

变温辐照加速评估方法在不同工艺的 NPN 双极晶体管上的应用

费武雄^{1,2,3}, 陆 妩^{1,2}, 任迪远^{1,2}, 郑玉展^{1,2,3}, 王义元^{1,2,3}, 陈 睿^{1,2,3},
李茂顺^{1,2,3}, 兰 博^{1,2,3}, 崔江维^{1,2,3}, 赵 云^{1,2,3}, 王志宽⁴, 杨永晖⁴

(1. 中国科学院 新疆理化技术研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011;

2. 新疆电子信息材料与器件重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011;

3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049;

4. 模拟集成电路国家重点实验室, 重庆 400060)

摘要:对6种不同工艺的NPN双极晶体管进行了高、低剂量率及变温辐照的⁶⁰Co γ 辐照实验。结果显示,6种工艺的NPN双极晶体管均有显著的低剂量率辐照损伤增强效应。而变温辐照损伤不仅明显高于室温高剂量率的辐照损伤,且能很好地模拟并保守地评估不同工艺的NPN双极晶体管低剂量率的辐照损伤。对实验现象的机理进行了分析。

关键词:NPN双极晶体管;⁶⁰Co γ 辐照;低剂量率辐照损伤增强;变温辐照;加速评估方法

中图分类号:TN322.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-6931(2010)12-1493-05

Application of Accelerated Simulation Method on NPN Bipolar Transistors of Different Technology

FEI Wu-xiong^{1,2,3}, LU Wu^{1,2}, REN Di-yuan^{1,2}, ZHENG Yu-zhan^{1,2,3},
WANG Yi-yuan^{1,2,3}, CHEN Rui^{1,2,3}, LI Mao-shun^{1,2,3}, LAN Bo^{1,2,3},
CUI Jiang-wei^{1,2,3}, ZHAO Yun^{1,2,3}, WANG Zhi-kuan⁴, YANG Yong-hui⁴

(1. *Xinjiang Technical Institute of Physics & Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;*

2. *Xinjiang Key Laboratory of Electronic Information Material and Device, Urumqi 830011, China;*

3. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

4. *National Key Laboratory of Analog Integrated Circuit, Chongqing 400060, China)*

Abstract: With different radiation methods, ionizing radiation response of NPN bipolar transistors of six different processes was investigated. The results show that the enhanced low dose rate sensitivity obviously exists in NPN bipolar transistors of the six kinds of processes. According to the experiment, the damage of decreasing temperature in step during irradiation is obviously greater than the result of irradiated at high dose

rate. This irradiation method can perfectly simulate and conservatively evaluate low dose rate damage, which is of great significance to radiation effects research of bipolar devices. Finally, the mechanisms of the experimental phenomena were analyzed.

Key words: NPN bipolar transistor; ^{60}Co γ irradiation; enhanced low dose rate sensitivity; alter temperature irradiation; accelerated evaluation method

双极器件普遍存在的低剂量率辐照损伤增强(enhanced low dose rate sensitivity, ELDRS)效应^[1-9]给电子元器件的抗辐射能力实验室测试评估方法带来了巨大挑战。如果用实际空间环境的典型剂量率($10^{-6} \sim 10^{-4}$ Gy(Si)/s)辐照器件来对卫星等电子系统使用的电子元器件的抗空间辐射能力进行评估,那么,所消耗的金钱、时间将是巨大的。然而,若用实验室高剂量率($0.5 \sim 3$ Gy(Si)/s)辐照结果来评估器件的抗辐射水平,由于ELDRS效应的存在,则这种评估结果将与电子元器件在实际空间低剂量率的抗辐射能力严重不符,从而给卫星等电子系统的可靠性带来极大隐患。因此,找到一种能够在实验室应用的、高效可靠的双极器件的ELDRS效应的加速评估方法具有重要意义。

