

PNP 输入双极运算放大器的辐射效应

许发月^{1,2,3}, 陆 妩^{1,2}, 王义元^{1,2,3}, 席善斌^{1,2,3}, 李 明^{1,2,3},
王 飞^{1,2,3}, 周 东^{1,2,3}

(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)

摘要:对 PNP 输入双极运算放大器进行了不同偏置条件和不同剂量率下电离辐照实验。结果表明,高剂量率辐照时,正偏置条件下的偏置电流变化稍大于零偏置;低剂量率辐照时,正偏置下的偏置电流变化小于零偏置。两种 PNP 输入双极运算放大器均表现出明显的低剂量率辐照损伤增强(ELDRS)效应,且在零偏置下的低剂量率辐照损伤增强效应更显著。

关键词:PNP 输入双极运算放大器;低剂量率;偏置;⁶⁰Co γ 辐照

中图分类号:TN431 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-6931(2012)02-0229-05

Radiation Response of PNP Input Bipolar Operational Amplifiers

XU Fa-yue^{1,2,3}, LU Wu^{1,2}, WANG Yi-yuan^{1,2,3}, XI Shan-bin^{1,2,3}, LI Ming^{1,2,3},
WANG Fei^{1,2,3}, ZHOU Dong^{1,2,3}

(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*)

Abstract: Ionizing radiation response of PNP input bipolar operational amplifiers was investigated at different biases and different dose rates. Results show that the change of bias currents at forward bias is greater than that at zero bias for high dose rate. While for low dose rate irradiation, the change of bias currents at forward bias is less than that at zero bias. Two types of PNP input bipolar operational amplifiers exhibit enhanced low dose rate sensitivity (ELDRS) obviously and the ELDRS is more significant at zero bias.

Key words: PNP input bipolar operational amplifier; low dose rate; bias; ⁶⁰Co γ irradiation

PNP 输入双极运算放大器由于具有良好的线性和电流驱动能力、高增益和转换速率、宽

带宽及低的电压噪音和输入偏置电流等优点,在空间系统中有着广泛的应用。然而,由于空

间电离辐射环境的存在,导致 PNP 输入双极运算放大器的性能发生退化,从而严重影响了电子系统的可靠性。虽然近年来国内外对 PNP 双极运算放大器已进行了较多研究,但只局限在正常工作状态下对不同剂量率辐照响应规律的影响^[1-3]。由于空间系统中双极运算放大器常以工作(正偏置)和备用(零偏置)两种状态存在,在零偏置下 PNP 双极运算放大器的电离辐照损伤与工作状态有何不同,是否会对电路同样造成损伤很值得研究。为此,本文选用不同型号的 PNP 输入双极运算放大器,在正偏置和零偏置两种状态下分别用实际空间低剂量率和实验室高剂量率进行辐照实验研究。

1 实验样品和实验方法

实验样品采用两种不同型号但同一型号批次相同的 PNP 输入双极运算放大器电路,分别为双运算放大器 LM833 和四运算放大器 LM837。辐照实验在中国科学院新疆理化技术研究所大、小⁶⁰Co γ 源上进行。高、低辐照剂量率分别为 0.5 和 1.0×10^{-4} Gy(Si)/s, 累积总剂量 1 000 Gy(Si)。

在本实验中,大、小钴源均根据国家计量标准的剂量计进行标定。辐照期间,将样品置于铅铝屏蔽盒中,以避免低能散射对实验结果的影响。

正偏置状态下放大器正负电源为 ± 10 V, 负输入连接输出形成反馈状态,零偏置所有管脚接地。为研究双极输入运算放大器的辐射效应,对高剂量率辐照后的样品进行与低剂量率辐照时间相同的室温退火,辐照及退火过程中采用同样的偏置。双极运算放大器的参数采用高精度 Tektronix577 曲线示踪仪进行测试。测量参数包括输入失调电压(V_{OS})、正负输入偏置电流($\pm I_b$)、共模抑制比(CMRR)、开环增益(AVO)、电源电压抑制比($\pm PSRR$)及正负电源电流($\pm I_{SS}$)。辐照实验及其参数的测量均在室温下进行,每次参数的测试均在辐照或退火后 20 min 内完成。

