

MOS 晶体管中辐照引起的 陷阱正电荷的强压退火

姚育娟¹ 张正选^{1,2} 姜景和¹ 何宝平¹ 罗尹虹¹

(1 西北核技术研究所, 西安 710024)

(2 西安交通大学, 西安 710049)

摘要: 电离辐射在 MOS 结构的 SiO₂ 层中建立正陷阱电荷, 这些正陷阱电荷在正强栅偏压 (+ 20V) 下迅速减少, 这是由于正栅压引起硅衬底中的电子向 SiO₂ 层隧道注入, 从而与陷阱正电荷复合。正栅压退火不仅对 N 沟 MOS 结构非常有效, 对 P 沟 MOS 结构也有一定的影响。给出了辐照后的 NMOS 和 PMOS 晶体管在强正栅压下退火的实验结果, 阐明了正栅压下的“隧道退火”机理。

关键词: 偏压退火; 辐照引起的陷阱正电荷; MOS 晶体管

PACC: 6180; EEACC: 2530G; 2550A

中图分类号: TN386.1 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2000)04-0378-05

Bias Annealing of Radiation Induced Positive Trapped Charges in Metal Oxide Semiconductor Transistor

YAO Yu-juan¹, ZHANG Zheng-xuan^{1,2}, JIANG Jing-he¹,
HE Bao-ping¹ and LUO Yin-hong¹

(1 Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

(2 Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Received 8 January 1999, revised manuscript received 6 May 1999

Abstract: Positive trapped charges are induced by ionizing radiation in the SiO₂ layer of MOS structure. The trapped charges are rapidly decreased at the strong positive gate bias (+ 20V). This results from that the positive charges are recombined with electrons injected from the Si substrate into the SiO₂ layer due to the positive bias. Positive bias annealing is effective on NMOS transistor as well as PMOS transistor. The annealing experimental results of radiated NMOS and PMOS transistors and the mechanism of bias annealing are discussed and analysed.

姚育娟 女, 1969 年出生, 硕士生, 工程师, 现从事辐射效应工作。

1999-01-08 收到, 1999-05-06 定稿

Key words: bias annealing; radiation induced positive trapped charges; MOS transistor

PACC: 6180; EEACC: 2530G; 2550A

Article ID: 0253-4177(2000)04-0378-05

1 引言

为阐明MOS器件的过辐射响应以及发展辐射加固实验方法,充分理解缺陷的累积和退火行为是十分必要的。人们运用多种方法研究MOS器件辐照后的退火响应,但大多集中在室温25℃下的长时间依赖效应和短时高温(168h, 100℃)退火效应,以及采取一定加固工艺后的退火特性^[4, 10],此时所加的栅压为+5V或+10V。而对于辐照后,MOS器件在强电场下的退火行为,人们研究的不多。为了了解强电场下的载流子特性,全面理解各种条件下的缺陷退火行为,我们在恒定室温下,对辐照后的MOS器件进行了短时(1h)强压(+20V)退火实验,考察直流电场应力下,氧化物陷阱电荷的变化。结果表明,强正栅压下氧化物陷阱电荷退火显著。文中给出了NMOS和PMOS晶体管辐照敏感参数正栅压退火的实验结果,并在传统的缺陷退火模型的基础上,解释了MOS器件在强电场下的时间依赖响应。

2 实验

实验所用样品为国内生产的加固型MOSFET,干氧氧化温度900℃,栅氧化层厚度为50nm。Co-60γ射线室温辐照,总剂量为 5×10^3 Gy(Si),辐照剂量率为0.256Gy(Si)/s。辐照期间, $V_{GS} = +5V$, $V_D = V_S = 0V$,此时NMOS管导通,PMOS管截止,均处于最劣偏置状态。辐照后进行强压退火实验,所加栅压为+20V。每退火10min进行一次参数测量,总退火时间为60min。参数测量由HP4156精密半导体参数分析仪完成。

3 实验结果

图1是NMOS晶体管在辐照前、辐照后和退火后转移特性的比较。从图中可以看出, $I-V$ 曲线辐照后严重负向漂移,源于氧化层中高的空穴俘获效率,这可能与生产工艺中氧化层的高温退火有关,或有可能为调整阈值电压而进行了离子注入。空穴俘获得多,陷阱正电荷数量大,致使阈值电压下降,漏电流增大,曲线漂移严重。零栅压下,管子已开启,增强型管已变成耗尽型。

