

深亚微米 p^+ 栅 pMOSFET 中 NBTI 效应 及氮在其中的作用 *

韩晓亮 郝 跃 刘红侠

(西安电子科技大学微电子研究所, 西安 710071)

摘要: 研究了 p^+ 栅 pMOSFET 中的 NBTI 效应. 通过实验分析了 NBTI 应力后器件特性及典型参数的退化, 研究了氮化栅氧中氮对 NBTI 效应的作用, 并给出了栅氧中的氮对 NBTI 效应影响的可能机制, 即栅氧中氮形成的 Si-N 键不易被分解, 但栅氧中的氮提供了 H^+ 的陷阱中心, 导致 NBTI 效应中氧化层正固定电荷的增加, 其总体效果表现为氮对 NBTI 效应退化影响的增加.

关键词: NBTI 效应; 氮化栅氧; 界面态; 氧化层正固定电荷

EEACC: 0170N; 2570D

中图分类号: TN306; TN386.1

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)01-0084-04

1 引言

NBTI 效应发生在高温和负栅压偏置应力下的 pMOSFET 中, 它导致了器件饱和漏电流 I_{dsat} 的绝对值和跨导 G_m 的减少, 关态电流 I_{off} 和阈值电压 V_{th} 的增加. 其主要原因是在 NBTI 应力的作用下在器件 Si/SiO₂ 界面处, 界面态 D_{it} 及氧化层正固定电荷 Q_f 增加. 目前随着器件尺寸及栅氧厚度的不断缩小, 氮化栅氧工艺被普遍采用, 栅氧中通常用掺氮来减少 pMOSFET 中的硼扩散, 改善抗热载流子能力, 增加介电常数等, 但是氮化栅氧大大增强了器件中的 NBTI 效应. 有报道表明在 0.18 μ m 工艺技术后 NBTI 效应将最终限制器件的寿命, 它对器件可靠性的影响比 HC 效应更为严重^[1].

尽管针对 NBTI 效应已经进行了相当的研究, 但是对其退化过程及氮化栅氧中的退化机理仍然没有非常清楚的认识. 本文首先通过实验分析了 NBTI 效应对 p^+ 栅 pMOSFET 特性及典型参数的影响, 并在此基础上研究了氮化栅氧中的 NBTI 效应, 对氮导致的 NBTI 效应增强的机理提出一种可能解释.

2 NBTI 效应对 p^+ 栅 pMOSFET 特性及参数退化的影响

本研究采用的样品是 TSMC 加工的硅栅 0.25 μ m pMOSFET 器件, 多晶硅栅采用 p^+ 注入, 器件沟道长度 $L = 0.25\mu$ m, 栅氧厚度 T_{ox} 为 5nm, 栅氧采用氮化处理. 测试中首先在室温下测量器件的初始特性, 然后对器件施加 NBTI 应力, NBTI 应力的设置为器件源极、漏极以及衬底电极接地, 在栅极加负电压, 同时采用高温加热台对器件加热至设定温度并保持恒定. 在指定的间隔时间去除负栅应力并将器件冷却至室温进行测量. 典型的 NBTI 应力设置如图 1 所示.

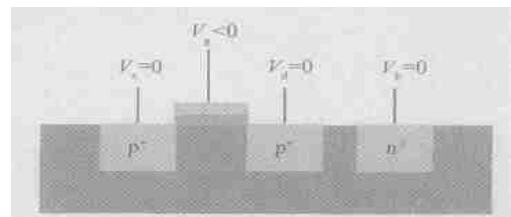


图 1 NBTI 应力设置图

Fig. 1 A schematic illustration for NBTI stress setup

* 国家高技术研究发展计划(批准号:2002AA1Z1630)和国家自然科学基金(批准号:60206006)资助项目

韩晓亮 男, 1976 年出生, 博士研究生, 主要研究方向为超深亚微 CMOS 器件的可靠性. Email: hxl@mei.xidian.edu.cn; xlhan@mail.xidian.edu.cn

郝 跃 男, 1958 年出生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为 VLSI 器件的可靠性, 新型半导体材料与器件及 IC 设计.

