

金属 - 氧化物 - 半导体场效应管辐射效应模型研究*

孙鹏[†] 杜磊 陈文豪 何亮 张晓芳

(西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

(2011年9月15日收到; 2011年10月11日收到修改稿)

基于氧化层陷阱电荷以及界面陷阱电荷的产生动力学以及辐射应力损伤的微观机理, 推导出了金属 - 氧化物 - 半导体场效应管 (MOSFET) 中辐射应力引起的氧化层陷阱电荷、界面陷阱电荷导致的阈值电压漂移量与辐射剂量之间定量关系的模型. 根据模型可以得到: 低剂量情况下, 氧化层陷阱电荷与界面陷阱电荷导致的阈值电压漂移量与辐射剂量成正比; 高剂量情况下, 氧化层陷阱电荷导致的阈值电压漂移量发生饱和, 其峰值与辐射剂量无关, 界面陷阱电荷导致的阈值电压漂移量与辐射剂量呈指数关系. 另外, 模型还表明氧化层陷阱电荷与界面陷阱电荷在不同的辐射剂量点开始产生饱和现象, 其中界面陷阱电荷先于氧化层陷阱电荷产生饱和现象. 最后, 用实验验证了该模型的正确性. 该模型可以较为准确地预测辐射应力作用下 MOSFET 的退化情况.

关键词: 界面陷阱, 氧化层陷阱, 金属 - 氧化物 - 半导体场效应管, 辐射

PACS: 78.70.-g, 85.30.Tv, 85.40.Qx

1 引言

随着航天技术以及核技术的不断发展, 半导体器件在这些领域中的应用也越来越广泛, 而半导体器件在应用过程中的可靠性也已经引起了越来越多的关注, 很多学者对半导体器件在辐射应力作用下的可靠性问题进行了探讨^[1-3]. 在辐射应力作用下, 半导体器件内部的氧化层会被激发形成电子 - 空穴对, 由于电子的迁移率较大, 因此会在电场的作用下离开氧化层, 而空穴则会被氧化层内的空穴陷阱所俘获, 从而形成陷阱电荷^[4-6]. 这些陷阱电荷会造成半导体器件的失效, 而在这些半导体器件中, 金属 - 氧化物 - 半导体场效应管 (MOSFET) 更是失效的敏感器件^[7]. 因此, 有必要对辐射应力对 MOSFET 所引起的损伤机理展开研究.

国外针对 MOSFET 辐射应力作用的研究主要从两个方面入手: 一些学者从物理方面入手研究, 提出了漂移 - 复合模型^[8], 该模型可以对实验数据进行解释, 但是该模型所提出的氧化层内部陷阱电荷密度均匀的假设并不总是成立; 还有研究表明, MOSFET 在辐射应力作用下界面陷阱电荷密度形

成与辐射剂量的 $2/3$ 次方成线性关系^[9,10]; 另一些学者则是通过准化学反应的角度来进行研究, 有研究表明当辐射剂量较低时, 界面陷阱电荷密度与辐射剂量成正比, 当辐射剂量超过某一临界值之后, 该值则与辐射剂量的 $1/2$ 次方成正比^[11]. 另外还有研究表明, 氧化层陷阱电荷与界面陷阱电荷之间关系密切, 但二者之间的定量关系较为复杂, 不方便实际使用^[12].

本文从 MOSFET 辐射应力损伤的微观机理入手, 建立了 MOSFET 在辐射应力作用下损伤的物理模型. 该模型可以较为准确地描述辐射应力作用下氧化层陷阱电荷密度和界面陷阱电荷密度与辐射剂量之间的关系. 本文最后讨论了两种陷阱电荷分别导致阈值电压漂移量之间的比例关系, 并根据实验和模拟结果对模型进行了验证.

2 理论模型

2.1 MOSFET 辐射应力损伤的微观机理

金属氧化物半导体 (MOS) 器件在辐射应力的作用下会产生退化, 其具体过程如下: MOS 器件在

* 国家自然科学基金 (批准号: 61106062) 资助的课题.