+20V室温强压退火60min后, $I-V$ 曲线正向回漂,这是由于辐射引起的陷阱空穴被中和。此时,阈值电压也正向回漂,并已超过辐照前值。从NMOS晶体管的 $I-V$ 曲线可以看出,退火后的亚阈曲线斜率没有恢复到辐照前的状态,这是由于辐照产生的界面态陷阱电荷的影响,界面态陷阱电荷使亚阈曲线斜率变小,曲线变缓。强偏压退火只对氧化物陷阱电荷有效。

图2中,列出了NMOS晶体管阈值电压在辐照前、辐照后和退火过程中的变化情况。第二个点是经过总剂量 5×10^3 Gy(Si)辐照后的阈值电压变化量。对NMOS管,加压20min后,阈值电压已超过了辐照前的数值,这是由于正栅压下陷阱正电荷退火,使 V_{th} 回漂,而辐照产生的界面态本身使

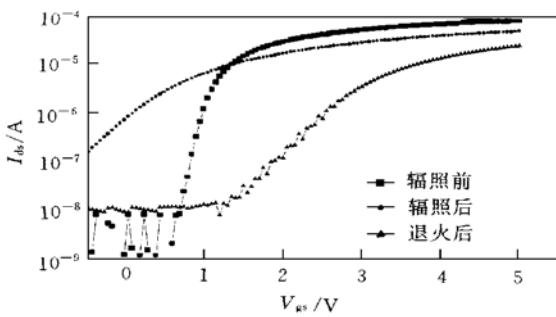


图1 NMOS晶体管 $I-V$ 曲线在辐照前、辐照后及退火后的变化

FIG. 1 $I-V$ Characteristics of NMOS before and after Radiation and after Annealing

V_{th} 正向漂移,两者综合作用的结果,使 V_{th} 大于辐照前的数值。这也与大量文献中“回弹”实验的结果相吻合。“回弹”实验中的栅偏压依赖关系表明,100℃退火时,所加栅压增加, V_{th} 回弹明显。当栅压为10V时, V_{th} 能达初值的3倍多^[8],我们在室温下加强栅压,短时间内即使 V_{th} 回弹到初值的2倍,30min后,阈值电压已饱和,不再变化。

强压退火不仅对NMOS晶体管有效,对PMOS晶体管也很明显,如图3,只是回弹的幅度没有NMOS晶体管的大。 $+20V$ 偏压退火后,阈值电压也有一定程度的恢复,但并未达到辐照前的数值。因为PMOS管,其费米能级靠近Si价带,位于Si禁带下半部的施主型界面态在费米能级上方带正电,位于Si禁带上半

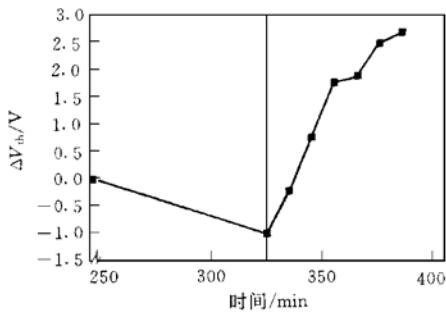


图2 NMOS晶体管 ΔV_{th} 随辐照和退火时间的变化

FIG. 2 ΔV_{th} Versus Radiation and Annealing Time for NMOS

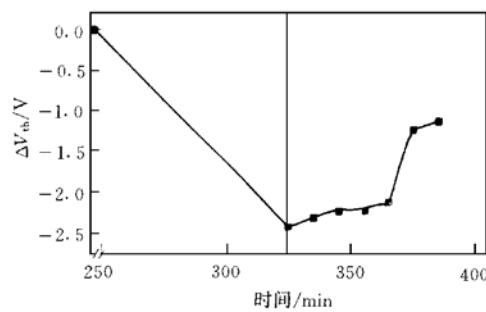


图3 PMOS晶体管 ΔV_{th} 随辐照和退火时间的变化

FIG. 3 ΔV_{th} Versus Radiation and Annealing Time for PMOS

部的受主型界面态是电中性的,而氧化物陷阱电荷带正电,所以两者均使阈值电压负向漂移。正栅压下,氧化物陷阱电荷退火,即使隧道注入的电子数量大于氧化物陷阱电荷,仍无法完全抵消界面态。因此,PMOS管总的 V_{th} 虽有回漂,但未达到辐照前的值。