2 实验结果和分析

在测试 PNP 输入双极运算放大器参数的过程中发现:几乎所有的器件参数均会发生不同程度的变化,且正负输入偏置电流($\pm I_b$)对电离辐照最为敏感。图1、2所示分别为 LM833

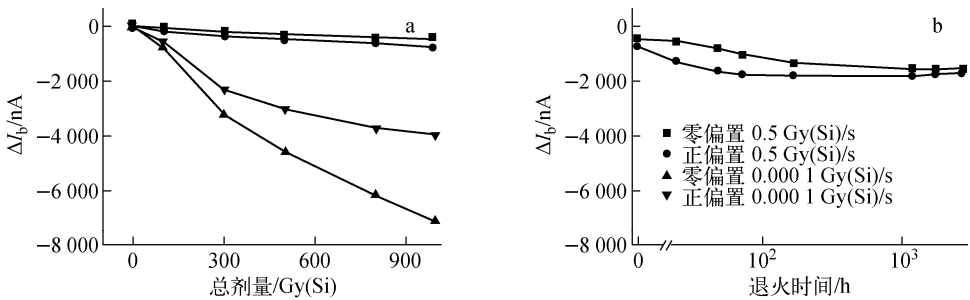


图1 LM833 在两种偏置状态下 ΔI_b 随总剂量(a)和室温退火时间(b)的变化

Fig. 1 Changes of LM833's ΔI_b with dose (a) and room temperature annealing (b) at two biases

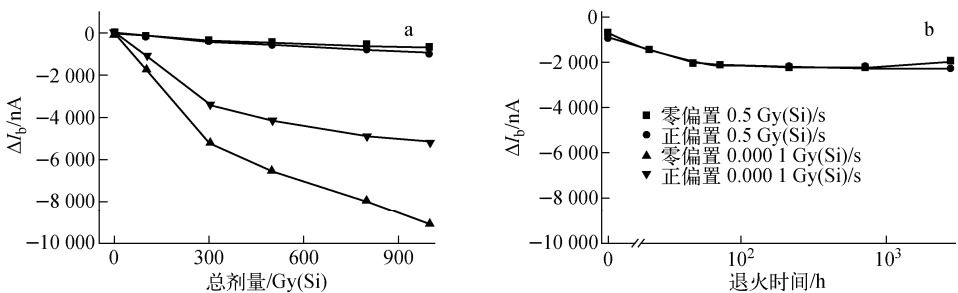


图2 LM837 在两种偏置状态下 ΔI_b 随总剂量(a)和室温退火时间(b)的变化

Fig. 2 Changes of LM837's ΔI_b with dose (a) and room temperature annealing (b) at two biases

和 LM837 在两种偏置状态下,偏置电流变化量 ΔI_b 随总剂量和室温退火时间的变化。

从图 1、2 可看出,同种偏置、不同剂量率之间的辐照结果表现出相同的规律。即在同种偏置条件下,低剂量率辐照时偏置电流变化量 ΔI_b 随总剂量的增加速度和幅度都明显大于高剂量率辐照,且这种差异并不能通过高剂量率辐照后,在与低剂量率辐照时间相同的室温退火中加以消除。为表征低剂量率损伤增强效应和程度,计算同种偏置下的损伤增强因子(EF)^[3-4]和室温退火因子(AF)^[5]:

$$EF \equiv \frac{\Delta I_{b\text{低剂量率}}}{\Delta I_{b\text{高剂量率}}} \quad (1)$$

$$AF \equiv \frac{\Delta I_{b\text{退火后}}}{\Delta I_{b\text{退火前}}} \quad (2)$$

其中: $\Delta I_{b\text{高剂量率}} = \Delta I_{b\text{退火前}}$,损伤增强因子 EF 是在同一剂量下,低剂量率辐照导致的偏置电流变化量与高剂量率下的偏置电流变化量的比值,其表征了未考虑退火时低剂量率损伤增强的程度;退火因子则是经过与低剂量率辐照时间相同的时间退火后,偏置电流相对辐照前初始值的改变量与开始退火时偏置电流的改变量的比值,表征了辐射损伤在器件内部的消长过程。

