

运算放大器不同剂量率的辐射损伤效应

陆 妩 任迪远 郭 旗 余学峰 艾尔肯

(中国科学院新疆理化技术研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 对几种不同类型 (TTL, CMOS, JFET-Bi, MOS-Bi) 的典型星用运算放大器在不同剂量率 (100, 10, 1 及 0.01 rad(Si)/s) 辐照下的响应规律及随时间变化的退火特性进行了研究. 结果显示不同类型运放电路的辐照响应有明显差异: 双极运放电路辐照剂量率越小, 其损伤越大; CMOS 运放电路对不同剂量率的响应并非线性关系, 但不同剂量率辐照损伤的差异, 可以通过与低剂量率相同时间的室温退火得到消除, 本质上仍然是与时间相关的效应; JFET 输入运放不仅有低剂量率辐照损伤增强效应存在, 且辐照后还有明显的“后损伤”现象; PMOS 输入运放的结果则表明, 各辐照剂量率间的损伤无明显区别.

关键词: 运算放大器; ^{60}Co 辐照; 退火; 剂量率效应

EEACC: 2570; 1220

中图分类号: TN431.1

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)07-1464-05

1 引言

在空间辐射环境中, 辐照总剂量的积累是一个比较缓慢的过程, 其典型剂量率分布范围为 $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ rad(Si)/s}$. 考虑到时间、经费等因素, 实验室辐照试验根据美军标的要求, 实际使用的典型辐照剂量率范围一般为 $50 \sim 300 \text{ rad(Si)/s}$. 这种试验剂量率与实际空间的差异, 将有可能使得在实验室测试评判方法得到的电子器件和电路器件的抗辐照水平, 与在卫星、空间站等小剂量率辐照环境下使用的电子元器件的实际抗辐射能力严重不符, 从而给卫星、空间站等电子系统的可靠性带来极大隐患. 许多试验结果也证实了这种担心并非杞人忧天. 有研究报道, 在 $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ rad(Si)/s}$ 的剂量率范围内, 与高剂量率相比, 某些双极器件在低剂量率辐照下的损伤严重程度可达几十倍以上, 这不能不引起人们尤其是航天领域的重视.

虽然, 目前国际上已有大量低剂量率辐照损伤增强 (enhanced low dose rate sensitivity, ELDRS) 的报道^[1-6], 但是有关这个效应潜在的机理尚不清楚. 且不同器件类型, 由于制作工艺的不同, 其剂量率效应也存在很大差异. 对于什么样的器件和电路

会出现低剂量率辐照损伤增强效应? 这一效应与哪些因素有关? 它们与剂量率关系的基本机理是什么等疑问, 目前国际上还没有一个统一的研究结果. 而国内对这一方面的研究还很少, 尚处于探索阶段^[7,8]. 因此, 为了对这些问题有更进一步的了解, 特选用了航天领域广泛使用的 TTL, CMOS, JFET-Bi, MOS-Bi 几种不同类型的运算放大器, 进行了不同剂量率的辐射损伤和退火特性的研究, 发现由于运放电路制造工艺和电路结构的不同, 其辐照损伤也有明显区别, 本文主要介绍这一研究结果.

2 实验

实验样品为典型的星用运算放大器电路, 包括双极运算放大器 LM108, CMOS 运算放大器 MC14573, JFET 输入双极运放 OP42 和 PMOS 输入双极运放 CA3140. 辐照源分别为本所 $2.59 \times 10^{15} \text{ Bq}$ 的 ^{60}Co 源和 $3.7 \times 10^{13} \text{ Bq}$ 的小钴源. 在辐照期间, 将运放的两个输入端接地, 并根据器件的类型分别加不同的电源电压. 辐照结束后, 保持与辐照时相同的偏置状态, 对不同类型的运放电路分别进行了与低剂量率的总辐照时间相对应的室温退火试验.

为了保证每一次辐照试验数据的准确可靠, 在

陆 妩 女, 1962 年出生, 副研究员, 现从事线性电路的辐射效应及损伤机理的研究.

2004-10-23 收到, 2004-12-30 定稿

辐照期间,当采用每一剂量率进行辐照时,在每一辐照偏置板上还配备了相应的热释光剂量片,以确定和验证实际的辐照总剂量及剂量率.并且,每次辐照都将试验样品屏蔽在用美军标制作的 Pb/Al 屏蔽盒内,以屏蔽低能散射,防止剂量增强效应的发生.

运算放大器样品的电参数测试由 Tektronix 公司生产的运放电参数测试曲线示踪仪完成.每次辐照前后及退火前后测试的主要参数有:输入失调电压 V_{io} 、输入偏置电流 I_{bs} 、共模抑制比 CMRR、开环电压增益 $AVOL$ 等.上述所有参数测试在器件辐照及退火后的 20min 之内完成.

