

超深亚微米 PMOS 器件的 NBTI 退化机理^{*}

李忠贺[†] 刘红侠 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 5 月 20 日收到 2005 年 7 月 4 日收到修改稿)

对超深亚微米 PMOS 器件的负栅压温度不稳定性(NBTI)退化机理进行了研究.主要集中在对器件施加 NBT 和随后的 PBT 应力后器件阈值电压的漂移上.实验证明反型沟道中空穴在栅氧中的俘获以及氢分子在栅氧中的扩散是引起 NBTI 退化的主要原因.当应力条件变为 PBT 时,陷落的空穴可以快速退陷,但只有部分氢分子可以扩散回栅氧与衬底界面钝化硅悬挂键,这就导致了 PBT 条件下阈值电压只能部分恢复.

关键词:超深亚微米 PMOS 器件,负偏压温度不稳定性,界面陷阱,氢气

PACC:7340Q,7300,7220J

1. 引 言

随着 MOS 器件沟道长度的不断减小,为了抑制短沟道效应,减小亚阈斜率,同时也为了增大驱动电流提高电路工作速度,必须使 MOS 晶体管的栅氧化层厚度和沟道长度一起按比例缩小.但由于电压不能与器件尺寸按同样比例缩小,造成器件内电场增强,这对小尺寸器件可靠性带来一系列影响.如:热载流子注入(Hot Carrier Injection:HCI)^[1],栅氧的经时击穿(Time Dependent Dielectric Breakdown:TDDDB)^[2],负偏压温度不稳定性(Negative Bias Temperature Instability:NBTI)等.NBTI 效应已经成为近期可靠性问题的一个新的研究热点和重点^[3-12].

NBTI 效应是指对器件施加负的栅压和温度应力条件下所发生的一系列现象,它主要发生在 PMOSFET 中,其典型的应力条件是栅氧电场 $E_{ox} \leq 6\text{MV/cm}$,源、漏极和衬底均接地,温度在 100—250℃ 之间.NBTI 效应对 PMOSFET 的退化作用主要体现在驱动电流和跨导的下降、亚阈斜率的不断增大、阈值电压 V_{th} 的漂移,其中对 V_{th} 的影响最为严重,并且随着应力电压和温度的增高而不断增加.NBTI 效应对器件可靠性的影响比热载流子效应更为严重,研

究表明在器件特征尺寸小于 $0.18\mu\text{m}$ 后 NBTI 效应将最终限制器件的寿命^[5,6].与 PMOSFET 中的 NBTI 效应相对应,NMOSFET 中会存在 PBTI 效应,PBTI 效应是指在 NMOSFET 上同时施加正栅压和温度应力在器件中引起的退化,但与 NBTI 效应相比 PBTI 得到较少的关注,但也有研究结论认为 PBTI 效应影响也很大^[7],甚至可以比拟 NBTI 效应.尽管对 NBTI 效应已经有了很多的研究,但是对其确切的退化机理还没有清楚的认识.本文通过对 NBTI 效应引起的退化现象、影响因素和电压退火现象的研究,得出了一种可能的 NBTI 退化机理.

2. 实 验

测试器件采用中芯国际 SMIC 制作的,采用标准 $0.18\mu\text{m}$ CMOS 工艺技术的表面沟 PMOSFET 和 NMOSFET 器件,器件均为 LDD 结构,采用 STI 隔离,栅氧厚度 $t_{ox} = 3.2\text{nm}$,栅氧都经过 N_2O 氮化退火处理.器件最小沟道长度为 $0.18\mu\text{m}$.对器件的应力和特性测试使用 HP4156B 进行,先在室温下测量器件的初始特性,然后施加 NBT 应力,即源极、漏极、衬底电极均接地,栅压和温度保持恒定,并在应力期间周期测量器件的特性变化.

^{*} 国家自然科学基金(批准号:60206006) 国家高技术研究发展计划(批准号:2004AA1Z1070)和教育部重点科技研究项目(批准号:104172)资助的课题.