通过文献[3-5]中对 EF 和 AF 的讨论可得出:当 $EF > 1.5$ 且远大于 AF 时,可判断器件具有明显的低剂量率损伤增强效应。由此计算得到两种不同器件在不同偏置下的损伤增强因子和室温退火因子(表 1)。

表 1 损伤增强因子和室温退火因子

Table 1 Enhanced factor and annealing factor

类别	EF(1 000 Gy(Si))	AF
LM833(正偏置)	5.4	2.4
LM833(零偏置)	16	3.5
LM837(正偏置)	5.8	2.5
LM837(零偏置)	12.3	3

从表 1 可看出,两种器件在不同偏置下损伤增强因子(EF)均大于 2,且损伤增强因子(EF)远大于室温退火因子(AF),所以,这两种 PNP 输入双极运算放大器在不同偏置下均表现出明显的低剂量率辐照损伤增强效应。零偏

置下的损伤增强因子较正偏置下的损伤增强因子更大,所以零偏置下的低剂量率辐照损伤增强效应更明显。

从图 1、2 还可看出,随着总剂量的累积,偏置电流变化量 ΔI_b 的绝对值不断增加,反映出辐射感生缺陷的累积。对于 LM833 和 LM837 两种不同的运算放大器,在同一剂量率辐照下,不同偏置时,辐照结果表现出相同的规律。用高剂量率(0.5 Gy(Si)/s)辐照时,正偏置电流变化量 ΔI_b 随总剂量的变化比零偏置时大。用低剂量率($1.0 \times 10^{-4} \text{ Gy(Si)/s}$)辐照时,正偏置电流变化量 ΔI_b 随总剂量的变化比零偏置时要小得多。

3 讨论

运算放大器电参数的变化是器件内部单元电路变化的综合效应,而这些变化与输入级单元电路的变化密切相关。对于 PNP 输入双极运算放大器,输入偏置电流 I_b 的变化取决于器件两个输入端的静态基极电流,即 PNP 输入双极运算放大器输入偏置电流的变化可归结于电离辐射引起的 PNP 双极晶体管的退化。而 PNP 晶体管的退化则是由于钝化基区表面的复合电流 I_{bsr} 增加的缘故。研究发现, I_{bsr} 与辐照感生的氧化物电荷和界面态有如下的关系式^[9]:

$$I_{\text{bsr}} \propto N_{\text{it}}/N_{\text{ot}}^2 \quad (3)$$

其中: N_{ot} 为氧化物陷阱电荷密度; N_{it} 为界面陷阱电荷密度。

对于 PNP 双极晶体管,在 Si—SiO₂ 界面感生的界面态会导致表面复合速度的增加,而辐照感生的正氧化物电荷积累 N 型基区,则会导致复合电流的减小。

图 1、2 中同种偏置条件下两种 PNP 输入双极运算放大器表现出的低剂量率损伤增强效应,同样可归结为 PNP 双极晶体管的低剂量率辐照损伤增强效应。其原因可用空间电荷模型^[6-8]来解释:在高剂量率辐照的情况下,在基区氧化层内迅速产生大量的正氧化物陷阱电荷(浅陷阱空穴和深陷阱空穴),这些正陷阱电荷在氧化层内形成带正电的空间电场,它会削弱隔离氧化层中的外加强电场,阻碍辐射感生的正电荷(包括空穴和氢离子)到达 Si—SiO₂ 界面生成界面陷阱。而在低剂量率辐照的情况下,