3 结果和讨论

3.1 LM108 双极运算放大器的辐照响应和退火特性

LM108 双极运算放大器是一种典型的星用运放电路,对它在不同剂量率辐照后的实验结果表明,LM108 运放对电离辐照相当敏感,在所测试的电参数范围内,绝大多数电参数都有不同程度的退化,其中偏置电流 I_{bs} 的辐照变化最为显著.图 1(a),(b) 分别给出了 LM108 运放在经 100,10,1,0.01rad(Si)/s 不同剂量率辐照及室温退火 2×10^5 min 后,其辐射敏感参数偏置电流 I_{bs} 随辐照总剂量及时间的变化关系.由图 1(a) 可看出,在辐照至 1×10^5 rad(Si) 时,偏置电流 I_{bs} 在四种不同剂量率的辐照下都有了显著地增长.其中,0.01rad(Si)/s 的最大,1,10rad(Si)/s 的次之,100rad(Si)/s 的最小,表现出较明显的低剂量率辐射损伤增强效应.

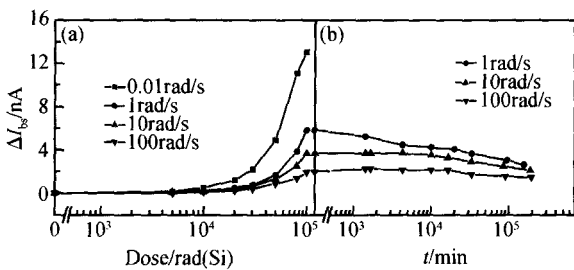


图 1 LM108 运放的偏置电流随辐照总剂量及退火时间的变化

Fig. 1 I_{bs} of LM108 versus total dose and post irradiation annealing time at room temperature

图 1(b) 给出了 I_{bs} 辐照后在室温条件下随时间

的变化关系.由图可见,三种较高剂量率辐照的样品,在经过 1.67×10^5 min 的室温退火以后,都逐渐向初始值恢复.特别值得指出的是,图 1(b) 中的退火时间 1.67×10^5 min 点,正好是由 0.01rad(Si)/s 较低剂量率辐照至 1×10^5 rad(Si) 总剂量时所需的总辐照时间.由图 1(b) 还可以看出,在该退火点,三种较高剂量率辐照样品的 I_{bs} 仅有向初始值恢复的趋势,而与此相对应,用 0.01rad(Si)/s 辐照的样品,在达到 1×10^5 rad(Si) 总剂量时,其 I_{bs} 却持续增长,比美军标规定的模拟辐照剂量率范围 100rad(Si)/s 的辐照损伤高出近 7 倍.这表明对 LM108 双极运算放大器电路来说,它的不同剂量率辐射损伤间的差异,不能用相同时间的室温退火来消除,是真正意义上的低剂量率辐射损伤增强效应.

3.2 MC14573 CMOS 运算放大器的辐照响应和退火特性

CMOS 运算放大器 MC14573 是一种星上常用的线性模拟电路.一般认为 MOS 器件的剂量率效应实际上是一种与辐照时间有关的纯时间效应,CMOS 线性电路是否也如此,尚未见报道.为了进一步研究和验证这一结论,分别采用 100,10,1,0.01rad(Si)/s 不同剂量率对 MC14573 CMOS 运算放大器电路进行了辐照及室温退火试验.图 2(a),(b) 给出了其辐照敏感参数开环增益 $AVOL$ 随辐照总剂量及退火时间的变化关系.由图可看出,CMOS 运放电路对电离辐照相当敏感,在辐照至 1×10^4 rad(Si) 时,其开环增益 $AVOL$ 即已有较大幅度地衰减.比较而言,10rad(Si)/s 辐照的样品退化最严重,其他两种剂量率次之,而 0.01rad(Si)/s 的最小.可以看出,CMOS 运放不同剂量率的辐照损伤与 LM108 双极运放电路的辐照结果有着较明显的区别.

