

双极运算放大器辐射损伤的时间相关性

高 嵩^{1,2,†} 陆 妩¹ 任迪远¹ 牛振红^{1,2} 刘 刚^{1,2}

(1 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 100039)

摘要: 通过一系列辐照实验对双极运放辐射损伤的时间相关性进行了研究. 结果表明, 双极运放的辐射损伤与时间有着密切的关系, 通过调整辐照剂量率、退火温度及时间等参数进行循环辐照-退火实验, 可以测出器件的低剂量率辐射损伤情况, 并从界面态角度对这种损伤机理进行了分析.

关键词: 双极运算放大器; 辐射损伤; 时间相关性; 低剂量率; 加速评估

PACC: 6180E EEACC: 2570B; 1220

中图分类号: TN722.7⁺7

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)07-1280-05

1 引言

在电离辐射环境中, 双极器件在低剂量率条件下受到的累积辐射损伤要比在高剂量率条件下大得多, 这就是所谓的低剂量率辐射损伤增强 (enhanced low dose rate sensitivity, ELDRS) 效应^[1~10]. 上个世纪 90 年代, Enlow 等人发现的这个现象^[1] 引起了该领域研究人员的极大关注. 因为在空间辐射环境中, 其典型的剂量率约为 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ rad(Si)/s, 然而考虑到时间、经费等因素, 目前实验室评判所采用的都是按美军标的大剂量率 (50 ~ 300rad(Si)/s) 辐照标准. 对于一些具有明显低剂量率辐射损伤增强效应的双极器件来讲, 这种剂量率差异将使实验室测试评判方法所得到的器件抗辐射水平与在卫星、空间站等低剂量率辐射环境下使用的电子元器件的实际抗辐射水平严重不符, 从而给航天领域电子系统的可靠性带来极大隐患. 但是, 如果真的采用如此低的剂量率进行模拟辐照实验, 由于它所需要的实验周期较长, 作为常规的地面辐照试验, 这既不经济也不实用. 因此找到一种能够在实验室推广的、高效可靠的双极器件加速评估方法具有重要意义.

目前国外对双极器件 ELDRS 效应及其机理的研究较为深入, 提出了几种相关理论模型, 但都还处于探索阶段, 并不能给出统一的结论. 对加速评估方法的研究主要集中在高温高剂量率辐照^[2~4] 上, 但该方法也有局限性, 虽然它比高剂量率辐照损伤明显增强, 但与实际低剂量率情况还有一定差距, 所以美军标也只能给出模糊的评判标准. 目前国内还没有对双极器件的加速评估方法研究方面的报道. 本

文根据辐射损伤的时间相关性理论^[6], 设计了一系列的循环辐照-退火实验, 通过调整辐照剂量率、退火温度及时间等参数, 找到了器件的最大辐射损伤条件, 研究了它们的低剂量率辐射损伤情况的测评方法, 并对这种方法的潜在机理进行了分析.

2 实验

辐照实验是在中国科学院新疆理化技术研究所的大 Co^{60} 源上进行, 选用的实验样品是具有明显 ELDRS 效应的典型星用双极运放 LM108, 它采用金属封装. 辐照时, 将样品放在特制的偏置板上加 $\pm 10V$ 偏压, 正输入端接地, 负输入端与输出端相连, 1 脚和 8 脚间加一个补偿电容, 如图 1 所示. 样品所在位置的剂量率大小是通过热释光剂量片标定

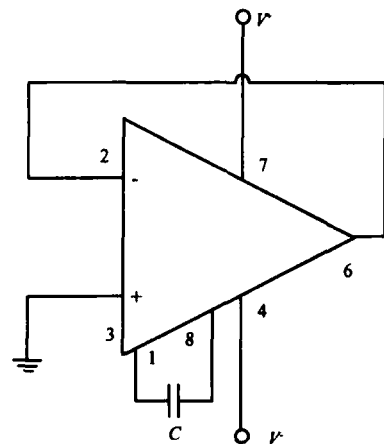


图 1 LM108 的电路图

Fig. 1 Circuit configuration of LM108

† 通信作者. Email: gaosong800@163.com

2005-11-18 收到, 2006-01-13 定稿

过的,辐照时还用美军标制作的铅铝屏蔽盒屏蔽样品,以消除低能散射的影响.