由于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氧化物陷阱电荷较少,形成的空间电场也相对较弱。在弱电场、长时间的辐照条件下,辐射感生的空穴和氢离子有足够的时间输运到 Si—SiO₂ 界面,并生成界面缺陷。因此,由式(3)可知,相比高剂量率辐照,低剂量率辐照基区复合电流变化较大,损伤较大,即具有低剂量率辐射损伤增强效应。

从实验结果可知,在同一剂量率辐照下,不同偏置时,辐照结果表现出相同的规律。用高剂量率辐照时,正偏置电流变化量 ΔI_b 随总剂量的变化比零偏置时大。用低剂量率辐照时,正偏置电流变化量 ΔI_b 随总剂量的变化比零偏置时要小得多。究其原因,主要是由于不同的偏置下辐射感生的氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷差异造成的。其主要受两个方面的影响:1) 边缘电场的方向和大小;2) 外加电场的方向。这两种影响属于竞争的关系。

根据边缘电场模型^[9-11],在双极晶体管的基-射结上方覆盖的隔离氧化层中,边缘电场来源于 PN 结的内建空间电场的表面效应,方向由 N 区指向 P 区,图 3 所示为基-射结表面边缘电场的示意图。

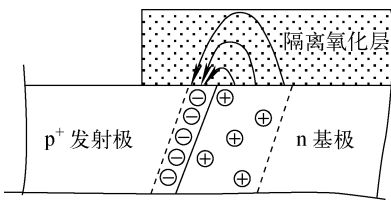


图 3 基-射结表面边缘电场示意图

Fig. 3 Fringing electric field of emitter-base junction

由于表面边缘电场来源于基-射结耗尽区表面的电荷,因此当偏置不同时,耗尽区表面的电荷数量不同。表现在边缘电场上为:正向偏置下边缘电场较小,而零偏置下边缘电场较大。逃脱初始复合的 N 区表面的空穴将受到边缘电场的影响,向 P 区表面迁移,被表面的陷阱俘获形成深陷阱空穴。此外,空穴在迁移的过程中,可参与反应释放氢离子 H⁺。这些空穴和 H⁺ 运动到 Si—SiO₂ 界面与 Si—H 钝化键发生反应生成界面缺陷。总的结果为:随着边缘电场增强,到达 P 区表面的空穴和 H⁺ 运动的

数量就会增多,增大了发射极的耗尽程度,而 N 区表面空穴数量减少,减小了基区氧化物陷阱电荷的累积程度,导致基区表面复合速率的增大,从而引起 PNP 晶体管基极电流增大。

图 4 所示为正向偏置时氧化层中外加电场示意图,由图 4 和空间电荷模型可看出,正偏时外加电场有利于将辐射感生的正电荷输运到 Si—SiO₂ 界面形成界面陷阱电荷,因此,正偏置时界面陷阱电荷密度较零偏置时大。

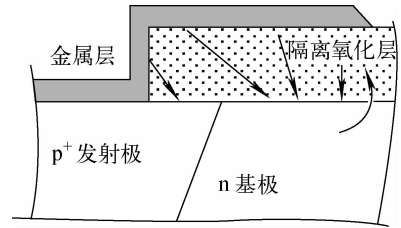


图 4 正向偏置时外加电场示意图

Fig. 4 Applied electric field at forward bias

基于以上边缘电场和外加电场的理论,在高剂量率下,很短的时间内产生了较多的电子-空穴对,边缘电场对 PNP 晶体管基极电流的影响,相对于基区表面氧化层,净正氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷对其的影响来说很小,主要考虑外加电场对 PNP 晶体管基极电流的影响。在主要考虑外加电场的情况下,正偏置时基区表面氧化层内界面陷阱电荷密度比零偏置时大,结合式(3)可看出,正偏置时两种 PNP 晶体管输入的运算放大器偏置电流变化量 ΔI_b 随总剂量的变化较零偏置时稍大。

