

低温低剂量率下金属-氧化物-半导体器件的辐照效应

张廷庆¹⁾ 刘传洋¹⁾ 刘家璐¹⁾ 王剑屏¹⁾ 黄 智¹⁾ 徐娜军²⁾ 何宝平²⁾ 彭宏论²⁾ 姚育娟²⁾

¹⁾ 西安电子科技大学微电子学研究所 ,西安 710071)
²⁾ 西北核技术研究所 ,西安 710024)
(2001 年 4 月 23 日收到 ,2001 年 7 月 3 日收到修改稿)

对金属-氧化物-半导体(MOS)器件在低剂量率 γ 射线辐照条件下的剂量率效应以及温度效应进行了研究. 对不同剂量率、不同温度辐照后 MOS 器件的阈值电压漂移进行了比较. 结果表明 ,低剂量率辐照下 ,感生界面态要受到辐照时间的长短以及生成的氢离子数目的影响 ,辐照时间越长 ,生成的氢离子越多 ,感生界面态密度越大 ,温度对界面态的影响与界面态建立的时间有关 ,低温辐照时 ,界面态建立的时间要加长.

关键词 :辐照效应 ,阈值电压漂移 ,低剂量率 ,低温 ,界面态
PACC :6180E ,7340Q ,7340T

1 引 言

随着数字集成电路日益广泛的应用以及宇航事业的飞速发展 ,金属-氧化物-半导体(MOS)器件及 MOS 集成电路在航天环境中的应用也越来越广泛. 在这些特殊的环境中 ,MOS 器件不可避免地会受到太空环境的辐射. 大量的测试结果表明 ,当 MOS 器件工作在核辐射的环境中时 ,其性能会发生变化 ,如阈值电压的漂移 ,反向电流的增大 ,迁移率和跨导的降低等 ,严重的辐照还会导致集成电路失效^[1].

已有许多研究表明^[2-5] ,MOS 器件的辐照效应受到辐照总剂量、辐照剂量率、器件偏置条件、辐照温度以及氧化层工艺等多种条件的影响 ,国内有关这方面的研究已有许多报道^[6,7]. 但是对 MOS 器件低剂量率辐照效应的研究还比较少 ,而关于低温低剂量率辐照效应的研究还未见报道 ,为此 ,本文研究了 MOS 器件的低温低剂量率辐照效应 ,在此基础上对其辐照机理进行了深入的讨论.

2 MOS 器件的辐照实验

实验采用西安微电子研究所研制的 CC4007 器件 ,该器件由两对 P 沟道金属-氧化物-半导体(PMOS)、N 沟道金属-氧化物-半导体(NMOS)和一个

互补金属-氧化物-半导体(CMOS)倒相器构成 ,在制造工艺中采用了辐照加固处理. MOS 管氧化层厚度为 70nm ,沟道长度为 $3\mu\text{m}$,沟道的宽长比分别为 :P 管 50.67 ,N 管 25.3.

器件辐照采用西北核技术研究所 Co^{60} 辐照源 ,实验中使用的 γ 射线的剂量率分别为 2.3 ,1.0 ,0.1 以及 $0.0758\text{rad}(\text{Si})/\text{s}$,前三个剂量率辐照时器件放置在常温环境下 ,后一个剂量率辐照时器件则被放到 -30°C 的低温环境中. 辐照剂量率采用热释光法标定. 由于使用的是经过加固处理的器件 ,辐照最大总剂量为 $2.5 \times 10^5 \text{ rad}(\text{Si})$. 在辐照过程中 CC4007 器件的两对 N 管、P 管的漏极相连 ,接成倒相器形式 ,P 管源极接 $+5\text{V}$,N 管源极接地 ,栅极采用两种不同的偏压 0 和 $+5\text{V}$,使 P 管 N 管分别处于最坏偏置条件下.

实验所用的测量仪器为惠普公司的 HEWLETT PACKARD 4156A 精密半导体参量分析仪和 HEWLETT PACKARD 3488A 开关控制仪.

众所周知 ,电离辐照引起的阈值电压漂移是由氧化层中的氧化物陷阱电荷和 Si/SiO_2 界面处界面态陷阱电荷两部分引起的. 为了分离这两部分电荷对 MOS 器件阈值电压漂移的贡献 ,在本实验中我们先测量 MOS 器件亚阈特性曲线 ,然后利用半带电压法^[8]将阈值电压漂移分离成由氧化物陷阱电荷引起的漂移 ΔV_{ot} 和由界面态陷阱电荷引起的漂移 ΔV_{it} .