2003-11-16 收到, 2004-04-24 定稿

图 2 中给出了栅长 $L = 0.25\mu\text{m}$ 的器件 V_{th} 随应力时间 t 的漂移情况, 其中 $T = 200^\circ\text{C}$, $V_g = -3\text{V}$. 从图中可以看出, V_{th} 与应力时间的关系可以近似为幂指数为小数的指数关系, 即可以表示为 $V_{th} = Ct^n$, C 为常数, 指数 n 大约为 0.25. MOSFET 的阈值电压 V_{th} 、饱和漏电流 I_D 和跨导 G_m 简单表示如下:

$$V_{th} = \phi_{ms} - Q_f / C_{ox} - Q_{it}(\phi_s) / C_{ox} - 2\phi_F - Q_B / C_{ox} \quad (1)$$

$$I_d = (W/2L) \mu_{eff} C_{ox} (V_g - V_{th})^2 \quad (2)$$

$$G_m = (W/2L) \mu_{eff} C_{ox} (V_g - V_{th}) \quad (3)$$

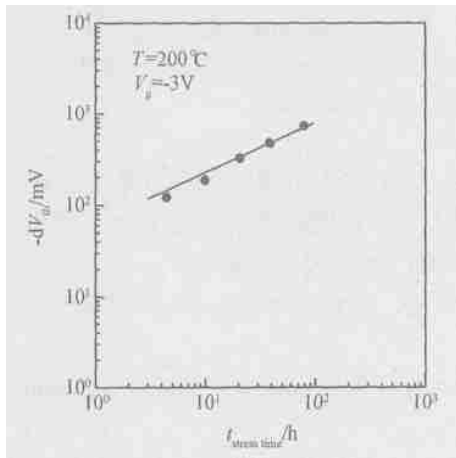


图 2 阈值电压 V_{th} 随应力时间的变化

Fig. 2 Threshold voltage shift with NBTI stress time

如果假定在 NBTI 应力作用下 pMOSFET 的衬底掺杂浓度以及氧化层厚度不变, 从以上公式中可以看出阈值电压 V_{th} 的变化是由于界面态密度 Q_{it} 和氧化层固定电荷密度 Q_f 的变化所引发, 即在 NBTI 效应中在反型的 pMOSFET 中形成了正电性的界面陷阱和氧化层正固定电荷^[2], 它们的增加导致了阈值电压 V_{th} 向负方向漂移. 导致饱和漏电流和跨导退化的两个参数是阈值电压和迁移率的变化. 而迁移率的变化主要来源于界面陷阱, 界面陷阱的产生导致了表面散射的增加, 从而降低了迁移率进而导致漏电流 I_{dsat} 以及 G_m 的减小. 图 3, 4, 5 中所使用的测试器件是栅长 L 为 $0.25\mu\text{m}$ 的 pMOSFET, 对其施加 NBTI 应力, $T = 165^\circ\text{C}$, 应力时间 $t = 35000\text{s}$. 图 3 给出了在应力前后的器件饱和区跨导 G_m 的变化情况, 从中可以看出器件饱和区跨导 G_m 明显减小. 图 4 和 5 中分别给出了在应力前后 $I_d V_d$ 特性以及 $I_d V_g$ 特性的变化情况, 从中可以看出在应力作用后, 器件漏电流明显减小. 在 CMOS 电路中, NBTI 效应

通常发生在反相器工作在“高”态中的 pMOSFET 中. pMOSFET 发生 I_{dsat} 退化, 导致了明显的时序问题. 如果数字信号在不同的时间到达, 信号处理会发生错误并最终导致器件的失效. 随着 V_{th} 的退化, 栅过驱动 ($V_g - V_{th}$) 的减少, 也导致了电流的减少, 环形振荡器频率的退化和随机存储器噪声边缘的减小^[3]. 修改设计可以改善一些问题, 但这是以增加电路复杂性和性能退化为代价的.