[†] E-mail: myuniverse@163.com

3. 结果与讨论

图 1(a) 和 1(b) 所示为在不同应力条件下器件的阈值电压 V_{th} 和饱和漏电流 I_{dsat} 退化的对比, 从这

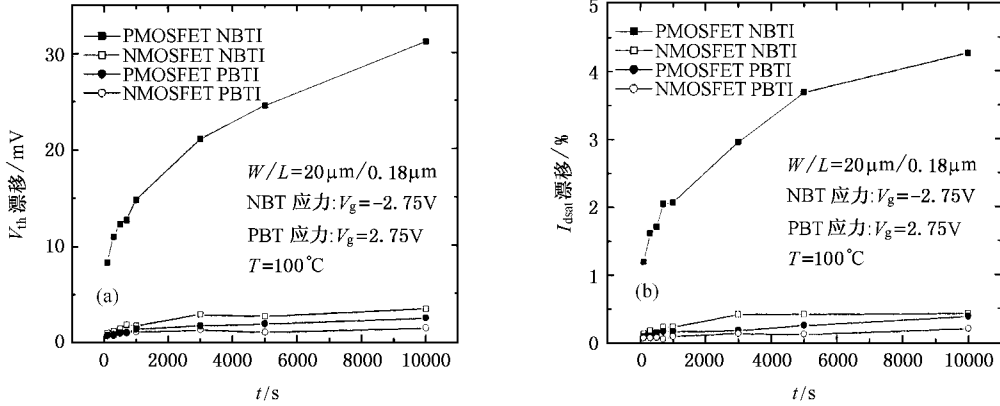


图 1 各种应力条件下器件参数随时间的退化关系 (a) 为 V_{th} 的变化 (b) 为 I_{dsat} 的变化

图 2 所示为在半对数坐标中的饱和区转移特性曲线, 从中不仅可以看出器件饱和漏电流的减小, 还可以看出应力后亚阈斜率 $S.S.$ 的增大, 这表明了应力过程中在 Si-SiO₂ 界面处产生了界面陷阱. 图 3 和图 4 分别为应力前后衬底电流 I_{sub} 和栅电流 I_g 的对比, 由于应力前后的测量温度和应力条件相同, 因此器件沟道区的碰撞电离率 (I_{sub}/I_{ds}) 是一致的, I_{sub} 的减小可以归结为器件漏电流 I_{ds} 的减小. 而应力后器件栅电流 I_g 出现了明显的增加, 这说明应力期间产生了氧化层陷阱电荷和界面陷阱电荷, 这些陷阱电荷的存在增强了器件的栅电流.

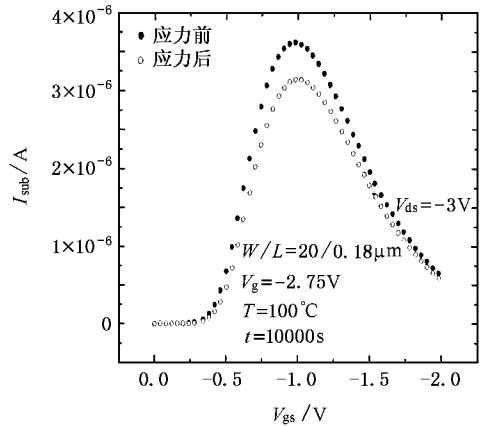


图 3 应力前后衬底电流变化

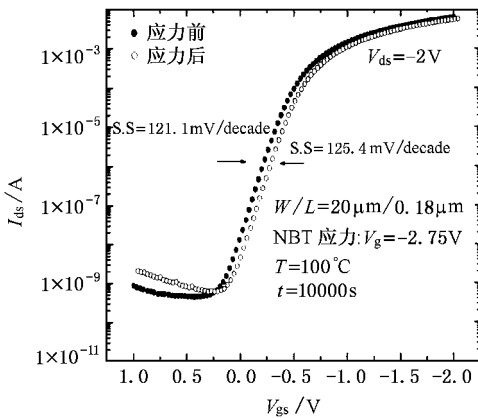


图 2 饱和区转移特性曲线

两幅图中我们可以看出在 NBT 和 PBT 两种应力条件下, 只有 PMOSFET 在 NBT 应力条件下呈现出了比较大的退化, 而 NMOSFET 的 NBT 和 PBT 应力与 PMOSFET 的 PBT 应力与此相比都很小, 均可忽略.