[†] E-mail: stevesun517@gmail.com

辐射应力的作用下吸收辐射能量, 吸收来的辐射能量会在氧化层中产生电子 - 空穴对. 由于 SiO_2 的绝缘特性, 产生的电子 - 空穴对中有部分不能立即复合. 其中电子的迁移率远大于空穴的迁移率, 因此电子会在电场力的作用下离开氧化层, 而空穴则继续留在氧化层内部, 慢慢聚集起来, 形成缺陷. 氧化层内部的缺陷可以俘获空穴, 形成带正电的缺陷 (E' 心)^[13,14]. 这些带正电的缺陷统称为氧化层陷阱电荷.

MOS 器件受到辐射应力作用会产生氢离子, 这些氢离子可以激活被氢钝化的三价悬挂键, 进一步形成界面陷阱 (P_b 心)^[15,16]. 对于不同类型的 MOS 器件而言, 界面陷阱所带电荷不同: 对于 nMOSFET 而言, 界面陷阱带负电荷, 而对于 pMOSFET 而言, 界面陷阱则带正电荷. 这两种陷阱电荷统称为界面陷阱电荷.

2.1.1 氧化层陷阱电荷形成模型

氧化层中辐射应力所产生的空穴沿着垂直氧化层界面方向的输运方程为^[4,17]

$$\frac{\partial p}{\partial t} = gK_g f_y - \frac{\partial f_p}{\partial x}, \quad (1)$$

其中, p 为空穴浓度, t 为辐照时间, g 为辐射剂量率, K_g 为单位体积氧化层内部由于单位辐射剂量所产生的电子 - 空穴对的数量, f_y 为电子 - 空穴对逃脱复合的几率, f_p 为空穴通量.

辐射诱导氧化层正电荷密度为

$$\begin{aligned} \Delta N_{ot} &= \frac{1}{t_{ox}} \int_0^{t_{ox}} p_t x dx \\ &= N_t \left\{ \frac{1}{2} t_{ox} + \frac{1}{\sigma_{pt} D K_g f_y} \right. \\ &\quad \times \exp(-\sigma_{pt} D K_g f_y t_{ox}) \\ &\quad + \frac{1}{(\sigma_{pt} D K_g f_y)^2 t_{ox}} \\ &\quad \left. [\exp(-\sigma_{pt} D K_g f_y t_{ox}) - 1] \right\}, \quad (2) \end{aligned}$$

其中, t_{ox} 为氧化层厚度, p_t 为被陷阱所俘获的空穴浓度, N_t 为氧化层内部空穴陷阱浓度, σ_{pt} 为空穴俘获截面, D 为辐射总剂量.

由于 (2) 式过于复杂, 因此可以对不同剂量条件分别化简, 得到:

$$\Delta N_{ot} = \frac{1}{2} N_t \sigma_{pt} K_g f_y t_{ox}^2 D, \quad (3)$$

$$\Delta N_{ot} = \frac{1}{2} N_t t_{ox}, \quad (4)$$

(3) 式是低剂量辐射情况下辐射诱导氧化层陷阱电荷与辐射总剂量之间的关系, (4) 式是高剂量辐射

情况下二者之间的关系. 由上式可以看出, 在辐射剂量较小的情况下, 辐射诱导氧化层陷阱密度与辐射剂量成正比; 在辐射剂量较大的情况下, 氧化层内部的陷阱均被空穴占据而达到饱和, 此时, 辐射诱导氧化层陷阱电荷与辐射剂量之间没有关系, 而只与氧化层厚度成正比.

