

氧化层厚度对NPN双极管辐射损伤的影响

席善斌^{1,2} 陆 妩¹ 王志宽³ 任迪远¹ 周 东^{1,2} 文 林¹ 孙 静¹

1 (新疆电子信息材料与器件重点实验室, 中国科学院新疆理化技术研究所 乌鲁木齐 830011)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

3 (模拟集成电路国家重点实验室 重庆 400060)

摘要 研究了不同氧化层厚度的两种国产NPN双极晶体管在高低剂量率下的辐射效应和退火特性。结果显示, 随总剂量的增加, 晶体管基极电流增大, 电流增益下降, 且薄氧化层的晶体管比常规厚氧化层的晶体管退化更严重。另外, 两种NPN晶体管均表现出明显的低剂量率损伤增强效应。本文对各种实验现象的损伤机理进行了分析。

关键词 NPN双极晶体管, ^{60}Co γ 辐照, 氧化层厚度, 剂量率效应

中图分类号 TN322+.8

1991年Enlow等发现某些双极晶体管具有低剂量率辐射损伤增强效应(enhanced low dose rate sensitivity, ELDRS), 具体表现为双极器件和集成电路的低剂量率辐射损伤明显高于高剂量率, 且高剂量率辐照后进行与低剂量率辐照等时的室温退火并不能模拟这种损伤的差异。此后有大量的关于ELDRS效应的报道, 这些研究涉及不同类型双极器件(包括运算放大器、A/D转换器、比较器等)和电路的ELDRS效应及损伤机理^[1-5], 以及不同的辐照环境(如偏置条件、温度等)对双极器件的总剂量率效应和ELDRS效应的影响^[6-9]。但是, 对于半导体制造工艺参量的变化对双极器件的辐射效应及ELDRS效应影响的研究, 却较少报道。研究发现, 双极器件的电离辐照效应与器件的类型和制造工艺等有非常密切的关系^[6,10,11]。

因此, 研究半导体制造工艺对双极器件的电离辐照效应的影响具有重要意义, 可为双极器件抗低剂量率辐照加固技术的研究提供实验依据。

为进一步了解双极器件的电离辐照损伤特性的影响因素, 我们设计制作了具有相同工艺条件但屏蔽氧化层厚度不同的两种横向NPN型双极晶体管, 研究不同剂量率下的辐射效应和退火特性。本文主要介绍氧化层厚度对NPN双极晶体管辐射效应的影响, 并作机制探讨。

1 材料与方法

NPN双极晶体管, 模拟集成电路国家重点实验室提供, 分为两组: 常规厚度氧化层和薄氧化层双极晶体管。辐照实验在中国科学院新疆理化技术研究所 ^{60}Co 源上进行。辐照剂量率为0.13 mGy(Si)/s和0.5 Gy(Si)/s, 总剂量为1 000 Gy(Si)。样品置于根据美军标准制作的铅铝屏蔽盒内, 以消除低能散射的影响, 防止剂量增强效应的发生。

样品晶体管辐照时作正向偏置: 基极接+2 V, 发射极和集电极接地。双极晶体管采用美国惠普公司生产的HP4142半导体参数分析仪测试, 测试参数: 双极晶体管基极电流(I_B)、集电极电流(I_C)、电流增益($\beta=I_C/I_B$)。辐照与参数测量均在室温下进行, 测试均在辐照或退火后20 min内完成。

2 实验结果

NPN双极晶体管的高低剂量率的辐射效应及室温退火特性表明, NPN双极晶体管对电离辐射非常敏感, 在所测试的参数中 I_B 和 $\beta=I_C/I_B$ 变化显著, 而 I_C 变化很小。为对各种条件下的辐射损伤进行比较, 所有电参数取值时自基-射结电压均为0.6 V, 并引入两个参数: 过剩基极电流($\Delta I_B=I_{B\text{post}}-I_{B0}$)、归一化电流增益(β/β_0)。

国家自然科学基金项目(No.10975182)资助

第一作者: 席善斌, 男, 1985年出生, 2008年毕业于合肥工业大学, 现为中科院新疆理化技术研究所博士研究生, 微电子学与固体电子学
通讯作者: 陆 妩

收稿日期: 2011-12-05, 修回日期: 2012-01-04

图 1 为不同氧化层厚度的 NPN 双极晶体管的 ΔI_B 随辐照总剂量及室温退火时间的变化。相同剂量率下,氧化层厚度对 NPN 双极晶体管的电离辐照效应影响显著,表现为薄氧化层 NPN 双极晶体管的 ΔI_B 明显高于常规厚氧化层 NPN 双极晶体管的 ΔI_B ,且差距随辐照总剂量增大;对于相同氧化层厚度的 NPN 双极晶体管,高剂量率辐照时的 ΔI_B 明显低于低剂量率辐照时,且在低剂量率辐照等时的室温退火过程中有恢复初值的趋势,但趋势很小。图 1 结果表明,常规厚度氧化层和薄氧化层的样品均表现出明显的 ELDRS 效应。

图 2 为不同氧化层厚度的 NPN 双极晶体管的归

一化电流增益随辐照总剂量及室温退火时间的变化。相同剂量率辐照下,薄氧化层 NPN 双极晶体管的电流增益退化更为明显。不同氧化层厚度的 NPN 晶体管均有明显的 ELDRS 效应,但显著程度是否一样还需进一步分析。Pershenkov 等^[12]用剂量率因子 K 来描述双极晶体管的 ELDRS 效应: $K=\Delta I_{BL}/\Delta I_{BH}$,其中 ΔI_{BL} 和 ΔI_{BH} 分别表示低、高剂量率辐照时过剩基极电流大小。根据美军标 MIL-STD-883G,若 $K>1.5$,则存在 ELDRS 效应,且 K 越大表示 ELDRS 效应越明显;若 $K\leq 1.5$,则不存在 ELDRS 效应。

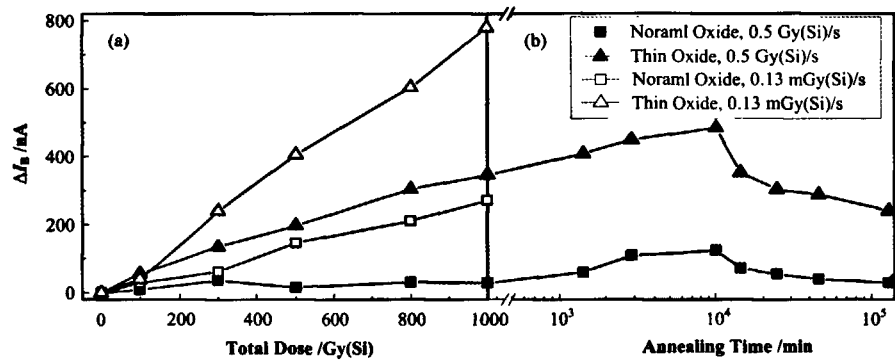


图 1 不同氧化层厚度 NPN 双极晶体管过剩基极电流(ΔI_B)随辐照总剂量及室温退火时间的变化
Fig.1 The excess base current (ΔI_B) of NPN BJTs vs total dose (a) and RT annealing time (b).

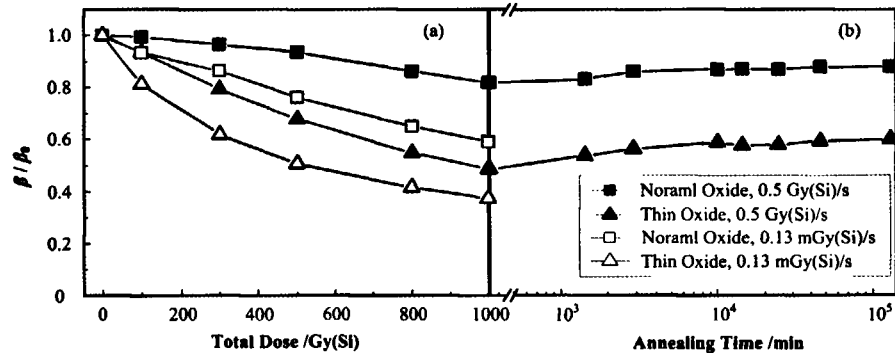


图 2 不同氧化层厚度的 NPN 双极晶体归一化电流增益随辐照总剂量及室温退火时间变化规律
Fig.2 Normalized current gain (β/β_0) vs. total dose (a) and RT annealing time (b).

图 3 为两种氧化层厚度 NPN 双极晶体管的 K 值随辐照总剂量的变化规律。常规厚度氧化层的 NPN 晶体管的 K 值大于薄氧化层,即氧化层厚的 NPN 双极晶体管 ELDRS 效应更明显。另外,对于薄氧化层 NPN 双极晶体管,在总剂量 $D=100\text{ Gy(Si)}$ 时, $K=0.685$;而厚常规厚氧化层 NPN 双极晶体管在这个点的 $K=3.5$ 。

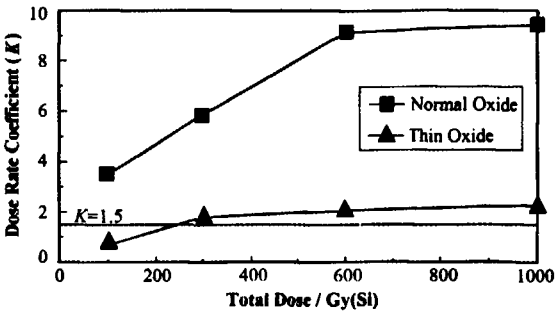


图 3 K 值随辐照总剂量的变化规律
Fig.3 The dose rate coefficient vs. total dose.

3 讨论

电离辐射在晶体管的隔离氧化层中产生大量的电子-空穴对。在氧化物电场作用下,电子和空穴朝相反方向运动^[13]。由于电子在氧化物中的漂移速度远远大于空穴^[1],大量电子会迅速漂移出氧化物,而大部分空穴则会被氧化物陷阱俘获形成氧化物正电荷。同时,在空穴缓慢向 Si-SiO₂ 界面移动的过程中,和界面附近的 Si-H 钝化键反应生成氢离子。空穴或氢离子被界面附近的氧化物陷阱或界面陷阱俘获,形成净正氧化物电荷或界面陷阱电荷^[1,3,5,6,11]。

用多级俘获模型^[14]描述空穴在 SiO₂ 氧化层中的迁移过程,电离辐射产生的空穴会经历多次被陷阱俘获又发射的过程。陷阱有深浅,浅陷阱中的空穴易于重新摆脱束缚,而一旦被深陷阱俘获,发射几率很小。文献[1]认为深陷阱在离界面 20 nm 内呈高斯分布,且在界面处达最大值,而浅陷阱在 SiO₂ 体内呈无规则分布。空穴被浅陷阱俘获后成为亚稳态氧化物陷阱电荷,这种电荷的大量存在是空间电场形成的主要原因。而氧化层体内的亚稳态氧化物陷阱电荷的数量与空穴的产生率(g)及平均输运时间(t_0)有关。 g 越大, t_0 越大,则氧化层内的亚稳态氧化物陷阱电荷的数量越大。空穴的平均输运时间^[5]($t_0=L/(\mu_p E_0)$, L 为氧化层厚度)是指在恒定电场下空穴穿过氧化层的平均时间,它与辐照剂量率无关,而与氧化层中的电场、辐照温度、氧化层厚度及氧化层的陷阱浓度等有关。氧化层中电场增强或辐照温度升高均能加快空穴的输运速度,减小 t_0 。由文献[13], t_0 与 L^3 成正比关系,这是由于氧化层增厚、氧化层内陷阱浓度增加以电场减小而引起的。

本文的两种氧化层厚度的 NPN 双极晶体管均表现出明显的 ELDRS 效应(图 1、图 2),这可由空间电场模型^[1-4,9,14]解释。该模型认为高剂量率辐照时,在基区氧化层内迅速产生大量的亚稳态或慢输运的浅氧化物陷阱电荷,这些电荷在氧化层内形成较强的带正电空间电场,阻碍辐射感生的正电荷(包括空穴和 H^+)到达 Si-SiO₂ 界面,少数辐射感生的空穴和极少数的 H^+ 经很长时间能到达 Si-SiO₂ 界面,其余被深陷阱俘获,或在界面处与钝化键发生反应生成界面缺陷。在低剂量率辐照时,由于其辐射感生正电荷的产生速率远低于高剂量率辐照,其基区氧化层内产生的亚稳态或慢输运的浅氧化物陷阱电荷少,形成的空间电场也较弱。所以,在弱电场、

长时间的辐照下,辐射感生的空穴和 H^+ 有足够的时间输运到 Si-SiO₂ 界面,并与钝化键反应生成界面缺陷。低剂量率辐照比高剂量率有更多的净正氧化物电荷和界面缺陷,从而增加了过剩基极电流,最终造成了低剂量率辐射损伤增强效应的产生。

由空间模型对 ELDRS 效应的解释,氧化层厚度相同的双极晶体管表现出明显的 ELDRS 效应,这主要是在不同辐照剂量率时,由空穴的产生率不同造成的(氧化层厚度相同时,空穴的平均输运时间相同)。而厚氧化层双极晶体管的 ELDRS 效应明显强于薄氧化层(图 3),与不同厚度氧化层的空穴平均输运时间不同有关。高剂量率辐照时的空穴产生率高,空间电场建立速度和强度随 t_0 增加(即空穴输运的速度降低);对低剂量率辐照,虽然空间电场的建立速度和强度也随 t_0 增加,但其空穴产生率远低于高剂量率,形成的空间电场就很弱,则 t_0 的增加对空间电场的建立影响较小。于是, t_0 越大,高、低剂量率辐照时建立的空间电场间的差距越大,ELDRS 效应就越明显。厚氧化层内 t_0 大于薄氧化层,其 ELDRS 效应就明显强于薄氧化层。文献[1]、[3]、[7-9]报道的氧化层内电场和辐照温度上升均能降低双极器件的 ELDRS 效应,因为辐照时电场增加或温度上升降低了 t_0 。故 t_0 的大小决定着器件的 ELDRS 效应明显程度,当 t_0 降至一定数值时,可能就不存在 ELDRS 效应。

综上所述,当辐照剂量率相同时,厚氧化层内空间电场建立的速度和强度均大于薄氧化层,因此厚氧化层内建立的空间电场对空穴和 H^+ 向 Si-SiO₂ 界面的阻碍作用更强。另外,相同总剂量下,厚氧化层内产生的空穴总量高于薄氧化层,且增加的空穴总量大多位于氧化层的上表面,由于其 t_0 大,这部分增加的空穴可能被厚氧化层内强的空间电场所阻碍,而不能输运到 Si-SiO₂ 界面。因此,厚氧化层的净正氧化物电荷和界面态的数量小于薄氧化层,辐照剂量率相同时,薄氧化层双极晶体管的辐照损伤大于厚氧化层。

4 结语

通过上述研究可以得出以下结论:

(1) 常规厚氧化物及薄氧化物的 NPN 双极晶体管均表现出明显的 ELDRS 效应,且常规氧化物 BJT 的 ELDRS 效应更显著;

(2)辐照剂量率相同时,薄氧化物 BJT 的辐照损伤明显大于常规厚度氧化物,不同氧化层厚度的 NPN 双极晶体管间的电离辐照效应的差异,主要缘于空穴在不同厚度氧化层中的输运速度不同。薄氧化层中空穴的输运速度高于厚氧化层,降低了氧化物体内空间电场的强度,导致薄氧化层拥有更多的净正氧化物电荷及界面态,增加了过剩基极电流。

参考文献

- Graves R J, Cirba C R, Schrimpf R D, *et al.* Modeling low-dose-rate effect in irradiated bipolar-base oxides [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1998, 45: 2352-2360
- Witzak S C, Laco R C, Mayer D C, *et al.* Space charge limited degradation of bipolar oxides at low electric fields [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1998, 45: 2339-2351
- Fleetwood D M, Kosier S L, Nowlin R N, *et al.* Physical mechanisms contributing to enhanced bipolar gain degradation at low dose rates [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1994, 41: 1871-1883
- 陆妩, 余学锋, 任迪远, 等. 双极晶体管不同剂量率的辐射效应和退火特性[J]. 核技术, 2005, 28(12): 925-928
LU Wu, YU Xuefeng, REN Diyu, *et al.* Radiation effects and ageing characteristics of bipolar junction transistors subjected to high and low dose rate total dose irradiation [J]. Nucl Tech, 2005, 28(12): 925-928
- Rashkeev S N, Cirba C R, Fleetwood D M, *et al.* Physical model for enhanced interface-trap formation at low dose rates [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2002, 49: 2650-2655
- Schmidt D M, Fleetwood D M, Schrimpf R D, *et al.* Comparison of ionizing radiation induced gain degradation in lateral, substrate, and vertical PNP BJTs [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1995, 42: 1541-1549
- Pease R L, Cohn L M, Fleetwood D M, *et al.* A proposed hardness assurance test methodology for bipolar linear circuits and devices in a space ionizing radiation environment [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1997, 44: 1981-1988
- Witzak S C, Schrimpf R D, Fleetwood D M, *et al.* Hardness assurance testing of bipolar junction transistors at elevated irradiation temperatures [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1998, 44: 1989-2000
- 陆妩, 任迪远, 郑玉展, 等. 双极运算放大器 ELDRS 效应的变温加速辐照方法研究[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(9): 699-775
LU Wu, REN Diyu, ZHENG Yuzhan, *et al.* Accelerated simulation method to evaluate enhanced low dose rate sensitivity of bipolar operational amplifiers by decreasing temperature in step during irradiation [J]. At Energy Sci Tech, 2009, 43(9): 699-775
- 郑玉展, 陆妩, 任迪远, 等. 不同发射极面积 NPN 双极晶体管高低剂量率辐射损伤特性[J]. 物理学报, 2009, 58(8): 5560-5565
ZHENG Yuzhan, LU Wu, REN Diyu, *et al.* Characteristics of high- and low-dose-rate damage for domestic npn transistors of various emitter areas [J]. Acta Phys Sin, 2009, 58(8): 5560-5565
- 席善斌, 陆妩, 郑玉展, 等. 不同基区掺杂浓度 NPN 双极晶体管电离辐照效应[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(Suppl): 533-537
XI Shanbin, LU Wu, ZHENG Yuzhan, *et al.* Radiation effect of NPN BJTs under various base doping conditions [J]. At Energy Sci Tech, 2010, 44(Suppl): 533-537
- Pershenkov V S, Maslov V B, Cherepko S V, *et al.* The effect of emitter junction bias on the low dose rate radiation response of bipolar devices [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1997, 44(6): 1840-1848
- Boesch H E, McLean F B. Hole transport and trapping in field oxides [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1985, 32: 3940-394
- 赖祖武, 包宗明, 宋钦岐, 等. 抗辐射电子学. 北京: 国防工业出版社, 1998
LAI Zhuwu, BAO Zongming, SONG Qinqi, *et al.* Radiation effects and hardening electronics. Beijing: National Defence Industry Press, 1998

Effect of oxides thickness on radiation damage to NPN bipolar transistors

XI Shanbin^{1,2} LU Wu¹ WANG Zhikuang³ REN Diyuan¹ ZHOU Dong^{1,2} WEN Lin¹ SUN Jing¹

1 (*Xinjiang Key Laboratory of Electronic Information Material and Device, Xinjiang Technical Institute of Physics & Chemistry,*

Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

2 (*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

3 (*National Key Laboratory of Integrated Circuit, Chongqing 400060, China*)

Abstract Radiation damage, caused by high or low dose rate irradiation, to NPN transistors of different oxide thicknesses is investigated experimentally. The results show that base current of the transistors increased with total dose, but the current gain decreased with increasing total dose. The NPN transistors of thin oxides degraded more than those of ordinary oxide thickness. However, both types of the NPN transistors exhibited the enhanced low dose rate sensitivity (ELDRS). Mechanisms of the effects are discussed.

Key words NPN bipolar transistor, ⁶⁰Co γ-irradiation, Oxide thickness, ELDRS

CLC TN322⁺.8