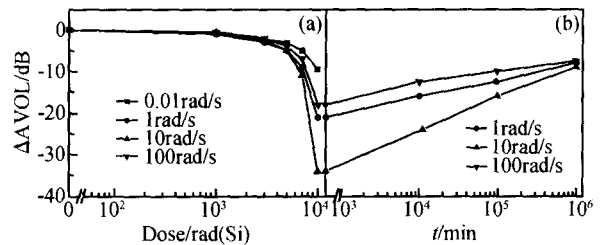


图 2 MC14573 运放的开环增益随辐照总剂量及退火时间的变化

Fig. 2 $AVOL$ of MC14573 versus total dose and post irradiation annealing time at room temperature

为了验证器件的辐射剂量率效应是否属于时间效应,以 0.01rad(Si)/s 辐照至 1×10^4 rad(Si) 的时间为基准,分别对 100,10,1rad(Si)/s 的辐照器件进行了室温退火试验.图 2(b)给出了三种相对较高剂量率辐照的样品辐照后其开环增益 ΔV_{OL} 随时间的响应规律.从图中可清晰地看到,无论器件经三种剂量率辐照至 1×10^4 rad(Si) 后其开环增益的变化大小如何,在达到用 0.01rad(Si)/s 辐照至 1×10^4 rad(Si) 的所需时间(约 10^6 s)时,三者的退火值都基本恢复到与 0.01rad(Si)/s 辐照至 1×10^4 rad(Si) 时相同的损伤值,表现出较明显的时间效应关系.

3.3 OP42 JFET 输入运算放大器的辐照响应和退火特性

OP42 JFET 输入运算放大器是一种常用的高速、快调节的精密星用模拟电路.对该电路的不同剂量率的辐照实验结果表明,随着辐照剂量的增加,其部分电参数也有明显的变化.图 3(a),(b)分别给出了其敏感参数失调电压 V_{io} 在 100,10,1,0.01rad(Si)/s 的不同剂量率下随辐照总剂量及辐照后室温下随时间退火的变化关系.由图 3(a)可看出,在三种较高剂量率的辐照下,样品的失调电压变化并不明显,且无显著差异,但更低剂量率 0.01rad(Si)/s 的辐照损伤却显示出特异性.可以观察到,在总剂量达 1×10^4 rad(Si) 以后, V_{io} 开始明显增大,在达到 1×10^5 rad(Si) 时,用 0.01rad(Si)/s 剂量率辐照的失调电压变化,较之前三种剂量率增长了近 20 倍.

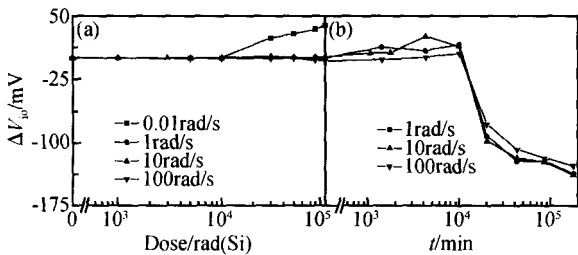


图 3 OP42 运放的失调电压随辐照总剂量及退火时间的变化
Fig. 3 V_{io} of OP42 versus total dose and post irradiation annealing time at room temperature

图 3(b)给出了在三种较高剂量率的辐照下,其失调电压经辐照后在室温下随时间变化的退火特性.可以看到,三种较高剂量率辐照的样品,在辐照结束后 1×10^4 min 前均先正漂,然后急速负向增大,

且退火规律基本一致,在经 1.67×10^5 min 退火后,失调电压 V_{io} 都已负漂至 150mV 左右,表现出明显的“后损伤”效应.

3.4 CA3140 PMOS 输入运算放大器的辐照响应和退火特性

CA3140 是一种差分输入级为 PMOS 管,其余电路均为双极晶体管的典型运算放大器电路.一般认为 MOS 器件的剂量率效应是一种与辐照时间有关的纯时间相关效应,而双极晶体管则反之.为了研究在 MOS 管和双极晶体管都存在的条件下,运放电路对不同剂量率的响应规律,也分别采用 100,10,1,0.01rad(Si)/s 的不同剂量率,对 CA3140 运算放大器电路进行了辐照及室温退火试验.图 4(a),(b)给出了其辐照敏感参数开环增益 ΔV_{OL} 随辐照总剂量及辐照后室温下随时间的变化关系.从图 4(a)中可看出,四种不同剂量率辐照下的 ΔV_{OL} 都有一定程度的衰减,但相互之间的辐照变化却差别不大,也即没有明显的剂量率效应.图 4(b)中辐照后的室温退火特性则显示,三种较高剂量率辐照样品的 ΔV_{OL} 在经 1.67×10^5 min 退火后都有一定的恢复,但退火特性都不明显.

