

超深亚微米 PMOSFET 的自愈合效应*

李 晶† 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 8 月 8 日收到, 2005 年 10 月 27 日收到修改稿)

主要研究负栅压偏置不稳定性(negative bias temperature instability, NBTI)效应中的自愈合效应, 研究了器件阈值电压随着恢复时间和应力时间的恢复规律. 研究表明器件的退化可以恢复是由于 NBTI 应力后界面态被氢钝化.

关键词: 负偏置温度不稳定性效应, 自愈合效应, 应力时间, PMOSFET

PACC: 7340Q, 7300, 7220J

1. 引 言

随着器件尺寸向超深亚微米不断发展, NBTI 效应逐渐成为 PMOSFET 退化机理的主导^[1-3]. 由于 PMOSFET 中的 NBTI 效应所引起的阈值电压的漂移渐渐成为限制器件寿命的重要因素, 但是通过 NBTI 自愈合效应(self-healing)可以很大程度减少这种效应的影响^[4-8]. 自愈合效应是指 PMOSFET 发生 NBTI 效应以后, 在不加任何外力的作用下器件的特性参数会自行恢复到漂移前的一定程度的现象^[4]. 研究表明无应力阶段阈值电压得到了一定程度的恢复并且随着时间的增加趋向于一个稳定值. 将器件放置更长时间, 发现阈值电压基本稳定在这个饱和值上^[5]. 本文首先论述了 NBTI 效应对器件阈值电压 V_{th} 的退化作用, 在此基础上研究了自愈合效应对器件的恢复作用, 以及时间对于器件恢复程度的影响, 讨论了自愈合效应的产生机理.

2. 超深亚微米 PMOSFET 的 NBTI 效应

NBTI 效应是指发生在施加高温和负栅压偏置应力下 PMOSFET 的一种效应, 其典型偏置条件为温度在 100—250°C 的范围内, 栅氧电场 $E_{ox} < 6\text{MV/cm}$ ^[2], 偏置条件如图 1 中所示^[2]. NBTI 效应导致的主要危害有器件漏电流 I_{Dsat} 绝对值的减少; 跨导 G_m

的减少; 关态电流 I_{off} 和阈值电压 V_{th} 的增加^[3].

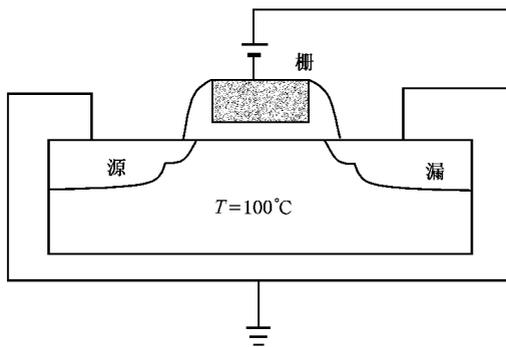


图 1 NBTI 效应示意图

MOSFET 的阈值电压 V_{th} 、饱和漏电流 I_D 和跨导 G_m 简单表示形式如下^[1]:

$$V_{th} = \varphi_{ms} - Q_f/C_{ox} - Q_i(\varphi_s)C_{ox} - 2\varphi_F - |Q_B|/C_{ox}, \quad (1)$$

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

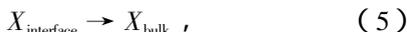
$$G_m = (W/2L)\mu_{eff}C_{ox}(V_g - V_{th}), \quad (3)$$

从式中可以推出阈值电压和迁移率的变化导致饱和漏电流和跨导退化, 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_D 以及跨导 G_m 的减小. 所以 V_{th} 漂移的主要原因是在 NBTI 应力的作用下在器件硅二氧化硅界面处界面态及氧化层正固定电荷增加. 由此导出阈值电压 V_{th} 的变化主要是

* 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: lj_0609@126.com

由于界面态密度 Q_{it} 和氧化层固定正电荷密度 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固定正电荷,此处的固定电荷是靠近 Si-SiO₂ 界面处的电荷,主要对阈值电压的漂移发生作用.通常认为固定电荷是三价硅悬挂键在氧化层中的产物^[1-3].NBTI 效应中界面态和氧化层固定正电荷产生的电化学反应模型如下:



$\text{Si}_3 \equiv \text{Si} \cdot$ 是界面陷阱,它是由于硅氢键 Si-H 的断裂而形成的,而 $X_{\text{interface}}$ 是与氢有关的物质.首先反应(4)在界面产生一个界面陷阱,其次由于反应(5)物质 X 扩散进入栅介质并且产生一个正的固定氧化电荷,此处的 X 是氢原子、氢分子或者是一个正的氢离子中的一种.由这个模型可以看出由于 NBT 应力产生的氧化层正固定电荷和界面陷阱是一一对应的.同时也有研究认为 NBT 时间应力加剧器件退化是因为 NBTI 效应是被扩散过程控制的,即反应(5)^[6].由此可以看出 NBTI 效应的产生主要是由于在界面处产生了界面陷阱和氧化层正电荷,而这个反应主要是由反应产物向栅电极的扩散过程来控制的.

3. PMOSFET 的自愈合效应

测试的 PMOSFET 器件采用中芯国际 SMIC 加工,采用 0.18 μm CMOS 标准工艺,其宽长比为 $W/L = 20\mu\text{m}/0.18\mu\text{m}$,栅氧厚度为 $T_{\text{ox}} = 3.2\text{nm}$.我们在测试中采用了两个完全相同的器件,在每一个 NBT 应力时间完成后器件 A 马上测量,而将器件 B 放置 1000s 后再进行测量,观察两个器件阈值电压的不同.可以看出在无应力阶段器件的阈值电压的确是发生了恢复,这说明去掉 NBT 应力后器件退化的特性参数会发生恢复,也就是说在 NBT 应力后去除应力器件的确会产生自愈合效应.从图 2 中可以看到 NBT 应力时间越长,自愈合效果越明显.在图 3 的双对数坐标中可以看到阈值电压的恢复与 NBT 应力时间基本呈现时间的 n 次幂的关系.这和器件的退化曲线十分相似,说明器件阈值电压的恢复并不会由于应力时间的变长而变弱或是停止.同时这个现象也更有力的说明了自愈合效应对于提高器件寿命有着不可忽略的影响.随着器件 NBT 应力时间的增

加,器件的恢复是会始终保持下去,还是会趋近于饱和将在下面研究.在图 4 中显示的是阈值电压恢复百分比同应力时间的关系,可以看出器件的恢复在最初阶段有一个较快的变化,但是随着应力时间的增加恢复曲线变缓并逐渐趋近于一个固定的值而不再有变化.这说明了对于同一器件来说在相同的条件下自愈合效应造成的阈值电压的恢复并不是始终保持着一定的百分比的,而是随着 NBT 应力时间的增加而持续恢复的.这种随着 NBT 应力时间的增加器件的特性参数退化加剧而同时自愈合效应也变强的现象,是由于随着 NBT 应力时间的增加在二氧化硅的体内形成的氧化层正固定电荷逐渐增加,使得 NBTI 正向反应减缓,而当去掉 NBT 应力后由于界面陷阱浓度随着应力时间的增加而增加,导致 NBT 应力的反应物的浓度远大于界面处的浓度,使得逆向反应增强从而使器件特性的恢复随着应力时间的增加而持续.但是随着 NBT 应力时间的增加对器件造成了不可逆的损伤,自愈合效应无法恢复这部分器件的退化,而导致最终恢复达到饱和.