对样品进行室温辐照的剂量率选取美军标下限 50rad(Si)/s 和更低剂量率 2rad(Si)/s,每当样品辐照总剂量增加 25krad(Si)时,就对其进行退火处理,接着进行再辐照再退火循环,直至总剂量达到 100krad(Si).退火处理分为两组,一组在室温 20 下进行,另一组在高温 100 恒温箱中进行,每组退火时间又分为三种情况:50rad(Si)/s 辐照的退火时间为 2,12 和 24h;2rad(Si)/s 辐照的退火时间为 2,10 和 20h.退火过程中,样品保持与辐照时相同的偏置状态.

在实验过程中,每次辐照及退火前后都进行参数测试,高温样品冷却至室温后测试,测试设备为美国 Tektronix 公司生产的运放电参数测试曲线示踪仪,测试参数主要有输入失调电压 V_{io} 、输入偏置电流 I_{bs} 、共模抑制比 CMRR、开环增益 AVOL 等,上述参数的测试都在样品辐照或退火后的 20min 内完成.

3 结果

通过比较双极运放 LM108 的测试电参数,发现绝大部分电参数都有不同程度的退化,其中输入偏置电流 I_{bs} 的变化最为显著,我们通常称之为敏感参数,并用其变化量 ΔI_{bs} 来表征器件的辐射损伤程度.

图 2(a)和(b)给出了辐照剂量率为 50rad(Si)/s、不同退火温度及时间下进行循环辐照-退火实验时,LM108 的输入偏置电流 I_{bs} 的变化量随辐照总剂量的变化关系.由图可见,无论是室温还是高温退火,也无论是退火时间长短,LM108 的输入偏置电流 I_{bs} 随辐照总剂量增加而增加的变化趋势基本上是一致的.不同之处在于,高温退火条件下, I_{bs} 有一定恢复,而室温下几乎没有变化.图 2(a)中 I_{bs} 变化最大的是退火 2h 的条件,而图 2(b)中是退火 24h 的条件,并且比图 2(a)中的 I_{bs} 变化略大一些.

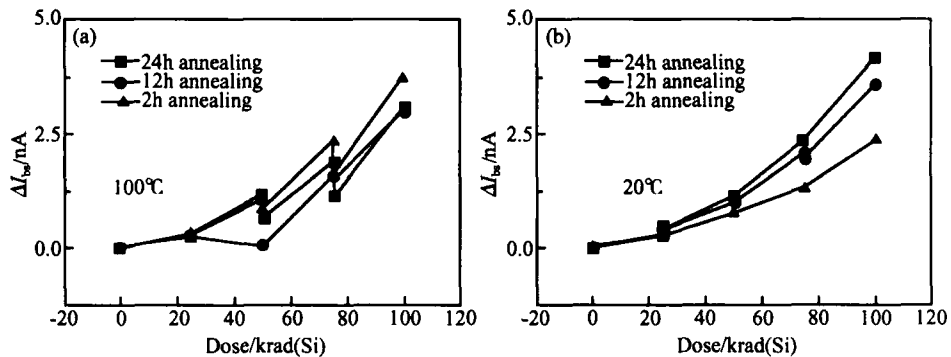


图 2 在辐照剂量率为 50rad(Si)/s、不同退火温度及时间下循环辐照-退火实验的 I_{bs} 随辐照总剂量的变化

Fig. 2 Shift in input bias current versus radiation total dose while alternating radiation at 50rad(Si)/s and different annealing temperatures and times

图 3(a)和(b)给出了辐照剂量率为 2rad(Si)/s、不同退火温度及时间下进行循环辐照-退火实验时,LM108 的输入偏置电流 I_{bs} 的变化量随辐照总剂量的变化关系.从图 3 可以看出,不但 I_{bs} 随辐照总剂量增加而增加的趋势比较一致,而且变化明显,特别是退火时间为 2 和 10h,其中高温退火 2h 情况在累计剂量达到 100krad(Si)时, I_{bs} 增大了将近 25nA,与图 2 的 I_{bs} 最大变化量相比大了 6 倍多.值得一提的是,图 3(a)和(b)中 I_{bs} 的辐照变化是不均匀的,而是当累计剂量达到 80krad(Si)以后突然增大.与图 2 相似,图 3 的 I_{bs} 在高温退火时有所恢复,而在室温退火下几乎不变.