在低剂量率下,根据空间电荷模型,空间电场微弱,对辐射感生正电荷的阻碍作用可忽略,又因为低剂量率辐照过程持续时间较长,所以,边缘电场的影响起了主要作用。从边缘模型的讨论中可知,零偏置时的边缘电场比正偏置时大,所以,相对于正偏置,零偏置时到达 P 区表面的空穴和 H⁺ 运动的数量就会多,发射极的耗尽程度大,而 N 区表面空穴数量较少,基区氧化物陷阱电荷的累积程度小,导致基区表面复合速率较大,引起 PNP 晶体管基极电流较大,即在低剂量率辐照下,零偏置时两种 PNP 晶体管输入的运算放大器偏置电流变化量 ΔI_b 随总剂量的变化较正偏置时大。

4 结论

在高、低剂量率电离辐照下,通过对 PNP 输入双极运算放大器不同程度的损伤研究,可得出以下结论。

1) 两种 PNP 输入双极运算放大器在不同偏置条件下,均具有明显的低剂量率辐照损伤增强效应,且零偏置下的低剂量率辐照损伤增强效应更明显。

2) 相对于高剂量率辐照,低剂量率辐照下感生的空穴有足够的时间输运到界面,且氧化层内正陷阱电荷形成的空间电场很弱,从而形成较多的界面陷阱电荷,所以,低剂量率下的损伤比高剂量率下的更明显。

3) 高剂量率辐照下,正偏置时外加电场有利于界面陷阱电荷的形成,正偏置时器件的辐射损伤比零偏置时稍大;而低剂量率辐照下,零偏置时的边缘电场要比正偏置时大,基区表面受边缘电场的影响向 P 区表面迁移的空穴数量多,基区氧化物陷阱电荷的累积程度小,导致基区表面复合速率较大,所以,零偏置下的低剂量率辐照损伤增强效应更显著。

参考文献:

- [1] PEASE R L. Total ionizing dose effects in bipolar devices and circuits[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2003, 50(3): 539-551.
- [2] TITUS J L, EMILY D, KRIEG J F, et al. Enhanced low dose rate sensitivity (ELDRS) of linear circuits in a space environment[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1999, 46(6): 1 608-1 615.
- [3] JOHNSTON A H, SWIFT G M, RAX B G. Total dose effects in conventional bipolar transistors and linear integrated circuits[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1994, 41(6): 2 427-2 436.
- [4] HJALMARSON H P, PEASE R L, WITCZAK S C, et al. Mechanisms for radiation dose-rate

sensitivity of bipolar transistors[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2003, 50(6): 1 901-1 909.

- [5] 郑玉展,陆妩,任迪远,等. 双极运算放大器辐射损伤效应研究[J]. 核技术, 2008, 31(4): 270-274.
ZHENG Yuzhan, LU Wu, REN Diyuan, et al. Investigation on radiation effects of bipolar operational amplifiers[J]. Nuclear Techniques, 2008, 31(4): 270-274(in Chinese).
- [6] 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(6): 2 352-2 360.
- [7] WITCZAK S C, LACOE 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(6): 2 339-2 352.
- [8] RASHKEEV S N, CIRBA C R. Physical model for enhanced interface-trap formation at low dose rates [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2002, 49(6): 2 650-2 655.
- [9] PERHENKOV 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): 1 940-1 949.
- [10] PERSHENKOV V S, CHIROKOV M S, BRETCHKO P T, et al. Effect of junction fringing field on radiation-induced leakage current in oxide isolation structures and nonuniform damage near the channel edges in mosfets [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1994, 41(6): 1 895-1 901.
- [11] PERSHENKOV V S, BASHIN A Y, ZEREBREV G L, et al. Effect of emitter-base bias during infrared illumination on the radiation response of bipolar transistors[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2002, 49(6): 2 998-3 001.