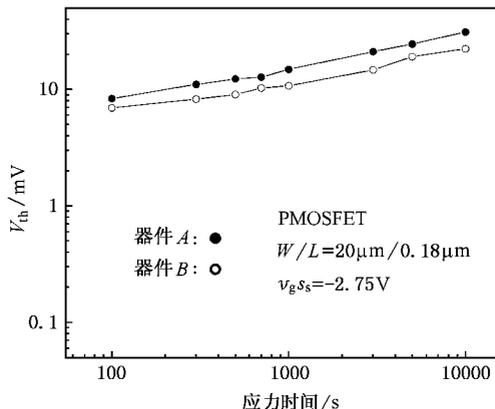


图 2 器件 A 器件 B 阈值电压比较(双对数坐标)

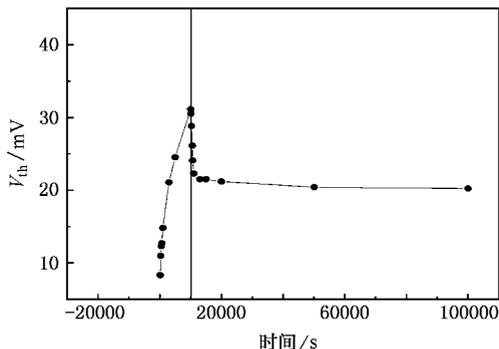


图 3 阈值电压恢复与应力时间的关系(双对数坐标)

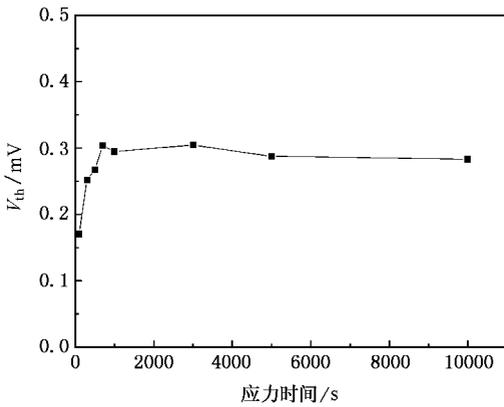


图 4 阈值电压恢复百分比与应力时间(双对数坐标)

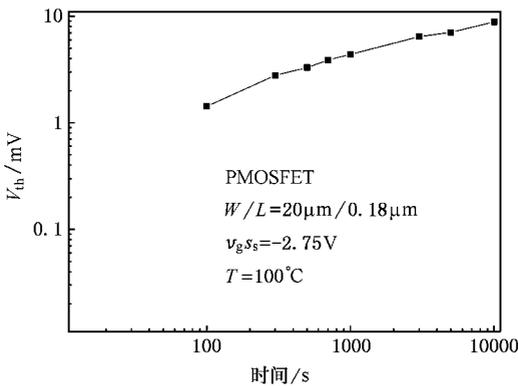


图 5 对器件施加 10000s 的应力后放置 90000s,在此过程中阈值电压的漂移

再看恢复时间对器件阈值电压恢复的影响.从图 5 中可以看出器件的阈值电压的确发生了恢复,并且阈值电压的恢复主要发生在恢复效应的最初阶段.不仅如此,自愈合效应过程中阈值电压恢复与时间的函数关系同阈值电压的退化与时间的函数关系十分相似,它同样包括了一个很快的恢复阶段和一个缓慢的趋近于饱和的阶段.这种在高温时一部分退

化无法恢复的现象称为恢复锁定现象^[4].通过上面对于 NBTI 效应产生原因的讨论可以推测 NBTI 过程中形成的界面陷阱和氧化层电荷由两部分组成,一部分是永久性的损伤,而另外一部分是可逆损伤,这可能是由于在氧化层中某些陷阱在 NBTI 效应过程中被充电,而在应力去除后发生了放电过程,从而使陷阱变为中性,减小了对器件的影响^[5].同时在 NBTI 效应的作用下,形成的反应物在体内的浓度要大于在界面处的浓度,从而在无应力作用的情况下使得反应物向界面处扩散,当反应物向界面处扩散时重新对界面陷阱产生钝化作用,从而减少了氧化层电荷密度和界面陷阱密度.所造成的直接后果就是在无应力的作用下器件特性会有一定程度的自行恢复.可以推测 NBT 应力条件下器件参数的退化主要是由于界面陷阱.基于界面陷阱的产生和钝化机理,以及近来提出的氢反应模型和扩散机理,我们提出了一个关于 NBTI 效应恢复机理的合理解释:在 NBTI 应力期间,热空穴令 Si-H 键断裂并且通过释放氢产生了界面态.在反应过程中产生的物质以原子,分子或者离子的形式向栅电极方向移动.在这个过程中,界面充当了氢的来源.钝化现象可以认为是在氢和界面陷阱之间的反作用^[7].当栅极偏置从负向无偏置变化时,沟道反型层消失,由于缺乏空穴的存在导致了 Si-H 键的断裂不能发生.另一方面,此时氢反向向 Si/SiO₂ 界面移动从而使界面态被钝化,在这个阶段界面充当了氢的吸收源.图 6 中给出了这个过程的模型示意图.