图 5 给出的对 $W/L = 20\mu\text{m}/0.18\mu\text{m}$ 的器件在

$V_g = -2.75\text{V}$, $T = 100^\circ\text{C}$ 应力下, 不同的器件参数随应力时间相对退化量的比较. 从图中我们可以看出阈值电压 V_{th} 的退化在这四个参数中退化最为严重, 所以器件的退化通常以 V_{th} 的退化为表征. 将 V_{th} 的退化重画在双对数坐标中如图 6 所示, 其斜率为 0.28, 这与通常的研究结果为 0.17—0.3 相吻合^[8]. 应力后 V_{th} 的负向漂移说明栅氧中在应力期间产生了正电荷, 正电荷的存在使栅电场的电力线一部分中止于这些附加的电荷而使 V_{th} 呈现负向漂移. 正电荷的产生可以由施主型界面态、空穴陷落等因素产生. 随着时间的不断累积, 这些缺陷最终将导致器件失效. 对于 NBTI 的退化机理通常认为由反应扩散模

型解释,认为这是由一扩散过程所控制的过程,该过程可以表示如下^[4]:

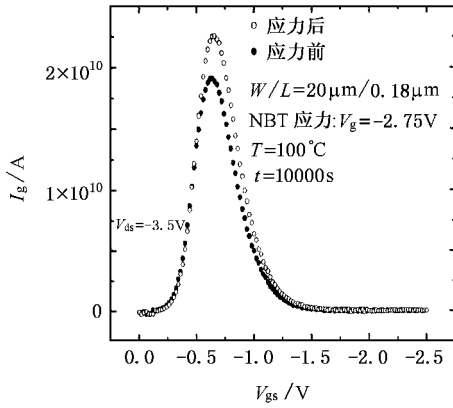
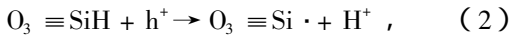
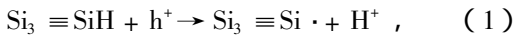


图 4 应力前后栅电流变化

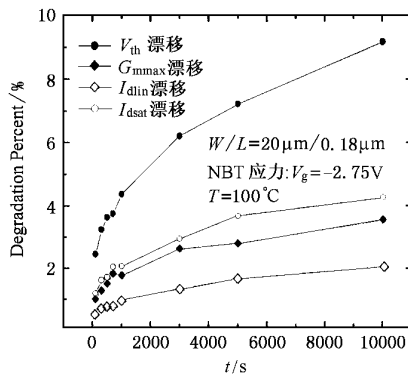


图 5 器件参数随 NBT 应力时间的退化比较

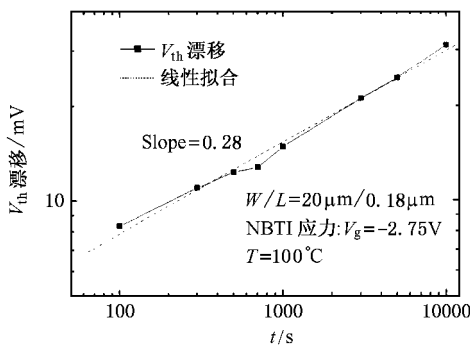


图 6 双对数坐标中的 V_{th}退化

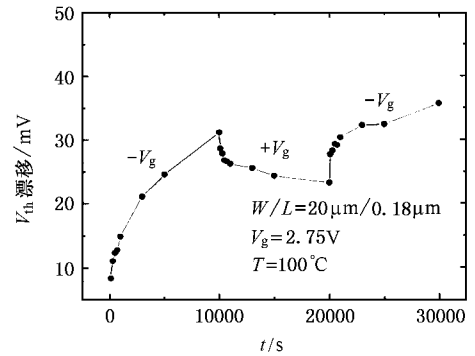


图 7 V_{th}随 NBT 和 PBT 的退化和恢复

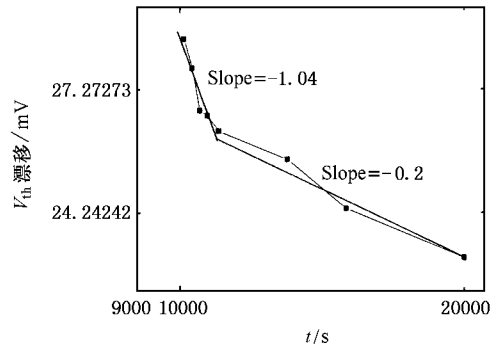
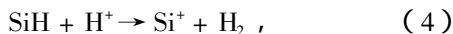
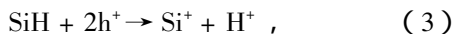