图 4(a)和(b)给出了高温 2rad(Si)/s 辐照、室温不同剂量率辐照和循环室温 2rad(Si)/s 辐照加不同温度及时间退火三种方式下,LM108 的输入偏

置电流 I_{bs} 的变化量随辐照总剂量的变化关系.它是在图 3(a)和(b)的基础上引入 LM108 的其他研究方法数据来进行比较的.从图中可以看出,在累计剂量达到 100krad(Si)时,用低剂量率 0.01rad(Si)/s 室温辐照,LM108 的 I_{bs} 变化量为 13nA,而用更低剂量率 0.002rad(Si)/s 辐照与 0.01rad(Si)/s 辐照引起的 I_{bs} 变化差不多,并且表现出了饱和趋势.用美军标 100rad(Si)/s 室温辐照时, I_{bs} 变化不是很大.而在高温 100 下 2rad(Si)/s 辐照至 100krad(Si)时, I_{bs} 变化量达到 10nA,比美军标和室温 2rad(Si)/s 辐照方式的 I_{bs} 都有很大增加,但与低剂量率情况还有一定差距,而用室温 2rad(Si)/s 辐照加室温或高温下退火 2 或 10h 循环进行的方式 I_{bs} 变化均大于低剂量率情况,其中高温退火 2h 条件下 I_{bs} 变化最大,室温退火 10h 条件下 I_{bs} 变化较接近低剂

量率室温辐照的水平.

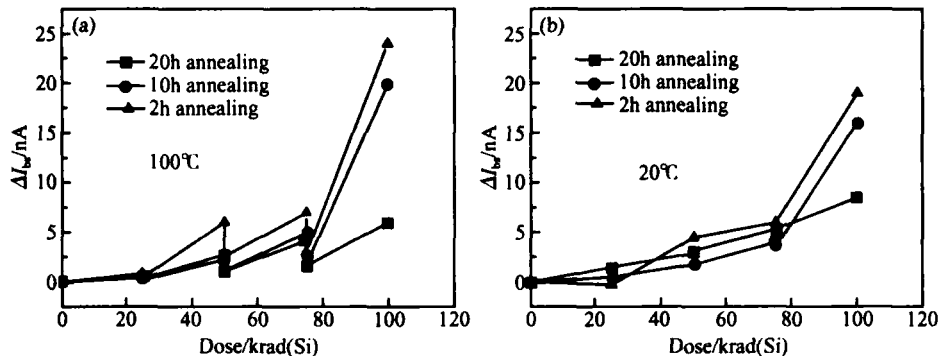


图 3 在辐照剂量率为 2rad(Si)/s、不同退火温度及时间下循环辐照-退火实验的 I_{bs} 随辐照总剂量的变化
 Fig. 3 Shift in input bias current versus radiation total dose while alternating radiation at 2rad(Si)/s and different annealing temperatures and times

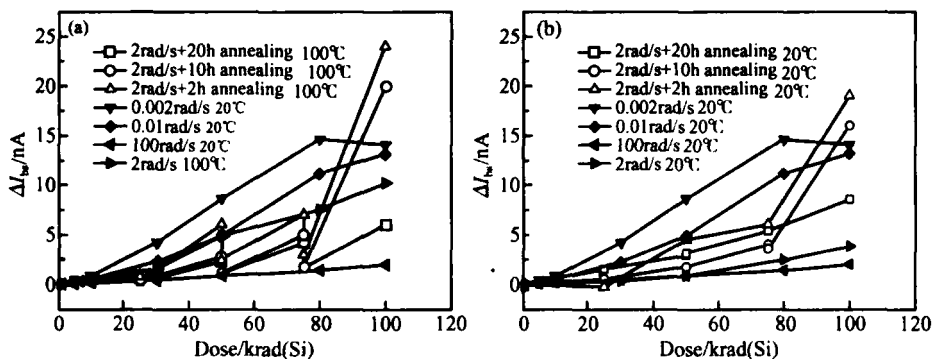


图 4 不同辐照方式下的 I_{bs} 随辐照总剂量的变化
 Fig. 4 Shift in input bias current versus radiation total dose at various radiation conditions

从上述实验结果可以看出,只要选择恰当的辐照剂量率和退火温度及时间等参数进行循环辐照-退火实验,就可以使双极运放 LM108 的输入偏置电流 I_{bs} 发生很大变化,在累计剂量达到 100krad(Si) 时,其损伤程度较美军标和高温高剂量率辐照方法都大,能够达到甚至大大超过低剂量率辐射损伤水平.