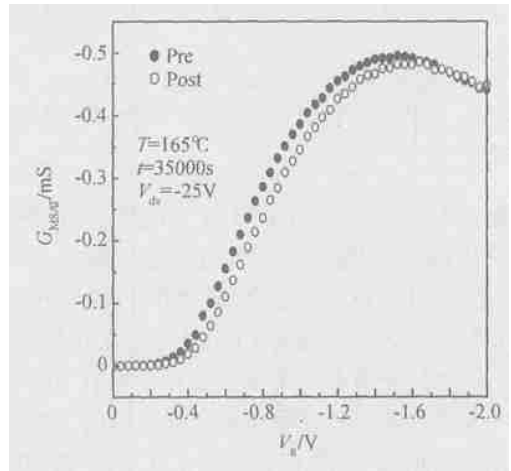


图 3 应力前后饱和区跨导 G_m 的变化

Fig. 3 G_m degradation after NBTI stress

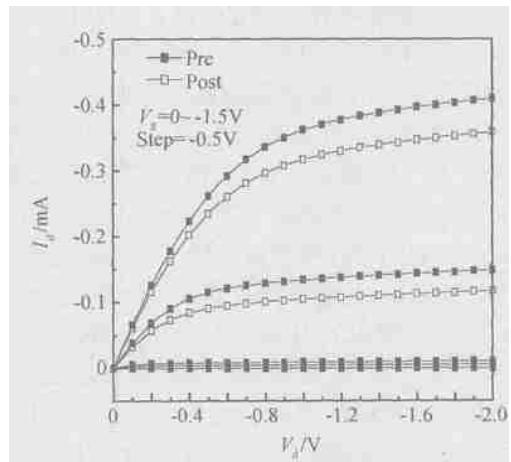


图 4 应力前后 $I_d V_d$ 特性曲线的变化

Fig. 4 $I_d V_d$ characteristics degradation after NBTI stress

3 栅氧中氮对 NBTI 效应的影响及可能机制

在 pMOSFET 中引入氮是为了抑制来自多晶硅

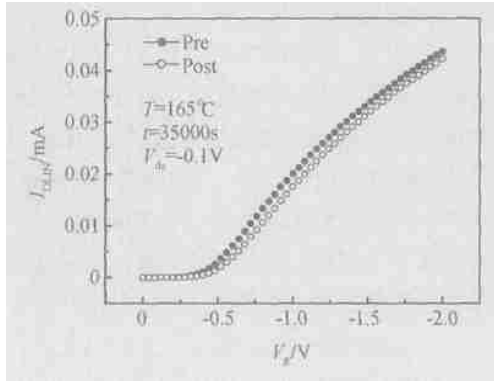
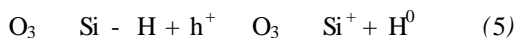
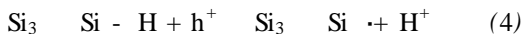


图 5 应力前后 I_d V_g 特性曲线的变化

Fig. 5 I_d V_g characteristics degradation after NBTI stress

栅中的硼穿通和降低栅漏电流,同时增强抗热载流子能力^[4].关于氮对 NBTI 效应的影响有两种不同的看法,即氮增强了 NBTI 效应和氮减弱了 NBTI 效应,但是普遍的看法是氮浓度的增加导致了 NBTI 性能的变差.为此我们比较了未氮化栅氧,高浓度 NO 氮化栅氧和低浓度 NO 氮化栅氧中的 NBTI 退化,即在栅氧形成后分别在不同的 NO 浓度的气氛中进行退火.从图 6 中可以看出,低浓度 NO 氮化栅氧中的 NBTI 退化要大于未氮化栅氧,而高浓度 NO 氮化栅氧中的退化大于低浓度 NO 氮化栅氧.这表明在栅氧中的氮确实增强了 NBTI 效应.有报道表明 NBTI 效应中界面态主要是由界面处 Si—H 键的分裂造成的,而栅氧的氮化处理使得一部分的 Si—H 键被 Si—N 键所取代,而 Si—N 键的结合能要大于 Si—H 键的结合能,因而不易断裂.栅氧的氮化减小了 NBTI 效应中界面态的产生,但是从实验数据中我们可以看到氮化栅氧的实际效果是增强了 NBTI 效应.这意味着可能的机制是:栅氧中的氮取代 Si—H 键中的 H 形成 Si—N 键,减小了界面处 Si—H 键的数目,而且 Si—N 的结合能更大,减小了 NBTI 效应中的界面态的产生.但是栅氧中的氮增强了界面处正氧化层固定电荷的产生,其总体效果表现为对 NBTI 效应的增强.

在纯氧化层中 NBTI 电化学反应如下^[5]:



从上式中可以看出,在 NBTI 效应中 Si—H 键首先分解并在界面处形成界面态和正电荷,同时形成的氢离子和原子向体内扩散.而在含氮栅氧中, H^0 在 S

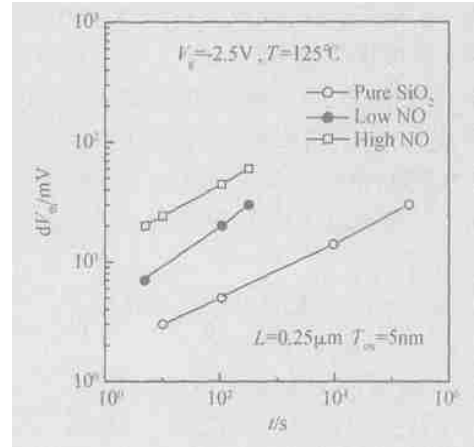
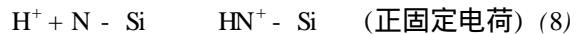
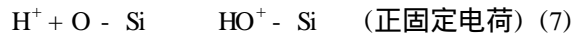