2.1.2 界面陷阱电荷形成模型

MOS 器件由于辐射应力所产生的空穴除了形成氧化层陷阱电荷之外, 还可以和氧化层内的含氢缺陷发生反应, 释放质子, 从而导致界面陷阱电荷的产生. 该过程可以描述为^[4,17]

$$\frac{\partial [H^+]}{\partial t} = N_{DH} \sigma_{DH} f_p(x, t) - \frac{\partial f_{H^+}}{\partial x}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_{it}}{\partial t} &= (N_{SiH} - N_{it}) \sigma_{it} f_{H^+}(t_{ox}, t) \\ &\quad - N_{it} / \tau_{it}, \quad (6) \end{aligned}$$

其中, $[H^+]$ 为氧化层释放的质子浓度, N_{DH} 为氧化层内含氢缺陷浓度, σ_{DH} 为氧化层内部含氢缺陷对空穴的俘获截面, f_{H^+} 为氧化层内部的质子通量, N_{it} 和 N_{SiH} 分别为 Si/SiO₂ 界面处界面陷阱电荷密度和被氢钝化的 Si 悬挂键密度, σ_{it} 为界面处被氢钝化的 Si 悬挂键对质子的俘获截面, τ_{it} 为界面陷阱电荷的退火时间常数, $f_{H^+}(t_{ox}, t)$ 为辐照 t 时刻界面处的质子通量.

将 (5) 式和 (6) 式联立可以解出辐射应力诱导界面陷阱电荷的密度:

$$\begin{aligned} \Delta N_{it} &= N_{SiH} \\ &\quad \times \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{2} \sigma_{DH} \sigma_{it} N_{DH} K_g f_y t_{ox}^2 D\right) \right] \\ &= N_{SiH} [1 - \exp(-D/D_c)], \quad (7) \end{aligned}$$

其中, $D_c = 2(\sigma_{DH} \sigma_{it} N_{DH} K_g f_y t_{ox}^2)^{-1}$ 为界面陷阱电荷的特征辐射剂量, 当辐射剂量较低, 满足 $D/D_c \ll 1$ 时, 可以将 (7) 式化简得到:

$$\Delta N_{it} = \frac{1}{2} \sigma_{DH} \sigma_{it} N_{SiH} N_{DH} K_g f_y t_{ox}^2 D, \quad (8)$$

此时辐射诱导界面陷阱电荷密度 ΔN_{it} 与辐射剂量 D 呈正比例关系. 根据 (8) 式可以看出, 辐射诱导界面陷阱电荷密度与辐射剂量之间的关系较为复杂. 在低剂量的辐射应力下, 二者呈现线性关系, 随着辐射剂量的增大, 二者的关系逐渐偏离线性, 最终趋于饱和. 有研究者发现辐射诱导界面陷阱电荷密度与辐射剂量成 1/2 次方^[10] 或者 2/3 次方^[18] 的情况正是这种饱和趋势的中间阶段.

2.2 MOSFET 辐射应力损伤的表征模型

辐照后 MOS 器件的阈值电压漂移量可以看作是氧化层陷阱电荷和界面陷阱电荷共同作用的结果, 如下式所示:

$$\begin{aligned} \Delta V_T &= \Delta V_{ot} + \Delta V_{it} \\ &= -\frac{qt_{ox}}{\epsilon_{ox}} \Delta N_{ot} \pm \frac{qt_{ox}}{\epsilon_{ox}} \Delta N_{it}, \end{aligned} \quad (9)$$

式中的符号对 nMOSFET 取正号, 对 pMOSFET 取负号. ΔV_{ot} 与 ΔV_{it} 分别为氧化层陷阱电荷与界面陷阱电荷所导致的阈值电压漂移量, q 为电子电量, ϵ_{ox} 为栅氧化层的介电常数.