4 讨论

对于双极运放 LM108 而言,输入偏置电流 I_{bs} 的变化取决于运放两个输入端的静态基极电流,当输入信号为零时有

$$I_{bs} = (I_{bs1} + I_{bs2}) / 2 \tag{1}$$

其中 I_{bs1} , I_{bs2} 分别为运放输入端的两个差动晶体管的基极电流.这两个差动晶体管都是超 npn 型晶体管,它们的基极电流 I_{bs1} 和 I_{bs2} 的增加主要是因为辐射时会在它们的基区氧化层中引入辐射感生缺陷——正氧化物陷阱电荷和界面态,引起表面势位增加和表面复合中心密度增加,使复合电流增加,从

而导致晶体管的增益下降.

可见,辐射感生缺陷的多少直接影响到 I_{bs} 的增加幅度和器件的损伤程度.而辐射感生界面态的形成是个慢过程,根据辐射损伤的时间相关性^[5]可知,它对时间有很强的依赖关系.因此,可以看出辐射损伤跟时间有着密切的关系.与其他辐照研究方法相比,本研究方法能对器件产生如此大的损伤效果在于退火工序的处理上,即考虑了辐射损伤的时间相关性让其界面态充分形成来增大损伤,下面从空间电荷模型和界面态建立的氢离子两步模型来具体分析一下它的损伤机理.

4.1 从空间电荷模型角度分析

空间电荷模型理论^[6-8]认为,在高剂量率辐照情况下,基区氧化层内会产生大量的正氧化物陷阱电荷,这些陷阱电荷在氧化层内会形成一个空间电场,阻碍了辐照感生出来的空穴和氢离子的运动,使得只有少数空穴和氢离子在经历了相当长的时间才到达 Si-SiO₂ 界面处而形成少量的界面态.而在低剂量率情况下,辐照感生出来的氧化物陷阱电荷要

少得多,它们所形成的空间电场也要小得多,同时由于辐照时间也较长,所以运输到 Si-SiO₂ 界面上的空穴和氢离子较多,它们与界面处的应力键反应生成较多的界面陷阱电荷,这些界面陷阱电荷会成为复合中心增加基极电流,造成器件的 ELDRS 现象.这也就是图 3 中 2rad(Si)/s 剂量率下的辐照损伤会明显高于图 2 中 50rad(Si)/s 剂量率下的辐照损伤原因.所以,为了使双极器件损伤明显,可以采用稍低些的剂量率 2rad(Si)/s 辐照.

在室温辐照后,采用室温退火的方法,让辐照感生出来的空穴和氢离子有足够的时间尽可能多地输送到 Si-SiO₂ 界面上形成界面态,如此反复几次,使得用这种方法的器件比用同一剂量率甚至低剂量率单纯辐照的方法形成更大的损伤,如图 4(b) 所示.在累计剂量达到 100krad(Si) 时,器件低剂量率下辐射损伤趋于饱和,在误差允许范围内可以用 2rad(Si)/s 辐照加室温退火 10h 的方式来测评双极运放 LM108 低剂量率辐射损伤程度.

需要解释的是,图 2(b) 和图 3(b) 的 I_{bs} 的变化随室温退火时间的不同而表现出了相反的结果.这是因为用 50rad(Si)/s 辐照的剂量率较高,会生成大量的氧化物陷阱电荷,阻碍空穴和氢离子运动,但随着时间的延长会导致到达界面处的空穴和氢离子数目相应增加,即增加界面态,从而导致 I_{bs} 随退火时间越长而变化越大.而 2rad(Si)/s 辐照剂量率较低,辐照感生电场影响较弱,运输到界面处的空穴和氢离子会较多,并且它们的数目会随着退火时间的增加继续增加.但是随着时间的延长,这些空穴和氢离子又会被退火掉,导致界面态并不是一直增加,而是如图 3(b) 所示,室温退火 2h 的条件下损伤最大,10h 条件下损伤次之,20h 条件下损伤最小.