新近出台的美军标 MIL-STD-883G 的主要测试评估方法包括:1) 实际低剂量率(0.1 mGy(Si)/s)辐照;2) 加温辐照;3) 高剂量率辐照后加温退火;4) 变剂量率辐照。但方法1、3、4存在耗时过长的问題,而对方法2,国外早年的文献^[7-8]实验结果表明,高温高剂量率辐照损伤要明显小于低剂量率辐照。本实验室近年来对电子元器件的加速评估进行了大量研究,最近提出的变温辐照加速评估方法很好地模拟且保守地评估了不同型号的纯双极运算放大器的低剂量率辐照损伤^[9]。另外,文献^[9]指出,虽变温辐照方法在运算放大器上取得了很大成功,但仍需做大量的实验对普遍的适用性进行验证及对方法进一步完善。

目前,电子元器件早已完成了微型化集成化的转变,但大量器件如滤波器、电压比较器、数-模转换器等器件的基本单元仍是双极晶体管。因此,本工作选用6种不同半导体制造工艺的双极晶体管进行变温辐照实验,来对变温辐照评估方法进行验证。且增加辐照的剂量率,进一步提高变温辐照评估方法的测试效率。

1 实验样品和实验方法

实验样品为集成电路重点实验室提供的6种不同工艺的国产NPN双极晶体管,双极晶体管按工艺分为A、B、C、D、E、F共6组。辐照实验在中国科学院新疆理化技术研究所 2.59×10^{15} Bq大钴源和 3.7×10^{13} Bq小钴源上进行。在所有实验中,NPN晶体管均加反向偏置,室温辐照时,每次辐照均将实验样品放置于根据美军标制作的铅铝屏蔽盒内,以消除低能散射的作用,防止剂量增强效应的发生。室温辐照的剂量率为 0.13 mGy(Si)/s、 0.5 Gy(Si)/s,变温辐照剂量率为 0.03 Gy(Si)/s,辐照累积总剂量 D 均为 1 kGy(Si)。

变温辐照实验在特制的专门用于辐照实验的恒温箱内进行,箱内置有抗辐射的高灵敏度热敏电阻,可实时保证高温辐照期间烘箱内的温度变化不超过 ± 2 °C。变温辐照实验的辐照剂量率为 0.03 Gy(Si)/s,其实验方法如下:先在 125 °C下将器件辐照到 200 Gy(Si)的总剂量,然后改在 100 °C下辐照到 400 Gy(Si),再在 65 °C下辐照到 800 Gy(Si),最后在 50 °C下辐照到 1 kGy(Si)。

所有实验样品参数测量均采用HP4142半导体参数分析仪测试,测试参数为:双极晶体管基极电流(I_B)、集电极电流(I_C)、电流增益($\beta = I_C/I_B$)。每次测试均在辐照后 20 min内完成。

2 实验结果

经研究发现,NPN双极晶体管的所测电学参数中基极电流及电流增益对辐照相当敏感,为了便于辐照结果的比较,选用电流增益来描述辐照损伤的大小,并对其进行归一化处理:归一化电流增益为 β/β_0 。

图1a、b分别为A工艺和B工艺NPN双极晶体管的归一化电流增益在室温高低剂量率辐照及变温辐照下随总剂量的变化规律。从图中可看出,室温时,在两种不同剂量率辐照下,

NPN 双极晶体管的电流增益有显著衰减,但在低剂量率辐照下,NPN 双极晶体管的电流增益衰减幅度及速度更加显著,即 NPN 双极晶体管表现出明显的 ELRDS 效应。另外,从变温辐照和室温辐照的结果比较可看出:在总剂量较小时,变温辐照损伤要小于低剂量率辐照损伤,但当总剂量大于 400 Gy(Si)时,剂量率为 0.03 Gy(Si)/s 的变温辐照损伤稍大于室温低剂量率辐照损伤。即对 A、B 两种工艺的 NPN 双极晶体管,在总剂量较大(>400 Gy(Si))时,变温辐照可较好地模拟器件的低剂量率辐照

损伤。

文献[7-8]指出,恒高温辐照损伤要低于室温低剂量率辐照损伤结果,这与图 1 中变温辐照损伤要大于室温低剂量率辐照损伤结果有明显区别。为了进一步验证变温辐照方法的适用性,本工作又对比了另外 4 种不同工艺 NPN 双极晶体管的 3 种条件的辐照结果,如图 1c、d、e、f 所示。从图中可看出,在总剂量大于 400 Gy(Si)时,变温辐照损伤均稍大于室温低剂量率辐照损伤。但当总剂量小于400 Gy(Si)时,不同工艺的辐照结果有所不同:对于C、D器