将 (9) 式分别代入 (3) 式和 (7) 式, 并化简, 可以得到辐射应力作用下氧化层陷阱电荷和界面陷阱电荷分别引起的阈值电压漂移量随辐射剂量的变化, 如下式所示:

$$\Delta V_{ot} = -\frac{1}{2} \frac{q}{\epsilon_{ox}} N_t \sigma_{pt} K_g f_y t_{ox}^3 D, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Delta V_{it} &= \pm \frac{qt_{ox}}{\epsilon_{ox}} N_{SiH} \\ &\times [1 - \exp(-D/D_c)]. \end{aligned} \quad (11)$$

由 (10), (11) 式, 再联系 (4) 式和 (8) 式, 可以看出, 在低辐射剂量条件下, 辐射应力作用下氧化层陷阱电荷和界面陷阱电荷引起的阈值电压漂移量均与辐射剂量成正比; 在高剂量辐射条件下, 辐射应力作用下氧化层陷阱电荷引起的阈值电压漂移量产生饱和现象, 与辐射剂量无关, 而界面陷阱电荷引起的阈值电压漂移量与辐射剂量呈现指数关系.

3 实验结果与分析

实验样品为 $1 \mu\text{m}$ 标准 CMOS 工艺制备的增强型 n-MOSFET, 栅氧化层厚度 $t_{ox} = 20 \text{ nm} \pm 1.5 \text{ nm}$, 沟道宽长比 $W/L = 4/1 (\mu\text{m})$, 沟道掺杂浓度为 10^{16} cm^{-3} . 辐射应力实验在西北核技术研究所 $\text{Co}^{60}\gamma$ 射线源上进行, 辐照期间 MOSFET 栅极偏置电压 $V_G = 4 \text{ V}$, 源极、漏极和衬底均接地, 辐射剂量率为 $10 \text{ rad} (\text{SiO}_2)/\text{s}$, 总剂量分别为 $30 \text{ krad} (\text{SiO}_2)$, $60 \text{ krad} (\text{SiO}_2)$, $100 \text{ krad} (\text{SiO}_2)$ 以及 $200 \text{ krad} (\text{SiO}_2)$. 本实验采用带隙中部法^[19]对 ΔV_{ot} 和 ΔV_{it} 进行分离.

图 1 为实验测得以及根据模型推导出的辐射应力诱导氧化层陷阱电荷所引起的阈值电压漂移 ΔV_{ot} 与辐射剂量 D 之间的变化关

系. 在这里, 取模型参数 $q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$, $\epsilon_{ox} = 3.45 \times 10^{-11} \text{ F/m}$, $N_t = 1.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $\sigma_{pt} = 4.0 \times 10^{-13} \text{ cm}^2$, $K_g = 8.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{rad}^{-1} (\text{SiO}_2)$, $t_{ox} = 2 \times 10^8 \text{ m}$, 经过计算所得到的 ΔV_{ot} 与辐射剂量 D 之间的关系用虚线表示. 由图中实验数据可以看出, 氧化层陷阱电荷引起的阈值电压漂移 ΔV_{ot} 与辐射剂量 D 成正比例关系, 与 (10) 式一致. 并且在实验条件下, 并没有发现饱和现象, 这说明 $200 \text{ krad} (\text{SiO}_2)$ 的辐照剂量并不能使氧化层陷阱的数量产生饱和. 根据模型模拟出的 ΔV_{ot} 与 D 的曲线可以较好地与实验数据相匹配, 这说明模型的建立以及模型参数的选取是基本正确的.

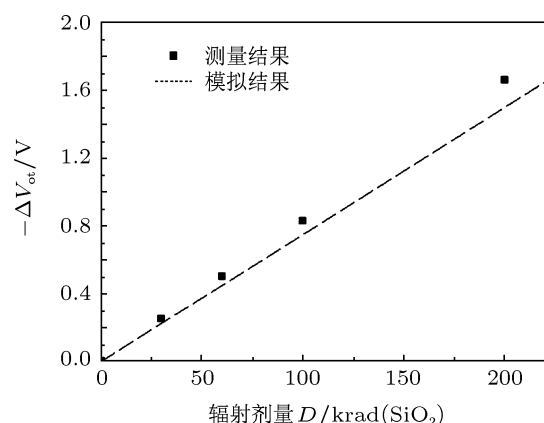


图 1 辐射应力诱导氧化层陷阱电荷所引起的阈值电压漂移 ΔV_{ot} 与辐射剂量 D 之间的变化关系 ($T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$)