两部分。

3 实验结果与讨论

3.1 辐照剂量率对器件阈值电压漂移的影响

图 1 为不同剂量率在常温辐照下 NMOS 管阈值电压漂移 ΔV_{th} 随辐照总剂量的变化情况,栅压为 +5V。从图 1 中可以看出,随着辐照剂量率的增大,阈值电压漂移的绝对值也在增大,辐照总剂量越大,阈值电压漂移的绝对值也越大,当总剂量达到 $1 \times 10^5 \text{ rad(Si)}$ 时,被剂量率为 2.3, 1.0, 0.1 rad(Si)/s 辐照的 NMOS 器件的阈值电压漂移的绝对值分别约为 0.65, 0.45, 0.25V。

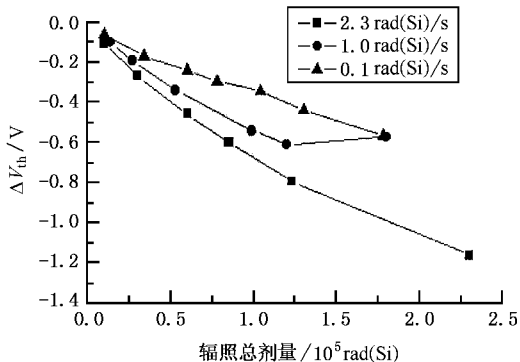


图 1 NMOS 管在不同剂量率下 ΔV_{th} 与辐照总剂量的关系

图 2 和图 3 分别为图 1 经半带电压法分离后得到的不同剂量率下 NMOS 管由界面态陷阱电荷和氧化物陷阱电荷引起的阈值电压漂移 ΔV_{it} , ΔV_{ot} 随辐照总剂量的变化曲线。

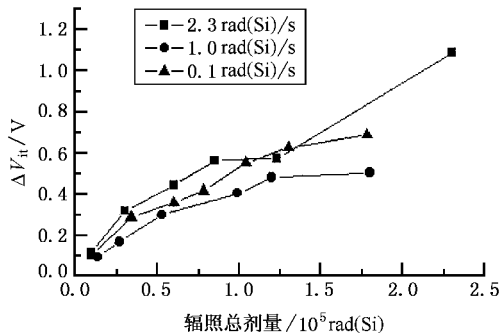


图 2 NMOS 管在不同剂量率下 ΔV_{it} 与辐照总剂量的关系

从图 2 可以看到, NMOS 器件由界面态陷阱电荷引起的阈值电压漂移 ΔV_{it} 为正值, 随着辐照总剂

量的增加 ΔV_{it} 也在相应增加, 然而 ΔV_{it} 并不是随辐照剂量率的增加而相应的增减, 在图 2 中 3 个剂量率点辐照曲线中, 辐照到相同剂量时, 剂量率为 1.0 rad(Si)/s 辐照下器件的 ΔV_{it} 最小, 剂量率为 2.3 rad(Si)/s 辐照下器件的 ΔV_{it} 最大。从图 3 可看到, NMOS 器件由氧化物陷阱电荷引起的阈值电压漂移 ΔV_{ot} 为负值; 随着辐照总剂量的增大, ΔV_{ot} 也在增大, 辐照到相同剂量时, 随着剂量率的增加, ΔV_{ot} 的绝对值在逐渐增大。从图 2 和图 3 中可知, 在所研究的低剂量率辐照下, 不同剂量率辐照的器件 ΔV_{it} 和 ΔV_{ot} 差别不大。尽管 ΔV_{ot} 为负值, 与 ΔV_{it} 有一定的抵消作用, 但剂量率对辐照效应引起的阈值电压漂移的影响还是比较大的。对 PMOS 器件的低剂量率辐照效应也有类似的实验现象。