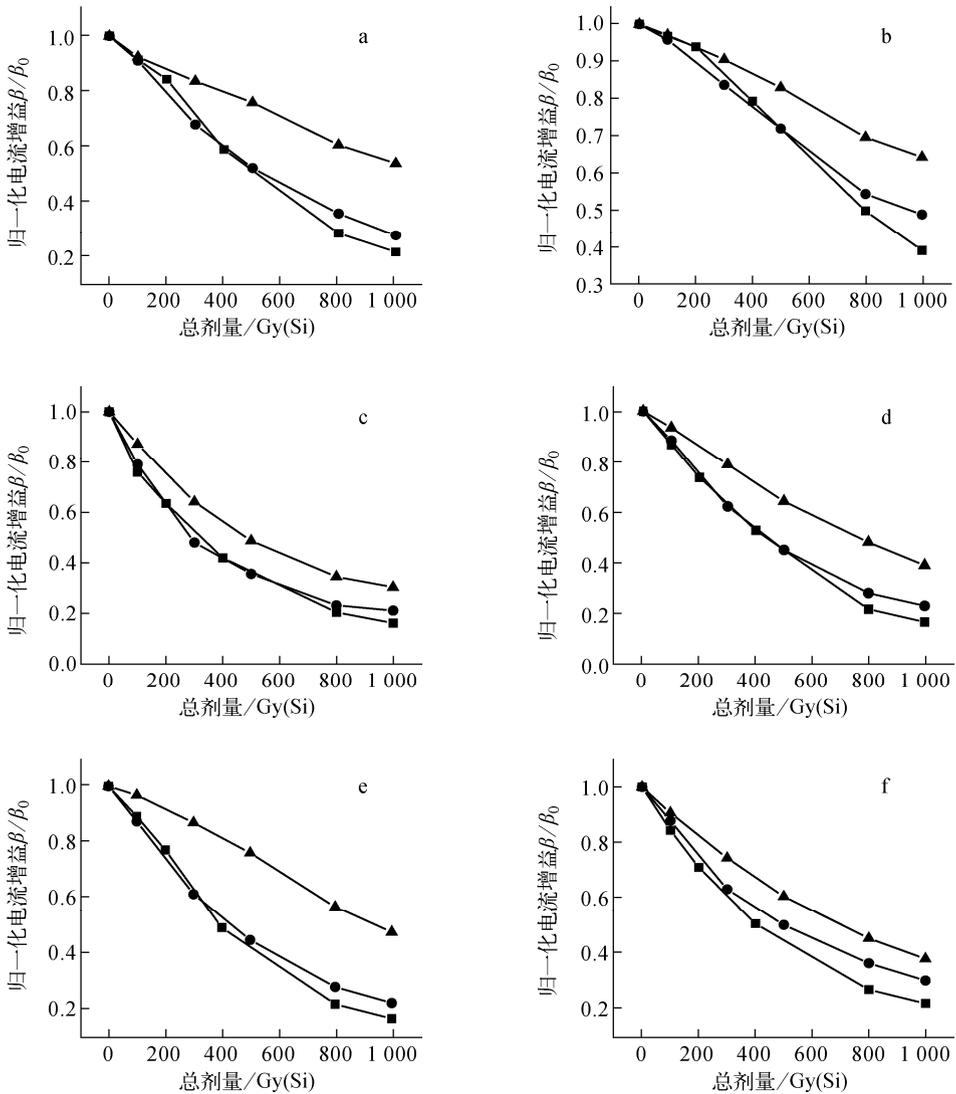


图 1 不同条件下 NPN 双极晶体管归一化电流增益随总剂量的变化

Fig. 1 Normalized current gain of NPN bipolar transistors versus total dose for different radiation methods

a—A 工艺器件;b—B 工艺器件;c—C 工艺器件;