图 2 为实验测得以及根据模型推导出的辐射应力诱导界面陷阱电荷所引起的阈值电压漂移 ΔV_{it} 与辐射剂量 D 之间的变化关系. 根据模型参数计算得到 ΔV_{it} 与辐射剂量 D 之间的关系用虚线表示. 在模型计算时, 为了便于计算, 利用了如下假设: 与辐射应力所引起的氧化层陷阱形成数量相比, 辐射应力之前的陷阱密度可以忽略不计. 对于栅氧化层厚度较小的 MOSFET 而言, 上述假设是成立的. 根据实验数据可以看出, 在低剂量情况下 ($60 \text{ krad} (\text{SiO}_2)$ 以下), 界面陷阱电荷所引起的阈值电压漂移 ΔV_{it} 与辐射剂量 D 成正比例关系, 当辐射剂量大于 $60 \text{ krad} (\text{SiO}_2)$ 时, 二者明显已经偏离了线性关系, 而呈现出指数关系. 由图中可以看出, 模型计算出的 ΔV_{it} 与辐射剂量 D 之间呈现指数关系, 与实验数据基本符合. 对于本文所采用的实验样品, 由于上述假设无法严格成立, 故图 2 中模拟结果和实验结果存在着一定的偏差, 但总体趋势基本一致.

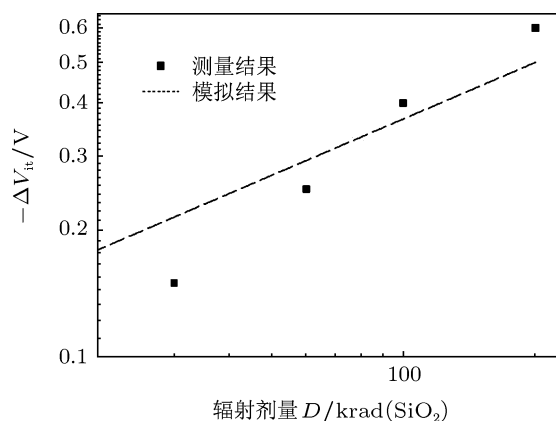


图2 辐射应力诱导界面陷阱电荷所引起的阈值电压漂移 ΔV_{it} 与辐射剂量 D 之间的变化关系 ($T = 25^\circ\text{C}$)

根据图1和图2的实验结果,可以看出:在辐射剂量较低的情况下,氧化层陷阱电荷的数量 ΔN_{ot} 与界面陷阱电荷的数量 ΔN_{it} 基本上保持一定比例,在30 krad情况下, $\Delta N_{ot}/\Delta N_{it} = 1.67$,之后60 krad与100 krad情况下的比例也没有较大变化;但是在200 krad情况下, $\Delta N_{ot}/\Delta N_{it} = 2.76$,比例有了较大的变化,也从另一方面表明界面陷阱电荷数量已经开始饱和。

4 结论

本文从辐射应力所引起的氧化层陷阱电荷以及界面陷阱电荷的形成动力学入手,并结合辐射应力损伤的微观机理,最终推导出了MOSFET辐射应力作用下的退化模型.该模型给出了辐射应力所引起的氧化层陷阱电荷以及界面陷阱电荷分别造成的阈值电压漂移量与辐射剂量之间的关系,即低剂量下氧化层陷阱电荷与界面陷阱电荷所导致的阈值电压漂移量与辐射剂量成正比例关系;高剂量下氧化层陷阱电荷所引起的阈值电压漂移量达到饱和,与辐射剂量 D 无明显关系,而界面陷阱电荷所引起的阈值电压漂移量与辐射剂量呈现指数关系,但二者产生饱和的初始剂量并不相同.这表明:与氧化层陷阱电荷相比,界面陷阱电荷的增加数量在辐射剂量较小的情况下已经产生了饱和现象,在较高剂量的情况下,阈值电压的漂移主要是由于氧化层陷阱电荷的贡献.通过实验对上述模型进行了验证,证实了模型的正确性.综上所述,利用本文所建立的模型,有助于对MOSFET辐射应力作用下的退化特性进行更为详尽的表征。