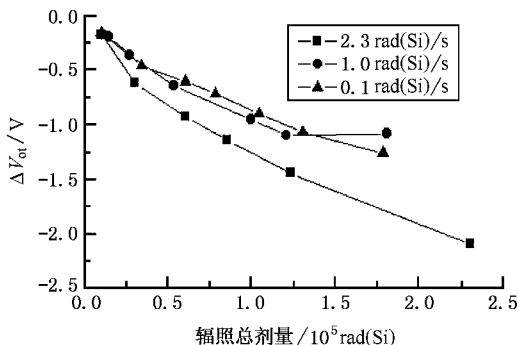


图 3 NMOS 管在不同剂量率下 ΔV_{ot} 与辐照总剂量的关系

当器件被辐照时, 在栅氧化层中产生了大量的电子空穴对, 在经过初始的复合后, 在电场的作用下, 电子被快速地扫出氧化层, 而经复合后剩下的空穴则要向界面运动, 在运动过程中, 一部分穿越界面进入衬底, 另一部分被氧化物陷阱所俘获, 形成氧化物陷阱电荷。另外, 从界面态建立的氢离子两步模型^[9, 10]看, 随着辐照剂量的增加, 辐照感生的电子、空穴对在增多, 这样被氧化物陷阱俘获的空穴及生成的氢离子就多, 生成的氢离子使得界面态密度增大, 从而使得 ΔV_{it} 和 ΔV_{ot} 的绝对值都在增加。

当辐照剂量率不同时, 辐照到相同剂量时需要的时间就不一样, 辐照剂量率高的需要时间就短, 辐照产生的空穴越过界面进入衬底的就少, 被氧化物陷阱俘获形成氧化物陷阱电荷密度也就越大, 从而使得由氧化物陷阱电荷引起的阈值电压漂移在增大。界面态的建立过程比较复杂, 因此界面态陷阱电荷随辐照剂量率的变化要考虑多种因素的影响。首先辐照剂量率不同时, 辐照到相同剂量所需的时间

就不一样,而界面态的建立是一个很慢的过程,因而感生界面态陷阱电荷与界面态建立的时间有密切的关系,这样辐照时间上的差异导致了界面态陷阱电荷的不同.其次,根据界面态建立的氢离子两步模型^[9,10],界面态的数量与感生氧化物陷阱电荷有直接的关系,在辐照过程中,空穴被氧化物陷阱俘获形成氧化物陷阱电荷越多,则放出的能量越多,打破 Si—H 键生成 H^+ 也就越多,从而使得界面态就多.在低剂量率辐照时,辐照时间很长,产生感生界面态陷阱电荷差异的主要原因已经不再是时间的多少,而是辐照中生成的 H^+ 数目.从图 2 和图 3 中可以看出剂量率为 2.3rad(Si)/s 辐照后器件比 1.0 及 0.1rad(Si)/s 辐照后器件感生氧化物陷阱电荷要多很多,而 1.0rad(Si)/s 辐照后器件与 0.1rad(Si)/s 辐照后器件的感生氧化物陷阱电荷相差不是太多,而此时辐照时间又相差特别大,达到 10 倍,因此辐照到相同剂量时, 2.3rad(Si)/s 辐照后器件感生的界面态陷阱电荷最多,而 1.0rad(Si)/s 辐照后的最少.在辐照实验中我们还发现影响界面态建立的因素还有栅压偏置产生的电场.它对界面态影响的因素有两个方面,一是影响电子空穴对的分离,从而影响感生空穴的数目,进而影响 H^+ 的数目,另外就是影响 H^+ 的运动,正方向电场促进 H^+ 的运动,从而使得加栅压器件辐照感生的界面态陷阱电荷远远多于不加栅压的界面态陷阱电荷.

3.2 辐照温度对器件阈值电压漂移的影响

图 4 是不同温度时,低剂量率辐照下 NMOS 管阈值电压漂移 ΔV_{th} 随辐照总剂量的变化情况,辐照时所加栅压为 5V .从图 4 中可以看出,辐照相同剂量时,温度越低则 ΔV_{th} 的绝对值越大,且随着辐照总剂量的不断增加,不同温度下的阈值电压漂移值相差越来越大.当辐照总剂量达到 $1 \times 10^5\text{rad(Si)}$ 时, -30°C 辐照下的 NMOS 管的 ΔV_{th} 的绝对值比 27°C 辐照下的 NMOS 管的 ΔV_{th} 的绝对值大了约 0.4V .