图4和图5是 ΔV_{mg} 随偏压退火时间的变化情况。 ΔV_{mg} 是半带电压的漂移量,表征氧化物陷阱电荷的变化。对NMOS管,在加压前30min内, ΔV_{mg} 恢复较快,说明氧化物陷阱电荷被快速中和。后30min内, ΔV_{mg} 恢复较慢,随着氧化物陷阱电荷数量的减少,中和速度变慢。60min后, ΔV_{mg} 仍小于零,说明没有出现净负电荷积累。对PMOS管,由于沟道中导电载流子为空穴,正栅压下,衬底电子先与沟道空穴复合,然后再进入 SiO_2 层中和陷阱空穴复合。从图中可以看出,60min的退火, ΔV_{mg} 几乎线性增长。

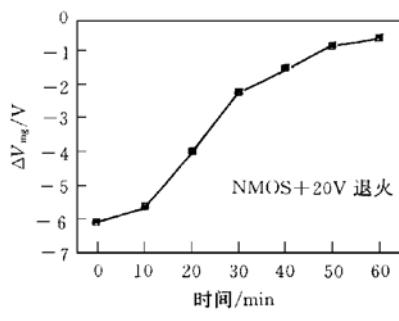


图4 NMOS晶体管 ΔV_{mg} 随退火时间的变化
FIG. 4 ΔV_{mg} Versus Annealing Time for NMOS

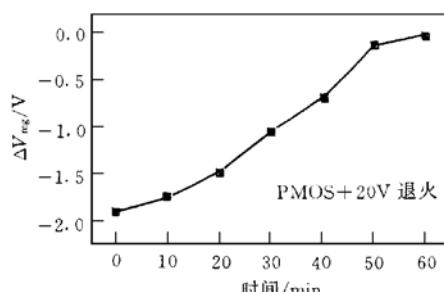


图5 PMOS晶体管 ΔV_{mg} 随退火时间的变化
FIG. 5 ΔV_{mg} Versus Annealing Time for PMOS

4 讨论

MOSFET受到辐照后, SiO_2 层中的一些束缚电子吸收能量被从价带激发到导带, 从而产生电子-空穴对。由于在室温下 SiO_2 中的电子迁移率($\sim 20\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)比空穴迁移率($2 \times 10^{-5}\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)大得多, 电子在极短的时间($\sim 10^{-12}\text{s}$)内可迁移到金属电极; 而空穴却相对不动地停留在原处。电子迁移完后, 空穴缓慢向 SiO_2/Si 界面移动, 到达界面陷阱区的一部分空穴被陷阱俘获, 成为固定的氧化层电荷。陷阱正电荷能引起 MOS 结构阈值电压的负向漂移, 这在 MOS 器件中是最主要的辐射损伤。在正偏压下, 大部分陷阱正电荷位于 SiO_2/Si 界面的几纳米范围内, 负偏压下, 它们位于栅电极附近。本文中的样品在正栅压下辐照, 所以陷阱正电荷位于 SiO_2/Si 界面附近。

氧化层中陷阱正电荷相对稳定, 不能随费米能级的漂移变化, 也不能与硅衬底进行交换, 只能借助于栅偏压、温度和应力等强制手段才能改变。陷阱正电荷的退火主要分为“隧道退火”和“热退火”两种^[1]。“热退火”是在高温条件下, 使空穴脱离陷阱的过程^[2]。“隧道退火”模型认为, 陷阱正电荷的退火, 是由于衬底硅中的电子, 穿过隧道, 与 SiO_2/Si 界面的陷阱空穴复合(或者, 空穴脱离陷阱穿过隧道进入 Si 价带)。

从以上结果可以看出, 强栅压情况下, Si 衬底中的电子通过隧道被注入到 SiO_2 层中, 与那里的陷阱空穴中和, 结果消除了陷阱正电荷。电子能带图示于图 6 中, 图中 V_0 为界面势垒高度。NMOS 中的电子注入 SiO_2 中, 其所要穿过的势垒高度要比 PMOS 中的电子低, 因为 n 型 Si 的费米能级要比 p 型 Si 的费米能级高 1.1eV。 a 为势垒宽度, 文献[5]中报道在栅偏压为 +20V 时, NMOS 的 a 值为 15nm, PMOS 的 a 值为 19nm, 而 NMOS 的 V_0 为 2.9eV, PMOS 的 V_0 为 4.0eV。