图 8 双对数坐标中的 PBT 曲线

中大量存在 $\cdot\text{h}^+$ 表示空穴, $\text{Si}\cdot$ 表示硅悬挂键, H^+ 为质子. 该反应过程为沟道中的空穴与界面处的缺陷发生反应, 产生了硅悬挂键和质子, 硅悬挂键表现为施主型界面态, 在负的栅压作用下放出一个电子而呈现正电性. 质子则向栅氧中扩散, 其中一些被栅氧中的陷阱所俘获. 整个过程受质子扩散的控制. 如果对器件施加正的栅压, 质子会在此栅压作用下返回到界面处, 并钝化界面处的硅悬挂键, 使器件的退化得以恢复^[9]. 但实验结果并非如此, 图 7 所示为应力后器件施加正栅压退火的曲线, 从中我们可以看出在 $V_g = 2.75\text{V}$ 正栅压退火一段时间后, 器件的 V_{th} 确实有所恢复, 但并没有完全回复. 当再次施加 NBT 应力时, 退化会略为增大. 将此退火曲线重画在双对数坐标中如图 8 所示. 如果退火行为仅是 NBTI 效应的逆反应, 那么它会有和其正向反应相反的斜率也就是 -0.28 , 可在图 8 中我们可以看出两种不同的斜率变化, 在刚开始退火的一段时间呈现 -1.04 的斜率, 而后面则呈现 -0.2 的斜率. 从这两幅图像中我们可以看出在 NBT 应力期间, 在栅氧中产生了三种类型的退化, 一种是永久性的损伤, 这种损伤在正

其中 $\text{Si}_3 \equiv \text{SiH}$, $\text{O}_3 \equiv \text{SiH}$ 表示界面和氧化层中的含氢的缺陷, 由于制造工艺的原因, 这种类型的缺陷在栅

栅压退火中不能恢复. 第二种损伤是在正栅压退火条件下可以快速恢复, 也就是斜率为 -1.04 所对应的部分. 第三种损伤则在正栅压退火条件下可以部分恢复, 与退火时间呈现 -0.2 的幂指关系. 这与通常认为的正栅压退火仅是 NBTI 正向反应的逆反应不同. 这也说明了在 NBTI 应力时向栅电极扩散的并非质子氢, 因为如果退化时产生的是质子氢, 那么在应力期间质子氢的输运除了扩散的因素外还会有在栅电场作用下的漂移成分, 此时的退化曲线与退化时间应该呈现 0.5 的幂指关系, 而非实验所得到的 0.28 的关系^[10]. 另一方面, 质子氢在二氧化硅中扩散的激活能约为 0.8eV , 而沿硅-二氧化硅界面移动的激活能约为 0.3eV , 如果在 NBTI 应力时产生了质子氢, 那么其更可能在硅-二氧化硅界面处移动, 而不是向栅电极扩散^[11]. 而且界面处的质子氢会直接与 SiH 键相互作用产生硅悬挂键和氢气, 这在辐射诱发的界面态中起着重要的作用. 由此我们得出一种可能的 NBTI 退化反应模型, 反应方程式如下:



硅氢键在沟道中空穴的作用下产生硅悬挂键和质子氢, 反应示意图如图 9. 界面处的质子氢又会与其他的硅氢键作用产生硅悬挂键和氢气, 由于氢气在界面处的浓度随着反应的进行而逐渐增大, 导致氢气会扩散走促使反应不断进行, 此时氢气浓度的极大值位于 Si-SiO₂ 界面处. 另一方面氢气的回退也会钝化部分硅悬挂键, 但在钝化前要先分解. 在反应的过程同时会有空穴注入到栅氧中, 并被栅氧中陷阱所俘获. 在施加正退火应力时, 陷落的空穴在正栅压作用下退陷进入沟道^[12]. 由于退化反应的中止, 导致了氢气不能持续的产生, 致使界面附近处的氢气浓度会高于 Si-SiO₂ 界面处的, 从而部分氢气会向回扩

散到 Si-SiO₂ 界面, 并钝化部分硅悬挂键. 正是由于这两种不同的退化机制而导致了退火曲线中两种不同的斜率关系. 由于氢气的向 Si-SiO₂ 界面的反向扩散作用使得这时氢气的浓度极大值向栅氧中推进, 当再施加 NBT 应力时反应所产生的氢气会以较快的速度再次向栅氧扩散, 从而出现了我们在图 7 所看到的再次施加 NBT 应力时会出现略为增大的退化.