图 5 和图 6 分别为图 4 经半带电压法分离后得到的低剂量率不同辐照温度下 NMOS 管由界面态陷阱电荷和氧化物陷阱电荷引起的阈值电压漂移 ΔV_{it} , ΔV_{ot} 随辐照总剂量变化的曲线.从图 5 和图 6 中可以看到,随着辐照温度的降低,界面态陷阱电荷引起的阈值电压漂移减少,而氧化物陷阱电荷引起的阈值电压漂移量却在增加.同时随着辐照剂量的增加,在不同温度下由氧化物陷阱电荷引起的阈值

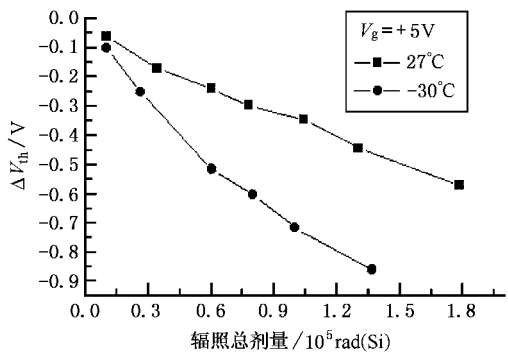


图 4 NMOS 管在不同温度下 ΔV_{th} 与辐照总剂量的关系

电压漂移相差越来越大,而由界面态陷阱电荷引起的阈值电压漂移的差值却变化不明显.

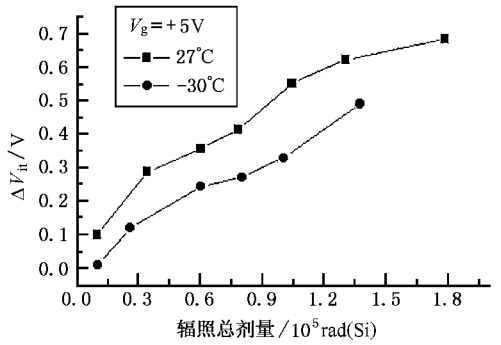


图 5 NMOS 管在不同温度下 ΔV_{it} 与辐照总剂量的关系

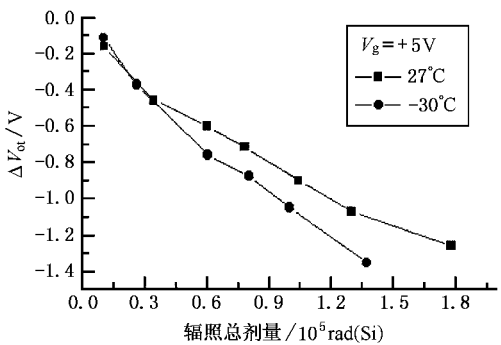


图 6 NMOS 管在不同温度下 ΔV_{ot} 与辐照总剂量的关系

通过对试验结果进一步讨论可知,在不同辐照温度下,PMOS 器件和 NMOS 器件辐照过程中由界面态陷阱电荷和氧化物陷阱电荷引起的阈值电压漂移在量上的变化趋势是一致的,辐照产生的氧化物陷阱电荷随温度的降低而增大,而界面态陷阱电荷却在减少,但变化量大小有所区别,NMOS 器件感生氧化物陷阱电荷的变化量明显比 PMOS 器件的要

大.辐照感生氧化物陷阱电荷密度随温度的降低而增加,主要原因可以认为是随着温度的降低,一方面辐照感生的空穴具有的能量变小而不容易进入衬底中去,另一方面被陷于氧化层中空穴陷阱的载流子从晶格振动中获得的能量减小变得不容易被从陷阱发射出去,使得感生氧化物陷阱电荷变多,同时温度降低,注入到陷阱区的隧道电子同样会减少^[11],这样被陷阱俘获的空穴发生复合的就不多,从而使得辐照感生氧化物陷阱电荷增多.温度变化时同样要使感生界面态陷阱电荷密度发生变化,根据界面态建立的氢离子两步模型,界面态的建立需要很长时间,它要受到电场和温度的影响.随着辐照温度的降低,界面态的建立速度减慢,辐照到相同剂量时,则温度低的界面态建立的少,感生界面态陷阱电荷也就少;另外,温度降低,氧化物晶格传递给载流子的能量也在减少,这样打破 Si—H 键生成 H⁺ 的数目在减少,运动到界面附近的 H⁺ 数量也就会跟着减少,从而使得界面态密度减小,最终导致感生界面陷阱电荷密度减少.