SiO_2 中缺陷能级的位置, 目前有几种观点: 一种认为在 Si 导带上方, E_1 ; 一种认为在 Si 价带边缘下^[7], E_2 ; 还有一种认为在 Si 禁带中^[9], E_3 ; 栅压增加, 导带边缘电子密度增大, 穿透率增加, 与空穴陷阱复合的数目就大。同样, 栅压增加, 也增加了 Si 价带电子与能级 E_2 上的空穴陷阱复合的几率。Emelianov 提出的位于 E_3 的陷阱能级热激发与 Si 中电子交换过程也强烈地依赖于栅压。无论陷阱能级位置如何, 强正栅压下, 它们最终都与来自 Si 衬底中的电子复合, 氧化物陷阱正电荷被中性化。

正栅压下的氧化层正电荷退火率由被空穴占据的陷阱的电子俘获截面和隧道电子注入电流决定; 而注入电流等于 Si 衬底中的自由电子密度与注入速度及穿透率的积。正栅压增加, 界面势垒降低, 电子穿透率增加。因 n 型 Si 所需穿透的界面势垒低, 穿透率大, 同样栅压条件下, NMOS 的退火效应比 PMOS 的明显。另外, 大量的可逆火实验^[4,6]证明, 陷阱正电荷不仅能被隧道电子中和, 也被氧化层陷阱或边界陷阱中的电子补偿。电子穿过隧道进入与陷阱空穴相关的电子陷阱, 未移动陷阱空穴的条件下即恢复了电中性。当所加正栅压较大时, 中性电子陷阱俘获的电子较多, 补偿效果更加显著, 加速了陷阱正电荷的退火。

5 结论

强栅压退火能够减少 MOS 结构 SiO_2 中因辐射引起的氧化层陷阱正电荷。实验结果证明, 陷阱正电荷的退火, 是正栅压使 Si 衬底中的自由电子穿过隧道, 与 SiO_2/Si 界面的陷阱空穴复合的结果。正栅压退火

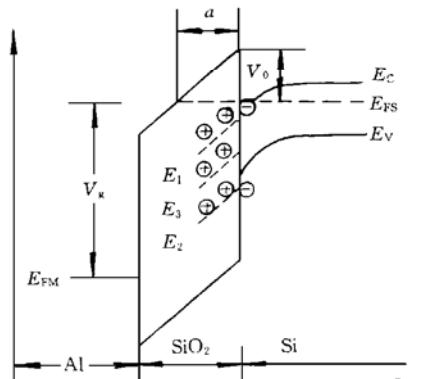


图 6 NMOS 结构电子能带图

FIG. 6 Diagram of Electron

Energy Band for NMOS

不仅对 NMOS 晶体管效果显著, 对 PMOS 晶体管也有影响.

参 考 文 献

- [1] T. P. Ma and P. V. Dressendorfer(editors), Ionizing radiation effects in MOS devices and circuits, Wiley, New York, 1989, chapters 1—4.
- [2] V. Danchenko and V. D. Desai, J. Appl. Phys., 1968, **39**(5): 2417—2424.
- [3] P. S. Winokur, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1984, **31**(6): 1453—1460.
- [4] D. M. Fleetwood, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1993, **40**(6): 1323—1334.
- [5] Kazumichi Suzuki, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1985, **32**(6): 3911—3914.
- [6] 曹建中, 半导体材料的辐射效应, 北京: 科学出版社, 第三章 107—127[CAO Jianzhong, Radiation Effect for Semiconductor Materials, Science Press, Chap. 3, 107—127(in Chinese)].
- [7] A. J. Lelis, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1989, **36**(6): 1808—1815.
- [8] J. R. Schwank, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1984, **31**(6): 1434—1438.
- [9] V. V. Emeianov, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1996, **43**(6): 2572—2578.
- [10] 张国强, 陆 妍, 范 隆, 等, 半导体学报, 1997, **18**(4): 297—301[ZHANG Guoqiang, LU Wu, FAN Long *et al.*, Chinese Journal of Semiconductors, 1997, **18**(4): 297—301(in Chinese)].