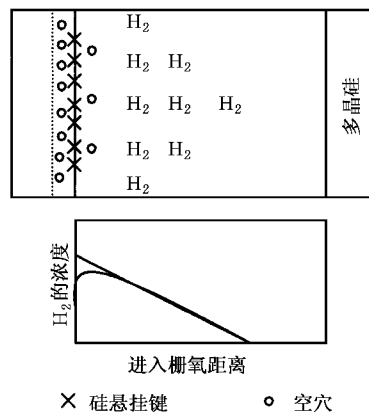


图 9 退化过程示意图

4. 结 论

在器件沟道长度和氧化层厚度不断缩小, 尤其是采用低电压供电的情况下, NBTI 效应逐渐成为影响超深亚微米器件可靠性的关键因素. NBTI 效应使 PMOS 器件的 V_{th} 发生严重退化, 在正栅压退火条件下会产生部分的恢复, 退火曲线呈现了两种不同斜率的退火现象, 这说明产生了三种损伤, 即不可恢复的损伤和两种随退火时间呈现不同斜率的可恢复的损伤. 其中不可恢复的损伤是由 NBT 应力期间产生的未能钝化的界面陷阱所致. 而两种可恢复的损伤是由陷落空穴的退陷和氢气反向扩散钝化部分硅悬挂键所引起.

[1] Zhang J C, Hao Y, Zhu Z W 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1585 (in Chinese) [张进城、郝跃、朱志炜 2001 物理学报 **50** 1585]

[2] Liu H X, Zheng X F, Hao Y 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 163 (in Chinese) [刘红侠、郑雪峰、郝跃 2002 物理学报 **51** 163]

[3] Liu H X, Zheng X F, Hao Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1373 (in Chinese) [刘红侠、郑雪峰、郝跃 2005 物理学报 **54** 1373]

[4] Schroder D K, Babcock J A 2005 *J. Appl. Phys.* **94** 1

[5] Kimizuka N, Yamamoto T, Mogami T *et al* 1999 *Symposium on VLSI Technology* 73

[6] Kimizuka N, Yamaguchi K, Imai K *et al* 2000 *Symposium on VLSI Technology* 92

[7] Zhang J F, Eccleston W 1998 *IEEE Trans. Electron Devices* **45** 116

[8] Mahapatra S, Kumar P B, Alam M A 2004 *IEEE Trans. Electron Devices* **51** 1371

- [9] Chen G , Li M F , Ang C H *et al* 2002 *IEEE Electron Device Letters* **23** 734
- [10] Chakravarthi S , Krishnan A T , Reddy V *et al* 2004 *International Reliability Physics Symposium* 273
- [11] Zhou X J , Tsetseris L , Rashkeev S N *et al* 2004 *Applied Physics Letters* **84** 4394
- [12] Huard V , Denais M 2004 *International Reliability Physics Symposium* 40

Mechanism of NBTI degradation in ultra deep submicron PMOSFET 's^{*}

Li Zhong-He[†] Liu Hong-Xia Hao Yue

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

(Received 20 May 2005 ; revised manuscript received 4 July 2005)

Abstract

The mechanism of negative bias temperature instability (NBTI) degradation in ultra deep submicron PMOSFET 's is investigated. We mainly focus on the threshold voltage shift under subsequent positive bias temperature (PBT) stress after the preceding NBT. It 's experimentally demonstrated that trapped holes from inversion channel and the diffusion of hydrogen molecules in the gate oxide are the major causes of NBTI degradation in PMOSFET 's. When the condition is switched to PBT stress the trapped holes can be rapidly detrapped , but only a part of hydrogen molecules can diffuse back to the interface of gate oxide and substrate and repassivate silicon dangling bond , this is responsible for the threshold voltage being only partially recovered during PBT annealing.

Keywords : ultra deep submicron PMOSFET 's , negative bias temperature instability , interface traps , hydrogen

PACC : 7340Q , 7300 , 7220J

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60206006) , Hi-Tech Research & Development Program of China (Grant No. 2004AA1Z1070) and Key Project of Chinese Ministry of Education (Grant No. 104172).

[†] E-mail : myuniverse@163.com