击穿后的衬底电流,但没有解释衬底电流的形成<sup>[15]</sup>.

本文采用变频光泵效应<sup>[14]</sup>(variable frequency light pumping effect, VFLP)解释恒压应力下超薄栅 MOSFET 衬底电流的形成过程.图 7 是 VFLP 的能带简图:电子  $e_1$  由阴极通过直接隧穿到达 MOS 结构的阳极,当该电子落入阳极的导带时,发射出光子,其能量为  $h_1$ ;其后,发射光子的一部分被阴极吸收并产生电子-空穴对,空穴流向衬底形成  $I_{sub}$ .而产生的二次电子将在阴极导带上方  $h_1 - E_g$  的高度处再次发生隧穿,此时的二次电子将加强  $I_g$  并在阳极产生相应的二次光子  $h_2 = 2h_1 - E_g$ ,二次光子再次被阴极吸收后产生的新生空穴又加强了  $I_{sub}$ .该过程将一直持续下去,从而使得电子具有足够的能量打破 Si-O 键产生界面缺陷和体缺陷.缺陷的增多将形成连接两极的导电通道而造成氧化层的击穿,同时产生的多级电子和空穴被两极收集形成更大的  $I_g$  和  $I_{sub}$ .隧穿电子的多少决定了  $I_g$  的大

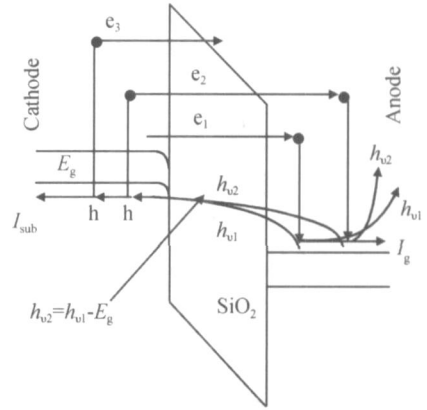


图 7 变频光泵效应(VFLP)的能带简图

Fig. 7 Energy band diagram illustrating the VFLP

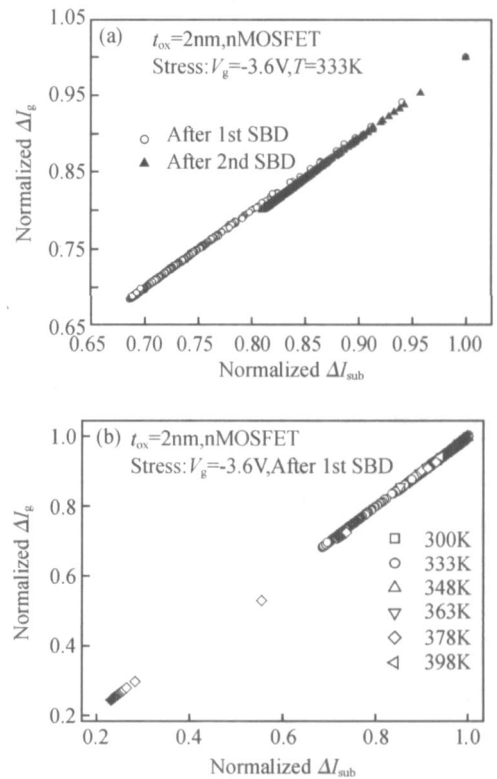


图 8 软击穿后,规一化栅电流变化量( $I_g$ )和规一化衬底电流变化量( $I_{sub}$ )的线性关系 (a) 333 K,第一次和第二次软击穿后;(b) 300 ~ 398 K,第一次软击穿后

Fig. 8 Linear relation between normalized  $I_g$  and normalized  $I_{sub}$  after the first SBD and the second SBD at 333 K (a) and after the first SBD at 300 ~ 398 K (b)

## 4 结论

恒定电压应力下, nMOSFET 的衬底电流在栅氧化层软击穿时具有明显的突变现象, 根据衬底电流的突变和应力后测量器件输出特性时监测到的  $I_{\text{sub}}-V_{\text{d}}$  特性的变化可以判定软击穿事件. 由该方法得到的第一次软击穿时间及第一次软击穿时的衬底电流变化量均服从威布尔分布. 击穿时间的威布尔分布斜率随实验温度的增加意味着高温加强了器件的退化, 使得击穿时间更加集中; 高温下衬底特征击穿电流的增大可能是由于击穿点面积的增大引起泄漏电流增加. 采用类渗流导电模型能够较好的模拟软击穿后的  $I_{\text{sub}}-V_{\text{g}}$  特性, 用变频光泵效应解释了软击穿后的衬底电流与栅电流之间的线性关系.

致谢 感谢摩托罗拉公司提供了测试样品.