有研究表明,界面陷阱电荷的退火温度不低于 100℃,并且它的退火温度还与器件的制造工艺和陷阱密度等因素有关,一般情况下温度高达 175℃ 时才退火,而氧化物陷阱电荷在温度高于 100℃ 时已经大量退火^[9,10].所以,我们还比较了高温退火方法,使辐照后器件的氧化物陷阱电荷大量退火,而界面陷阱电荷不退火,从而减少了正氧化物陷阱电荷所形成的空间电场对辐照感生出来的空穴和氢离子的影响,缩短了它们运输到 Si-SiO₂ 界面上的时间,使其在下次辐照时又有许多新的空穴和氢离子参与界面反应形成界面态来增大其损伤.但高温退火较为复杂,还要看氧化物陷阱电荷的退火情况和界面态的增长情况的综合结果.如图 3 所示的 2rad(Si)/s 辐照,退火 2 和 10h 情况下的界面态增长显著,所以高温退火要比室温退火损伤更明显,而高温退火 24h 情况的氧化物陷阱电荷退火更大一些,使得损伤较室温退火减小.图 2 的 50rad(Si)/s 辐照也有

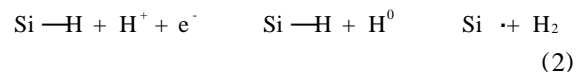
类似现象,与室温相比,高温退火 2h 情况下使界面态增加多些,使损伤增强,12 和 24h 情况下的氧化物陷阱电荷退火多些,使损伤变小.

在图 4(a) 中可以看到,采用 2rad(Si)/s 辐照加 100℃ 高温退火 2h 的方式进行循环辐照-退火实验,在累计剂量达到 100krad(Si) 时,LM108 的输入偏置电流 I_{bs} 比低剂量率情况增大将近一倍,说明这种方法非常有效,能够把器件的界面态充分激发出来.虽然用这种最大损伤条件测评 LM108 的低剂量率辐射损伤程度过于严格,但对于其他低剂量率损伤较大的器件来说有可能是较好的选择,而且也可以通过调整条件参数对不同器件进行测评.

此外,还需要说明的是,界面态的形成除了与辐照剂量率、温度和时间有关外,还与辐照的累计剂量有关,只有累计剂量达到一定程度之后,才使界面态的作用突现出来.正如图 3 所看到的,在累计剂量达到 80krad(Si) 以后, I_{bs} 变化明显增加.但在剂量达到 80krad(Si) 以前,辐照-退火过程对界面态的增长也是起作用的,室温 2rad(Si)/s 辐照加高温 2h 退火条件下的 I_{bs} 变化能够达到高温 2rad(Si)/s 辐照的损伤程度.所以,对于循环辐照-退火实验每次辐照累计剂量点的优化选择问题还有待进一步研究.

4.2 从界面态建立的氢离子两步模型角度分析

根据界面态建立的氢离子两步模型^[11],辐射时氧化层中的 Si-H 键断裂形成 H⁺ 和三价 Si 原子,这时它们并没有完全脱离,还存在着弱反应.下一步, H⁺ 扩散到达界面处附近,与一个 Si-H 键以及一个从衬底隧道过来的电子共同作用,形成硅悬挂键,产生界面态.具体反应方程如下:



生成的界面态密度 D_{it} 与晶体管的表面复合率 S_0 成正比,具有如下关系:

$$S_0 = (KT/2) V_t (n_p)^{1/2} D_{it} \quad (3)$$

其中 V_t 为载流子热速度; n_p 分别为电子和空穴的俘获截面^[12].因此,界面态的增加将导致表面复合电流和基极电流的增加,从而引起偏置电流 I_{bs} 的增加.

从这个模型描述可以看出,运输到界面处的氢离子对界面态的产生起着极其重要的作用,直接影响到界面态的生成,但是氢离子的运输受到氧化物陷阱电荷所形成的空间电场影响,通过采用退火处理把辐照后产生的氢离子尽可能多地运输到界面处生成界面态,其机理同 4.1 中重点讨论的情况是一致的.