d—D 工艺器件;e—E 工艺器件;f—F 工艺器件

■——变温 0.03 Gy(Si)/s;●——室温 0.13 mGy(Si)/s;▲——室温 0.5 Gy(Si)/s

件,总剂量小于 200 Gy(Si) 时,变温辐照损伤稍大于低剂量率辐照损伤,而总剂量介于 200~400 Gy(Si)时,其变温辐照损伤要稍小于低剂量率辐照损伤;对于 E 器件,总剂量小于 400 Gy(Si)时,变温辐照损伤稍小于低剂量率辐照损伤;对于 F 器件,总剂量小于 400 Gy(Si)时,变温辐照损伤要大于低剂量率辐照损伤。

如上所述,实验所用的 6 种国产 NPN 双极晶体管虽各工艺参数不同,但当总剂量大于 400 Gy(Si)时,变温辐照损伤均稍大于其低剂量率辐照损伤,比较真实且保守地评估了其低剂量率的辐照变化,也即变温辐照加速评估方法得到了很好的验证。

3 讨论

从上面的实验结果可看出,不同工艺的 NPN 双极晶体管均存在 ELRDS 效应。对于 ELRDS 效应的机理,目前国内外进行了大量研究,空间电荷模型得到了普遍认可。空间电荷模型^[1-6]认为:高剂量率辐照的情况下,在基区氧化层内迅速产生大量的亚稳态或慢运输的浅氧化物陷阱电荷,这些电荷在氧化层内会形成一较强的带正电的空间电场,阻碍辐照感生的正电荷(包括空穴和 H^+)到达 Si-SiO₂ 界面,只有少数辐照感生的空穴和极少数的 H^+ 在经历相当长的时间后才到达 Si-SiO₂ 界面,或被深陷阱俘获成为净正氧化物电荷,或与界面处的钝化键反应生成界面态。而在低剂量率辐照的情况下,由于其辐照感生正电荷的产生速率远低于高剂量率辐照,因此,其基区氧化层内产生的亚稳态或慢运输的浅氧化物陷阱电荷少,形成的空间电场也相对较弱。所以,在弱电场、长时间的辐照条件下,辐照感生的空穴和 H^+ 有足够的时间运输到 Si-SiO₂ 界面,并与那里的钝化键反应生成界面态。这样,低剂量率辐照比高剂量率辐照有更多的净正氧化物电荷和界面态,从而增加了过剩基极电流,最终造成了低剂量率辐照损伤增强效应的产生。

从图中可看出,变温辐照损伤明显高于室温高剂量率辐照损伤,且同低剂量率辐照损伤结果很相近,只是稍大于低剂量率辐照损伤。这一现象与浅氧化物陷阱电荷的退火有关。ELRDS 效应的产生主要是由于高剂量率辐照

时,其氧化层内存在着大量的浅氧化物陷阱电荷,这些浅陷阱在 50 °C 即可失去束缚电荷的能力^[3],另外,深陷阱由于陷阱能级深,其退火温度要高于浅陷阱。因此,变温辐照时其氧化层体内的浅氧化物陷阱电荷会因温度的升高而大量退火,导致由于浅氧化物陷阱电荷形成的空间电场被很大地削弱,甚至低于低剂量率辐照时氧化层内的空间电场。所以,在 3 种辐照条件下,变温辐照时到达 Si-SiO₂ 界面的空穴和氢离子最多,从而拥有最大的辐照感生净正氧化物电荷浓度及界面态浓度。但温度的升高将会引起净正氧化物电荷热退火的加速,再加上界面态产生很缓慢,导致辐照前期变温辐照损伤稍小于低剂量率辐照损伤。在辐照后期,温度的降低减慢了净正氧化物电荷的热退火,且界面态的大量产生及 100 °C 以下不会引起辐照感生界面态的退火^[7-8],因此,变温辐照损伤高于低剂量率辐照损伤。

变温辐照损伤可较为真实地模拟低剂量率辐照损伤,而文献^[7-8]中的 25~205 °C 的恒温辐照损伤却小于低剂量率辐照损伤,这可能与氧化层内的空间电场的大小有关。恒温辐照时,若温度较低,则由于氧化物陷阱电荷的热退火发射前沿(thermal emission front)^[10]较小,导致依然有大量的浅氧化物陷阱电荷留在氧化层中,其形成的空间电场较强,阻碍了空穴的运输;若温度较高,虽浅氧化物陷阱电荷被大量退火,其形成的空间电场很弱,但由于温度的增加,导致深(净正)氧化物陷阱电荷开始大量退火。因此,恒高温辐照损伤要小于低剂量率辐照损伤。相对恒高温辐照,变温辐照方法在低总剂量时采用高温辐照,抑制了空间电场的形成,然后随着总剂量的增加逐渐降低温度,减小了深(净正)氧化物陷阱电荷的热退火,所以变温辐照方法在高的总剂量时可很好地模拟低剂量率辐照损伤,在低的总剂量时,变温辐照损伤普遍要稍小于低剂量率辐照损伤,如 A、E 工艺器件。对于 C、D 和 F 工艺器件,在总剂量较低时的变温辐照现象,可能和这 3 种器件的氧化层厚度相对另外 3 种器件而言较薄以及 C、D 工艺器件和 F 工艺器件的掺杂物不同有关。

从上述的实验结果可看出,文献^[9]提出的变温辐照评估方法可对不同工艺的国产 NPN

双极晶体管是否具有 ELDRS 效应及低剂量率的辐照损伤进行很好的评估。且此方法也可对双极晶体管是否具有 ELDRS 效应进行评判:若变温辐照损伤明显大于高剂量率的辐照损伤,则该器件具有潜在的 ELDRS 效应。

4 结论

通过上述实验结果及其分析可得出以下结论:1) 由于空间电场的阻碍作用,不同工艺的国产 NPN 双极晶体管均存在明显的低剂量率损伤增强效应;2) 变温辐照不仅可很好地模拟不同工艺的 NPN 双极晶体管的低剂量率辐照损伤,且能对 NPN 双极晶体管是否具有 ELDRS 效应进行评估,原因在于升温辐照造成了大量浅陷阱氧化物电荷的退火,减弱了空间电场的强度,致使更多的空穴和 H^+ 可到达 Si-SiO₂ 界面形成界面态;3) 该方法可快速鉴别双极器件是否具有 ELDRS 效应。

参考文献:

[1] GRAVES R J, CIRBA C R, SCHRIMPF R D, et al. Modeling low-dose-rate effect in irradiated bipolar-base oxides [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1998, 45(6): 2 352-2 360.

[2] WITCZAK S C, LACOE R C, MAYER D C, et al. Space charge limited degradation of bipolar oxides at low electric fields [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1998, 45(6): 2 339-2 352.

[3] FLEETWOOD D M, KOSIER S L, NOWIN R N, et al. Physical mechanisms contributing to enhanced bipolar gain degradation at low dose rates [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1994, 41(6): 1 871-1 894.

[4] 陆妩,余学锋,任迪远,等. 双极晶体管不用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 Diyuan, et al. Radiation effects and ageing characteristics of bipo-

lar junction transistors subjected to high and low dose rate total dose irradiation [J]. Nuclear Techniques, 2005, 28(12): 925-928 (in Chinese).

- [5] RASHKEEV S N, CIRBA C R. Physical model for enhanced interface-trap formation at low dose rates [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2002, 49(6): 2 650-2 655.
- [6] 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 Transactions on Nuclear Science, 1995, 42(6): 1 541-1 549.
- [7] PEASE R, 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 Transactions on Nuclear Science, 1997, 44(6): 1 981-1 988.
- [8] WITCZAK S C, SCHRIMPF R D, FLEETWOOD D M, et al. Hardness assurance testing of bipolar junction transistors at elevated irradiation temperatures [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1997, 44(6): 1 989-2 000.
- [9] 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):769-775.
- LU Wu, REN Diyuan, 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]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43(9): 769-775 (in Chinese).
- [10] McWHORTER P J, MILLER S L, MILLER W M, et al. Modeling the anneal of radiation induced trapped holes in a varying thermal environment [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1990, 37(6): 1 682-1 689.