4 结 论

通过以上的对不同剂量率、不同温度下的 MOS 器件辐照实验结果的对比和分析讨论,可以得到以下结论:

1. 低剂量率下剂量率对 MOS 器件辐照效应的影响与高剂量率下并不相同,尤其对界面态建立的影响是完全不一样,辐照时间与氢离子数目共同影响着辐照感生界面态密度大小.
2. 温度对辐照效应的影响主要是决定界面态建立的速度,随着温度降低,界面态建立的速度变慢,所需时间加长.
3. 界面态建立过程中 H 离子的数目与感生氧化物陷阱电荷数目有直接的关系,它们同增同减.
4. 剂量率及温度对辐照效应的影响也从另一个侧面对界面态建立的 H 离子运动两步模型提供了一定的佐证.

- [1] T. P. Ma, Paul V. Dressendorfer, *Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits* (A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons 1989).
- [2] J. R. Schwank, F. W. Sexton, D. M. Fleetwood, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **35**(1988), 1432.
- [3] M. R. Shaneyfelt, J. R. Schwank, D. M. Fleetwood, P. S. Winokur, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **45**(1998), 1372.
- [4] A. V. Sogoyan, S. V. Cherepko, V. V. Emelianov, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **40**(1998), 69.
- [5] T. Q. Zhang, J. L. Liu, J. J. Li *et al.*, *Acta Phys. Sin.*, **48**(1999), 2299[in Chinese] 张廷庆、刘家璐、李建军等, *物理学报*, **48**(1999), 2299.
- [6] Z. X. Zhang, J. S. Luo, R. F. Yuan *et al.*, *Chin. J. Semicond.*, **20**(1999), 699[in Chinese] 张正选、罗晋生、袁仁峰等, *半导体*

学报, **20**(1999), 682].

- [7] L. Fan, D. Y. Ren, G. Q. Zhang *et al.*, *Chin. J. Semicond.*, **21**(2000), 383[in Chinese] 范 隆、任迪远、张国强等, *半导体学报*, **21**(2000), 383].
- [8] P. S. Winokur, J. R. Schwank, P. J. Mcwhorter, P. V. Dressendorfer, D. C. Turpin, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **31**(1984), 1453.
- [9] P. S. Winkour, H. E. Beoch, Jr. J. M. Me Garrity, F. B. Mclean, *J. Appl. Phys.*, **50**(1979), 3492.
- [10] R. E. Stahlbush, A. H. Edwards, D. L. Griscom, B. J. Mrstik, *J. Appl. Phys.*, **72**(1993), 658.
- [11] J. P. Wang, N. J. Xu, T. Q. Zhang *et al.*, *Acta Phys. Sin.*, **49**(2000), 1334[in Chinese] 王剑屏、徐娜军、张廷庆等, *物理学报*, **49**(2000), 1334].

RADIATION EFFECTS OF MOS DEVICE AT LOW DOSE RATE AND LOW TEMPERATURE

ZHANG TING-QING¹⁾ LIU CHUAN-YANG¹⁾ LIU JIA-LU¹⁾ WANG JIAN-PING¹⁾ HUANG ZHI¹⁾

XU NA-JUN²⁾ HE BAO-PING²⁾ PENG HONG-LUN²⁾ YAO YU-JUAN²⁾

¹⁾ *(Research Institute of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China)*

²⁾ *(Northwest Nuclear Technology Institute, Xi'an 710024, China)*

(Received 23 April 2001; revised manuscript received 3 July 2001)

ABSTRACT

Effects of irradiation dose rates and irradiation temperature are investigated for MOS device under γ -rays. Threshold voltage shift is compared after the MOS devices are radiated at different dose rates and different temperatures. At low dose rate, interface trap formation is affected by the irradiation time and H^+ induced in the oxide, the longer the device is radiated and the greater the number of induced H^+ , the more the interface trap. The effects of temperature on radiation response are related to the time of interface trap formation, it takes more time to form interface trap at low temperatures.

Keywords : radiation effects, threshold voltage shift, low dose rate, low temperature, interface trap

PACC : 6180E, 7340Q, 7340T