在氧化层中是与氢有关物质的扩散,它来自于 Si-H 键,氢是由于电化学分解机理释放出来的,通常发生在 NBTI 应力期间^[8].扩散反应模型表明界面陷阱密度随着氧化层厚度的减小和栅氧电场的增加而增加.自愈合效应也可以解释为扩散反应模型,在无应力条件下阈值电压 V_{th} 漂移的恢复是由于正电

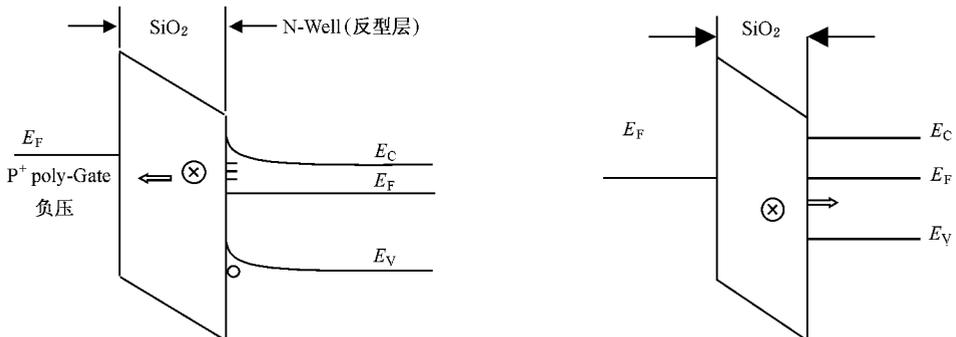


图 6 能带示意图

荷的退陷作用和解过程的逆过程造成的. 在 NBT 过程中形成的器件参数和特性的退化可以被这个恢复过程所减弱, 因此这个效应可以明显的延长器件 NBTI 寿命, 这对于未来的器件的持续缩小是非常有利的. 由此可以确定退化产生是由于氢钝化键的断开, 而恢复现象则是由于钝化键的再次钝化.

从图 5 中还看到应力后器件在最初的一个短时间内是快速恢复的, 而后逐渐趋于饱和. 这是由于在去掉 NBT 应力后沟道反型层消失, 使得硅悬挂键由于快速俘获了俘获截面内的氢原子而被钝化, 而当氢无法再形成稳定的氢化物或是无法继续扩散时氢将无法继续钝化, 此时就形成了恢复锁定. 在图 7 中器件的阈值电压恢复与恢复时间成 n 次幂的关系, 而从图 5 中也观察到器件恢复主要集中在恢复初始的 1000s, 并且在初始的恢复阶段, 器件恢复与退化有相似的特性, 也是与时间呈现指数的关系. 这个现象说明恢复反应也是受扩散反应控制, 并且这种去掉 NBT 应力后器件阈值电压的恢复现象是由于栅边缘的氢原子横向扩散的缘故^[6]. 为了确定在栅边缘氢原子的横向扩散对恢复的影响, 比较了不同栅长器件的恢复效果, 比较了不同栅长器件的阈值电压的恢复程度.