通过上述两个模型的分析可以看到,空间电荷模型对不同条件下的辐射损伤现象进行了很好的解

释,界面态建立的氢离子两步模型的有氢反应机理有力地证明了延迟生成的界面态是与时间相关的,它们都很好地支持了这种循环辐照-退火方法的辐射损伤机理.

5 结论

通过对上述实验结果的对比和分析可以发现,双极运放的辐射损伤与辐照剂量率、累计剂量、退火温度及时间有很大关系,而界面态的生长又与时间有着密切的关系,通过调整这些参数进行循环辐照-退火实验,可以改变界面态的数目来增强损伤.在累计剂量达到 100krad (Si) 时,辐照剂量率为 2rad (Si)/s、100 高温退火 2h 的条件对双极运放 LM108 的损伤最大,比低剂量率室温辐照和高剂量率高温辐照效果都明显.在误差允许范围内用 2rad (Si)/s 辐照加 10h 室温退火的条件可以测评出 LM108 在空间低剂量率条件下的辐射损伤情况,这些对于其他类型器件的测评方法研究都具有重要的借鉴意义.

参考文献

- [1] Enlow E W, Pease R L, Combs W E, et al. Response of advanced bipolar processes to ionizing radiation. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1991, 38(6) :1342
- [2] Carriere T, Ecoffet R, Poirot P. Evaluation of accelerated total dose testing of linear bipolar circuits. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2000, 47(6) :2350

- [3] Titus J L, Emily D, Krieg J F, et al. Enhanced low dose rate sensitivity (ELDRS) of linear circuits in a space environment. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1999, 46(6) :1608
- [4] 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. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1997, 44(6) :1960
- [5] Freitag R K, Brown D B. Low dose rate effects on linear bipolar IC's experiments on the time dependence. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1997, 44(6) :1906
- [6] Fleetwood D M, Kosier S L, Nowlin R N. Physical mechanism contribution to enhanced bipolar gain degradation at low dose rates. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1994, 41(6) :1871
- [7] Rashkeev S N, Cirba C R, Fleetwood D M, et al. Physical model for enhanced interface-trap formation at low dose rates. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2002, 49(6) :2650
- [8] Hjalmarson H P, Pease R L, Witzack S C, et al. Mechanisms for radiation dose-rate sensitivity of bipolar transistors. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2003, 50(6) :1901
- [9] Witzack S C, Schrimpf R D, Galloway K F, et al. Accelerated tests for simulating low dose rate gain degradation of lateral and substrate PNP bipolar junction transistors. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1996, 43(6) :3151
- [10] Witzack S C, Schrimpf R D, Fleetwood D M, et al. Hardness assurance testing of bipolar junction transistors at elevated irradiation temperatures. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1997, 44(6) :1989
- [11] Winkour P S, Beoch H E, McGarrity J M, et al. Two-stage process for build-up of radiation induced interface states. *J Appl Phys*, 1979, 50(5) :3492
- [12] Lu Wu, Ren Diyuan, Guo Qi, et al. Radiation effects and annealing characteristics of bipolar operational amplifiers. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1998, 19(5) :374 (in Chinese) [陆妩,任迪远,郭旗,等. 双极运算放大器的辐射效应和退火特性. *半导体学报*, 1998, 19(5) :374]

Time Dependence of Radiation Damage in Bipolar Operational Amplifiers

Gao Song^{1,2,†}, Lu Wu¹, Ren Diyuan¹, Niu Zhenhong^{1,2}, and Liu Gang^{1,2}

(1 Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

(2 Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The time dependence of radiation damage in bipolar op-amps is studied through a series of radiation experiments. The results show that radiation damage in bipolar op-amps is closely related to time, and we can evaluate low-dose rate radiation damage in devices by adjusting radiating the dose rate, annealing temperature, and annealing time parameters to experiment on circulating radiation-anneal. From the interface states point of view, the possible mechanisms of radiation damage are also analyzed.

Key words: bipolar operational amplifiers; radiation damage; time dependence; low dose rate; accelerated evaluation

PACC: 6180E **EEACC:** 2570B; 1220

Article ID: 0253-4177(2006)07-1280-05

†Corresponding author. Email: gaosong800@163.com

Received 18 November 2005, revised manuscript received 13 January 2006