## 参考文献

- [ 1 ] Okada K, Kawasaki S, Hirofujii Y. New experiment findings on stress induced leakage current of ultra thin silicon dioxides. *Int Confon Solid State Devices and Materials*, 1994 :565
- [ 2 ] Depas M, Nigam T, Heyns M M. Soft breakdown of ultra-thin gate oxide layers. *IEEE Trans Electron Devices*, 1996, 43(9) : 1499
- [ 3 ] Sune J, Wu E Y, Jimenez D, et al. Statistics of soft and hard breakdown in thin SiO<sub>2</sub> gate oxides. *Microelectronics Reliability*, 2003, 43(8) :1185
- [ 4 ] Lin W H, Pey K L, Dong Z, et al. The statistical distribution of percolation current for soft breakdown in ultrathin gate oxide. *IEEE Electron Device Lett*, 2003, 24(5) :336
- [ 5 ] Crupi F, Degraeve R, Groeseneken G, et al. On the properties of the gate and substrate current after soft breakdown in ultrathin oxide layers. *IEEE Trans Electron Devices*, 1998, 45(11) :2329
- [ 6 ] Wu E Y, Stathis J H, Han L K. Ultra-thin oxide reliability for ULSI applications. *Semicondor Science Technology*, 2003, 15 : 425
- [ 7 ] Sun Zimin, Liu Litian, Li Zhijian. Modification of MOSFET's substrate current model in deep submicrometer regime. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2000, 21(2) : 151 (in Chinese) [孙自敏, 刘理天, 李志坚. MOSFET 衬底电流模型在深亚微米尺寸下的修正. *半导体学报*, 2000, 21(2) :151]
- [ 8 ] Li Wei, Yuan J S, Chetlur S, et al. An improved substrate current model for deep submicron MOSFETs. *Solid State Electron*, 2000, 44 :1985
- [ 9 ] Gao X, Liou J J, Bernier J, et al. An improved model for substrate current of submicron MOSFETs. *Solid State Electron*, 2002, 46 :1395
- [ 10 ] Chen I C, Holland S, Young K K, et al. Substrate hole current and oxide breakdown. *Appl Phys Lett*, 1986, 49(11) :669
- [ 11 ] Alers GB, Weir B E, Frei M R, et al. J-Ramp on sub-3nm dielectrics: noise as breakdown criterion. *IEEE IRPS*, 1999 :410
- [ 12 ] Hu C, Tam S C, Hsu F C, et al. Hot-electron induced MOSFET degradation-model, monitor and improvement. *IEEE Trans Electron Devices*, 1985, 32(2) :375
- [ 13 ] Shuegraf K F, Hu C. Metal-oxide-semiconductor field-effect-transistor substrate current during Fowler-Nordheim tunneling stress and silicon dioxide reliability. *J Appl Phys*, 1994, 76(6) :3695
- [ 14 ] Xu Mingzhen, Tan Changhua, Li Mingfu. Extended Arrhenius law of time-to-breakdown of ultrathin gate oxides. *Appl Phys Lett*, 2003, 82 :2482

## Substrate Current Characteristics After Soft Breakdown in Ultra-Thin Gate Oxide nMOSFETs Under Constant Voltage Stress<sup>\*</sup>

Wang Yangang, Xu Mingzhen, Tan Changhua, and Duan Xiaorong

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

**Abstract:** The characteristics of the substrate current ( $I_{\text{sub}}$ ) after soft breakdown (SBD) in ultra-thin gate oxide nMOSFETs are studied under constant voltage stress. The time to soft breakdown ( $t_{\text{BD}}$ ) is obtained by the relaxation characteristics of the  $I_{\text{sub}}$  with time and by monitoring the breaks of the  $I_{\text{sub}}$  when measuring the output characteristics. It is found that both the Weibull slopes of  $t_{\text{BD}}$  and the characteristic  $I_{\text{sub(SBD)}}$  (63%  $I_{\text{sub(SBD)}}$ ) increase with increasing test temperature. Furthermore, a percolation like conduction model is proposed to simulate the characteristics of the  $I_{\text{sub}}$  versus the gate voltage after SBDs. The origin of the  $I_{\text{sub}}$  and the linear relation between  $I_{\text{sub}}$  and  $I_{\text{g}}$  after SBD are discussed by the variable frequency light pumping effect.

**Key words:** substrate current; soft breakdown; ultra-thin gate oxide; Weibull distribution; variable frequency light pumping  
**EEACC:** 2520E; 2810D

**Article ID:** 0253-4177(2005)05-0999-06

---

<sup>\*</sup> Project supported by the Special Funds for National Key Basic Research Plan of China (No. TG2000-036503)

Wang Yangang male, PhD candidate. His main research interest is reliability of ultra-thin gate oxide MOSFET.

Xu Mingzhen female, professor. Her current research interests include physics and characterization of small dimension devices and reliability of semiconductor materials and devices.

Tan Changhua male, professor. His current research interests include physics and reliability of small dimensional devices.

Received 23 July 2004, revised manuscript received 10 September 2004

© 2005 Chinese Institute of Electronics