- [1] Meisenheimer T L, Fleetwood D M, Shaneyfelt M R, Riewe L C 1991 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **38** 1297
- [2] Oldham T R, McLean F B 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 483
- [3] Barnaby H J 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 3103
- [4] Sergey N R, Claude R C 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 2650
- [5] Harold P H, Ronald L P, Steven C W 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 1901
- [6] Chen X J, Barnaby H J, Vermeire B 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 1913
- [7] Fleetwood D M, Meisenheimer T L, Scofield J H 1994 *IEEE Trans. Electron.* **41** 1953
- [8] Klein R B, Saks N S, Shanfield Z 1990 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **37** 1690
- [9] Naruke K, Yoshida M, Maeguchi K, Tango H 1983 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **30** 4054
- [10] Winokur P S, Boesch H E, McGarrity J M, McLean F B 1977 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **24** 2113
- [11] Benedetto J X, Boesch H E, McLean F B 1988 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **35** 1260
- [12] Lenahan P M, Conley J F 1998 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **45** 2413
- [13] Shaposhnikov A V, Gritsenko V A, Zhidomirov G M, Roger M 2002 *Phys. Sol. State* **44** 1028
- [14] Fleetwood D M, Winokur P S, Reber R A, Meisenheimer T L, Schwank J R, Shaneyfelt M R, Riewe L C 1993 *Appl. Phys. Lett.* **73** 5058
- [15] Li R M, Du L, Zhuang Y Q, Bao J L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3400 (in Chinese) [李瑞珉, 杜磊, 庄奕琪, 包军林 2007 物理学报 **56** 3400]
- [16] Rashkeev S N, Fleetwood D M, Schrimpf R D, Pantelides S T 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 3158
- [17] Chen W H, Du L, Zhuang Y Q, He L, Zhang T F, Zhang X 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4090 (in Chinese) [陈伟华, 杜磊, 庄奕琪, 何亮, 张天福, 张雪 2009 物理学报 **58** 4090]
- [18] Lai Z W 1998 *Anti-Radiation Electronics: Radiation Effects and Radiation-Harden Theory* (Beijing: National Defence Industry Press) p74 (in Chinese) [赖祖武 1998 抗辐射电子学——辐射效应及加固原理 (北京: 国防工业出版社) 第74页]
- [19] McWhorter P J, Winokur P S 1986 *Appl. Phys. Lett.* **48** 133

A radiation degradation model of metal-oxide-semiconductor field effect transistor*

Sun Peng[†] Du Lei Chen Wen-Hao He Liang Zhang Xiao-Fang

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 15 September 2011; revised manuscript received 11 October 2011)

Abstract

Based on the production kinetics of oxide-trapped charge and interface-trapped charge and the microscopic mechanism of radiation damage, a model of post-irradiation threshold voltage drift due to oxide trap and interface trap as a function of radiation dose is proposed. This model predicts that the post-irradiation threshold voltage drift due to oxide trap and interface trap would be linear in dose at low dose levels. At high dose levels, the post-irradiation threshold voltage drift due to oxide trap tend to be saturated, its peak value has no correlation with radiation dose, and the post-irradiation threshold voltage drift due to interface trap has an exponential relationship with radiation dose. In addition, the model indicates that the oxide-trapped charge and the interface-trapped charge start a saturation phenomenon at different radiation doses, and the saturation phenomenon of oxide-trapped charge appears earlier than interface-trapped charge. Finally, the experimental results accord well with the model. This model provides a more accurate prediction for radiation damage in metal-oxide-semiconductor field effect transistor.

Keywords: interface trap, oxide trap, metal-oxide-semiconductor field effect transistor, radiation

PACS: 78.70.-g, 85.30.Tv, 85.40.Qx

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61106062).

[†] E-mail: stevesun517@gmail.com