图 6 采用不同氮化栅氧器件的 V_{th} 退化

Fig. 6 Threshold voltage shift with NBTI stress time in different nitrided oxide

i/ SiO_xN_y 界面处的陷阱可能性要高于在 Si/ SiO_2 界面处,也就是说,在界面处的氮导致了 H^+ 和 H^0 在界面处陷阱作用的增强,从而增加了氧化层正固定电荷的产生.其反应机制如下:



反应式 (7) 和 (8) 使得 H^+ 不断被消耗,从而使 (4) 和 (5) 式的平衡态向右边漂移,导致了界面陷阱和氧化层陷阱更快地产生.而在反应式 (8) 中的 H^+ 与 N - Si 之间的反应要比反应式 (7) 与 O - Si 之间的反应具有更小的激活能 E_A , 因此更易于发生.总体表现为氮引起的对氢的陷阱作用导致正固定电荷 Q_f 增强.以上分析解释了氮化栅氧增强 NBTI 效应的原因.由此可以看出,采用氮化栅氧虽然具有很多优点,但是氮化浓度必须精确地加以控制,否则会导致过大的 NBTI 退化.必须在 NBTI 性能以及器件性能优化(栅漏电流,栅绝缘层硼穿通)之间进行折衷设计.

4 结论

p^+ 栅 pMOSFET 中的 NBTI 效应对于器件的可靠性是严重的威胁,其主要表现为在 NBTI 效应中 Si/ SiO_2 界面处界面态和氧化层正固定电荷的增加.而目前普遍采用的氮化栅氧工艺则增强了这种效应,氮对 NBTI 效应的影响主要是由于栅氧中的氮提供了氢离子的陷阱中心,从而增加了正固定电荷,引起了 NBTI 效应退化的增强,因此在考虑器件性能的同

时应考虑 NBTI 效应的影响。

参考文献

- [1] Kimizuka N, Yamamoto T. The impact of bias temperature instability for direct-tunneling ultra-thin gate oxide on MOSFET scaling. Technology Papers of Symposium on VLSI Technology Digest, 1999:73
- [2] Blat C E, Nicollian E H, Poindexter E H. Mechanism of negative bias temperature instability. J Appl Phys, 1991, 69(3) :1712
- [3] Schroder D K, Babcock J A. Negative bias temperature instability: road to cross in deep submicron silicon semiconductor manufacturing. J Appl Phys, 2003, 94(1) :1
- [4] Tan S S, Ang C H, Lek C M. Characterization of ultrathin plasma nitrated gate dielectrics in pMOSFET for 0.18 μ m technology and beyond. Proceeding of 9th IPFA, Singapore, 2001 :254
- [5] Chen Y F, Lin M H. Negative bias temperature instability in deep submicron P^+ -gate pMOSFETs. IRW Final Report, 2000 :98

NBTI Effects of p^+ Gate pMOSFET and Influence of Nitrogen on NBTI Effects *

Han Xiaoliang, Hao Yue, and Liu Hongxia

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

Abstract : The influence of negative bias temperature instability (NBTI) on p^+ poly gate pMOSFET is analyzed. The pre- and post-stress degradation of device characteristics and key parameters are obtained. The influence of nitrogen on NBTI effects is analyzed and a possible mechanism is given: Si—N bond in Si/SiO₂ is not feasible to be broken up, but the nitrogen in oxide acts as a trap center and enhances the fixed oxide charge generation in NBTI effects. The nitrogen in oxide enhances the NBTI effects.

Key words : NBTI effects; SiON; interface trap; fixed oxide positive charge

EEACC : 0170N; 2570D

Article ID : 0253-4177(2005)01-0084-04

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2002AA1Z1630) and National Natural Science Foundation of China (No. 60206006)

Han Xiaoliang male, was born in 1976, PhD candidate. His main research interest is in reliability of deep-sub-micron CMOS devices. Email : hxl @ mei . xidian . edu . cn ; xlhan @ mail . xidian . edu . cn

Hao Yue male, was born in 1958, tutor of PhD candidate. His research interests include VLSI integrated circuits reliability design, deep-sub-micron devices characteristics and modeling, novel materials and devices.

Received 16 November 2003, revised manuscript received 24 April 2004