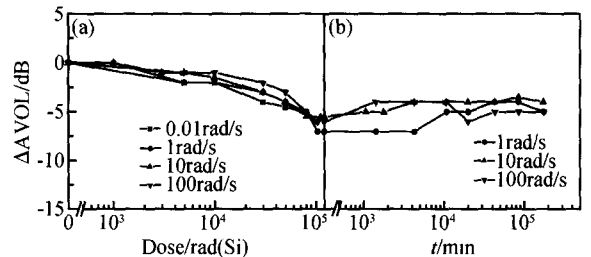


图 4 CA3140 运放的开环增益随辐照总剂量及退火时间的变化
Fig. 4 ΔV_{OL} of CA3140 versus total dose and post irradiation annealing time at room temperature

从图 1~4 的实验结果可发现,不同类型的运算放大器由于其电路结构及制作工艺相异,对不同剂量率的辐照响应也表现出明显的辐照损伤差异,反映出不同的失效模式:对纯双极运放,表现为有低剂量率辐照损伤增强效应;对纯 CMOS 运放,只是时间相关的效应;对 JFET 输入双极运放,除了有低剂量率辐照损伤增强效应外,还有明显的“后损伤”效应;而对 PMOS 输入双极运放,则无明显剂量率效应的差异.这预示着运算放大器电路不同剂量率辐照损伤的失效模式,与输入差分对的晶体管类型及

其相匹配的其余单元电路结构有密切的关系,而不同类型运算放大器所表现出的不同响应特性,则与其不同的失效机理有关。

研究还发现,双极运算放大器电路在电离辐射环境中的辐照变化,是由于其电路内部晶体管的特性衰减引起的。而不同辐照剂量率之间辐照损伤差异,则与晶体管内部辐照产生在基-射结上的氧化层中的陷阱正电荷及硅与氧化物界面中的缺陷有关。可能的原因是:(1)双极器件制作工艺中的氧化层厚度相对较厚,在氧化层中的电场相对较小,因此,由于辐照而产生的电子陷阱能被固定。(2)常规的屏蔽氧化层是非加固的,空穴的俘获发生在氧化层的体内;因此,电子陷阱的产生沿着整个空穴的路径通向 Si-SiO₂ 界面。而在低剂量率辐照的情况下,拥有的电子陷阱要比中等剂量率的小,这减少了空穴被电子俘获所造成的损失,导致了正电荷的增加。也就是说,在屏蔽氧化层中正的氧化物陷阱电荷是随着剂量率的减小而增加的。在长时间的低剂量率辐照期间,室温条件下,即使是正的氧化物陷阱电荷的热退火,也不能补偿由于正电荷的产生而引起的增长,因而产生了低剂量率辐照损伤增强效应。

JFET 输入双极运算放大器之所以会出现低剂量率辐照损伤增强效应,且其敏感参数为失调电压,是因为当 JFET 结构暴露到电离辐射环境中时,辐照会在其寄生的 MOS 结构的 LOCOS 绝缘氧化层内产生电荷陷阱,形成耗尽区。而耗尽层的增加,会引起 JFET 沟道电阻的增加,导致 JFET 跨导的减小。当 LOCOS 氧化层内积累了足够多的电荷时,寄生的 MOS 晶体管就会出现,一旦反型层建立,则寄生的 MOS 结构就会变成完全受 JFET 的中心栅所控制的结构,这一结构的突然变化,会使夹断电压漂移,也即引起 $I_{ds}-V_{gs}$ 的特性退化。而在低剂量率辐照下其损伤之所以增大,则是因为辐照时间的延长,增大了空穴传输到 Si/SiO₂ 界面的机会,使净正电荷量的积累增多,从而诱使了寄生的 MOS 晶体管阈电压的更大漂移^[4]。

从图 2 的实验结果可以发现,CMOS 运算放大器的三种较高剂量率的辐照损伤也表现出了不同的辐照响应特性,即 10rad(Si)/s 的辐照损伤反而最大。一种可能的解释是,在辐射累积剂量一定的情况下,对氧化物电荷来说,辐照所需时间越长,辐射感生氧化物电荷退火越多,即辐射感生氧化物净电荷越少,反之,则越多;对界面态来说,辐照所需时间越

长,慢界面态感生越多,反之越少。因此,对 CMOS 电路而言,其损伤程度与辐照累积时间的关系,实际是氧化物电荷随时间退火和界面态随时间增长的一个综合反映的过程。对 100rad(Si)/s 剂量率,由于达到 1×10^4 rad(Si) 的辐照总剂量所需的时间相对较短,大约 100s 左右,在如此短的时间内,虽然相对于小剂量辐照有大量的氧化物电荷产生,但界面态,尤其是慢界面态尚未有足够的时间生成,因而引起的损伤相对较小;而 1rad(Si)/s 的则相反,由于时间足够长,样品内虽然有大量的界面态产生,但氧化物电荷随时间增加,退火幅度很大,两者抵消,因而使得器件损伤程度也不大;10rad(Si)/s 的结果则是介于两者之间,在该剂量率辐照下产生的氧化物电荷和界面态虽然都不是峰值,但两者的迭加却达到了最大值,因此器件的辐射损伤最大。至于 0.01rad(Si)/s 的辐照结果,则是氧化物电荷和界面态互相竞争的最终结果,在这一过程中,界面态的产生占了主导地位,补偿了由氧化物电荷引起的变化。