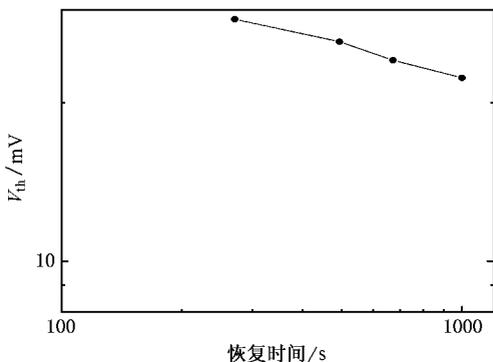


图 7 器件阈值电压恢复与时间的关系(对数坐标)

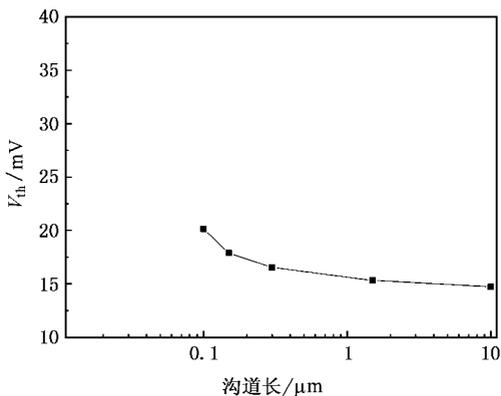


图 8 不同栅长的器件在相同应力条件下阈值电压恢复的情况

从图 8 中发现栅长短的器件更容易恢复, 并且器件的恢复效果也更好. 这结果说明这种在栅边缘氢原子的横向扩散现象在恢复反应中占有不可忽略的地位.

4. 结 论

在器件沟道长度和氧化层厚度不断缩小的情况下, NBTI 效应逐渐成为影响超深亚微米器件可靠性的关键因素. 但是在去掉 NBT 应力后器件的阈值电压会出现恢复现象, 试验表明随着器件放置时间的增加阈值电压会出现一个快的恢复阶段并且逐渐达到饱和, 这说明通过自愈合效应可以有效的减少 NBT 应力对器件造成的损伤从而提高器件的寿命. 认为 NBTI 效应的产生是由于在反型的 PMOSFET 中形成了正电性的界面陷阱和氧化层正固定电荷, 由此推测自愈合效应是由于氧化层中某些陷阱在 NBTI 效应过程中被充电, 而在应力去除后发生了放电过程, 从而使得陷阱变为中性, 减小了对器件的影响. 但是这种恢复也不是无限制的, 而是达到一定程度后会趋于饱和.

[1] Schroder D K, Babcock J A 2003 *Appl. Phys. Rev.* **94** 1
 [2] 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]
 [3] Hao Y, Han X L, Liu H X 2004 *Acta Elec. Sin.* **31** 2063 (in Chinese) [郝 跃、韩晓亮、刘红侠 2004 电子学报 **31** 2063]
 [4] Rangan S, Mielke N, Yeh E C C 2003 *IEEE IEDM* 341
 [5] Ershov M, Lindley R, Saxena S, Shibkov A, Minehane S, Babcock J, Winters S, Karbasi H, Yamashita T, Clifton P, Redford M 2003

IEEE Annual International Reliability Physics Symposium **41** 606
 [6] Tsujikawa S, Mine T, Watanabe K *et al* 2003 *IEEE Annual International Reliability Physics Symposium* **41** 183
 [7] Denais M, Huard V, Parthasarathy C *et al* 2004 *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability* **4** 715
 [8] Mahapatra S, Alam M A, Bharath Kumar P, Dalei T R, Saha D 2004 *IEEE IEDM* 105

Study on self-healing effect in ultra deep submicron PMOSFET 's^{*}

Li Jing[†] Liu Hong-Xia Hao Yue

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

(Received 8 August 2005 ; revised manuscript received 27 October 2005)

Abstract

The NBTI effect is studied in this paper with emphasis on its self-healing phenomenon. The recovery of threshold voltage shift with stress times and recovery time are studied. It is found that the recovery is mainly related to the re-passivation by hydrogen of interface states that occurred after the stress is stopped.

Keywords : NBTI , self-Healing , stress time , PMOSFET

PACC : 7340Q , 7300 , 7220J

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

[†] E-mail : lj_0609@126.com