4 结论

从以上的实验结果可以得出如下结论:

(1) 双极运算放大器 LM108 有明显的低剂量率辐照损伤增强效应,表现为辐照剂量率越低,损伤越明显,且辐照后室温退火损伤不易恢复。

(2) CMOS 运算放大器 MC14573 虽也有不同剂量率的损伤差异,但这种差异可以在随后相同时间的室温退火中消除,因而只是时间效应的关系。

(3) JFET 输入双极运算放大器 OP42 也有明显的低剂量率辐照损伤增强效应,但与纯双极运放不同,辐照后还有明显的“后损伤”现象。

(4) PMOS 输入双极运算放大器 CA3140 的不同剂量率的辐照结果表明,各剂量率间的辐照损伤无明显区别,没有观察到剂量率效应的现象。

(5) 不同类型运算放大器在不同剂量率辐照下的响应特性与其电路结构和制造工艺有较强的依赖关系,而各类型电路所表现出的辐照损伤差异则是由其不同的失效机理所决定的。

参考文献

- [1] Clure S Mc, Pease R L, Will W, et al. Dependence of total dose response of bipolar linear microcircuits on applied dose rate.

- IEEE Trans Nucl Sci ,1994 ,41 (6) :2544
- [2] Carriere T ,Beaucour J ,Gach A ,et al. Dose rate and annealing effects on total dose response of MOS and bipolar circuits. IEEE Trans Nucl Sci ,1995 ,42 (6) :1567
- [3] Johnston A H ,Rax B G ,Lee C I. Enhanced damage in linear bipolar integrated circuits at low dose rate. IEEE Trans Nucl Sci ,1995 ,42 (6) :1650
- [4] Flament O ,Autran J L ,Roche P ,et al. Enhanced total dose damage in junction field effect transistors and related linear integrated circuits. IEEE Trans Nucl Sci ,1996 ,43 (6) :3060
- [5] 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
- [6] Carriere T ,Ecoffet R ,Poirot P. Evaluation of accelerated total dose testing of linear bipolar circuits. IEEE Trans Nucl Sci , 2000 ,47 (6) :2350
- [7] Chen Panxun. Enhanced damage in linear integrated circuits at low dose rate. Nuclear Electronics & Detection Technology , 1999 ,19 (5) :333 (in Chinese) [陈盘训. 双极线性集成电路低剂量率辐射的增强损伤. 核电子学与探测技术 ,1999 ,19 (5) : 333]
- [8] Zhang Hualin ,Lu Wu ,Ren Diyuan ,et al. The low dose-rate ionizing radiation response of bipolar transistors. Chinese Journal of Semiconductors ,2004 ,25 (12) :1675 (in Chinese) [张华林 ,陆妩 ,任迪远 ,等. 双极晶体管的低剂量率电离辐射效应. 半导体学报 ,2004 ,25 (12) :1675]

Radiation Effects of Operational Amplifier in Different Dose Rates

Lu Wu , Ren Diyuan , Guo Qi , Yu Xuefeng , and Erkin

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

Abstract : Radiation effects and annealing characteristics are investigated for different types of operational amplifiers at four dose rates ranging from 100 to 0.01rad(Si)/s for same total doses. The results show that for the bipolar op-amps ,the degradation is more pronounced at low dose rate than at high dose rate and dose rate effects also exist for CMOS op-amps ,but different from bipolar op-amps. It represented that the lower the radiation dose rate was applied ,the less the devices were damaged ,and the difference induced by high dose rate irradiation can be eliminated by a long time annealing in room temperature. JFET-Bi op-amps have not only enhanced low dose rate sensitivity(ELDRS) effects when irradiated but also further obvious effects of "post-radiation damage " when annealing at room temperature. Moreover ,it is also found that there is no difference when the pMOS-Bi op-amps was radiated in different dose rates.

Key words : operational amplifier ; ^{60}Co radiation ; annealing ; effects of dose rate

EEACC : 2570 ; 1220

Article ID : 0253-4177(2005)07-1464-05

Lu Wu female ,was born in 1962 ,associate professor. She is engaged in research on radiation effects and mechanisms of linear integrated circuits.

Received 23 October 2004 ,revised manuscript received 30 December 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics