

# 双极运算放大器的辐射效应和退火特性

陆 妩 任迪远 郭 旗 余学锋 范 隆 张国强 严荣良

(中国科学院新疆物理研究所 乌鲁木齐 830011)

**摘要** 本文介绍了 OP-07 双极运算放大器的 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 射线、不同能量电子和质子的辐照试验以及 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 和电子辐射损伤在室温和 100 °C 高温条件下的退火效应, 揭示了双极运算放大器电参数对不同射线的辐照响应规律; 研究了不同辐射源对双极运算放大器的不同辐射损伤机理; 并对质子辐照损伤程度与能量的依赖关系以及质子辐照损伤同 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 和电子辐照损伤的差异进行了探讨。结果表明, 界面态的产生是 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 和电子辐照损伤的主要原因, 而位移效应造成的体损伤在质子辐照效应中占有重要地位。

EEACC: 1220, 2570, 2550A

## 1 引言

随着航天等科学技术的发展, 运算放大器作为一种基本的线性电路在卫星电子系统中日益得到广泛的应用。众所周知, 在空间的辐射环境中存在着各种能量不同的带电粒子(主要是质子和电子), 这些带电粒子与卫星中的电子元器件作用而产生各种辐射效应, 如电离效应、位移效应以及单粒子效应等。一般来说, 辐射效应的大小与入射粒子的种类、能量和强度都有密切的关系, 因此, 深入了解运放电路在各种辐射条件下的变化规律及损伤特性, 对系统地评价运算放大器电路的抗辐照水平, 特别是研究各种粒子对运放电路的损伤等效性及其微观机制, 具有非常重要的意义。

国外从七十年代中期开始, 曾对几种型号的双极运放进行了总剂量辐照响应, 快、慢中子辐照损伤机理, 高剂量率瞬态辐照及其加固工艺的研究<sup>[1-7]</sup>, 但这些研究都不够系统。针对国内外在运放辐照效应研究方面存在的某些不足和空白, 近年来, 我们系统地开展了不同类型(双极、CMOS)的运放电路在不同辐射环境中的响应规律及辐照特性的研究工作, 获得了许多有意义的成果。本文在我们研究工作的基础上, 着重介绍了常用的 OP-07 双极运算放大器在不同射线粒子、不同能量及相同剂量率( $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  1M eV、1.5M eV 电子和 4M eV、7M eV、30M eV 质子)辐照条件下的响应规律和抗辐照能力; 探讨了引起双极运放在质子辐照环境中电参数衰变的损伤机制, 并通过研究其电离辐照敏感参数在室温和 100 °C 温度下

陆 妩 女, 1962 年出生, 高级工程师, 从事线性电路电离辐射效应、损伤机理和加固技术研究  
任迪远 男, 1950 年出生, 研究员, 从事 MOS 器件损伤机理和加固研究  
郭 旗 男, 1964 年出生, 工程师, 从事集成电路辐射效应与测试技术研究  
1997-03-11 收到, 1997-05-15 定稿

随时间的变化关系, 分析了双极运算放大器对 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 和电子的辐照损伤机制及参数失效机理, 为该类器件在卫星等辐射环境下的可靠应用, 提供了实验依据

## 2 实验方法

试验样品为高精度、低漂移 OP-07 双极运算放大器。在辐照及退火期间, 将运放的两个输入端接地, 使之处于零偏状态, 同时电源电压接正负 15V 电压

样品的电参数测试通过美国 Tektronix 公司生产的 577-178 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量的电参数有: 输入失调电压  $V_{is}$ 、输入偏置电流  $I_{bs}$ 、输入失调电流  $I_{os}$ 、共模抑制比 CMRR、开环电压增益 AVOL、电源电压抑制比 SVRR、电源供应电流  $I_{ss}$  及共模输入电压范围  $V_{icm}$  和输出电压范围  $V_{os}$ 。上述所有电参数测试在器件辐照及退火后 20 分钟之内完成

$\gamma$ 和电子辐照是在本所 4 万居里 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 源和 2MeV 的电子静电加速器(试验时能量分别调为 1.0MeV 和 1.5MeV)上完成。电子束流密度  $Q$  通过下式换算为吸收剂量率 Gy(Si)/s:

$$\dot{D} = 2.5 \times 10^{-10} Q \quad (1)$$

辐照中, $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 和电子选用同一辐照剂量率: 4.86Gy(Si)/s

辐照结束后, 保持与辐照时相同的偏置状态, 先进行 168 小时的室温退火, 然后再进行 168 小时的 100℃ 高温退火

质子辐照在哈萨克斯坦国家核中心原子核物理研究所的 U-150 型回旋加速器上完成。质子的能量分别为 4MeV、7MeV 和 30MeV。束斑面积为直径 8cm 的园形区域, 并垂直入射到样品上。在辐照期间, 每个试验器件的顶盖均已除去, 以消除封装顶盖引起的能量损失。同时, 为了比较不同能量的质子辐照对双极运放电路的影响, 在辐照期间, 分别将三种不同能量的质子束注量率依据下式<sup>[7]</sup>换算成统一的吸收剂量率  $\dot{D}$  (Gy(Si)/s)

$$\dot{D} = 3.6 \times 10^6 Q(S/\rho)_{Si} \quad (2)$$

其中  $(S/\rho)_{Si}$  为不同能量的质子在 Si 中的质量阻止本领(焦耳·米<sup>2</sup>/千克);  $Q$  为质子的注量率(1/cm<sup>2</sup>·s), 在实际辐照中, 采用与 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 和电子相同的剂量率, 即  $\dot{D} = 4.86\text{Gy(Si)/s}$ 。因此, 对 4MeV、7MeV 和 30MeV 采用的质子束注量率分别为  $2.17 \times 10^8 \rho/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 、 $3.65 \times 10^8 \rho/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$  和  $1.02 \times 10^9 \rho/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$

## 3 实验结果

### 3.1 双极运算放大器的 $^{60}\text{Co}$ $\gamma$ 和电子辐照响应及时间退火特性

OP-07 双极运算放大器对电离辐照比较敏感, 在所测试的电参数中绝大多数在总剂量  $1 \times 10^4\text{Gy(Si)}$  后都发生了较大的变化, 图 1~ 图 3, 分别给出了 OP-07 双极运算放大器的辐照敏感参数偏置电流  $I_{bs}$ 、开环电压增

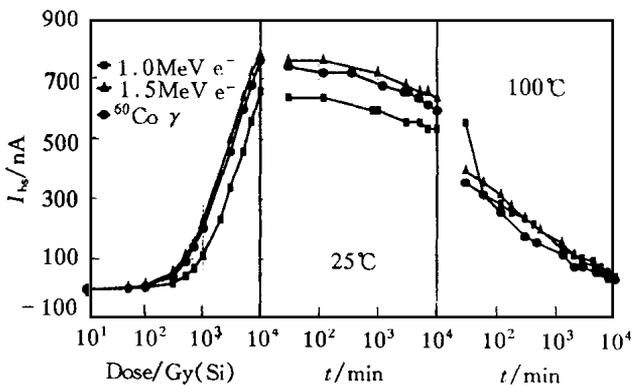


图 1 OP-07 运放  $I_{bs}$  随辐照总剂量及辐照后在不同温度下随时间的变化关系

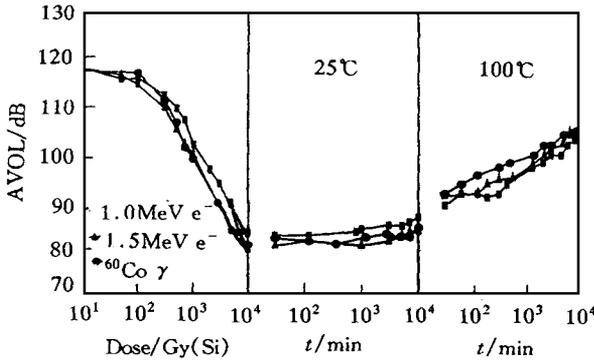


图 2 OP-07 运放 AVOL 随辐照总剂量及辐照后在不同温度下随时间的变化关系

都随辐照总剂量的增大而衰减, 其中 CMRR 衰降最明显, 与初始值相比减少了 30% 左右

辐照后在室温退火条件下, 随退火时间的增加, OP-07 各参数如  $I_{bs}$ 、AVOL、 $I_{ss}$  等都有不同程度的恢复, 但恢复幅度非常小, 经过  $1 \times 10^4$  分钟室温退火, 各参数恢复程度不到 10%。在高温退火条件下,  $I_{bs}$ 、AVOL、 $I_{ss}$  等随退火时间的增加, 迅速向辐照前的初始值恢复, 高温退火  $1 \times 10^4$  分钟时, OP-07 运放各参数已基本恢复至初始值附近

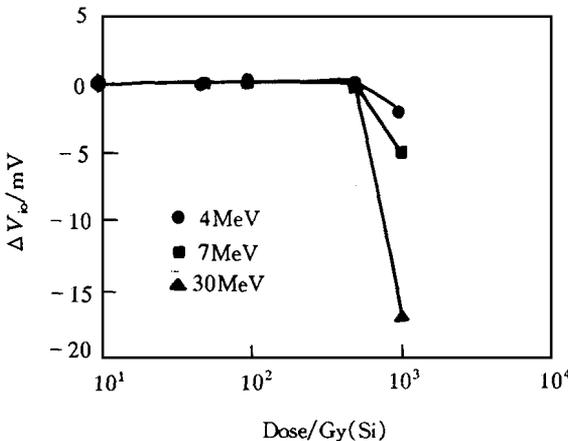


图 4  $\Delta V_b$  与质子辐照剂量的关系

益 AVOL 及电源电流  $I_{ss}$  在  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  和 1 MeV 及 1.5 MeV 电子辐照下, 随辐照总剂量及辐照后在不同退火温度下随时间变化的关系 从图 1~ 图 3 可以看到, 辐照到 500Gy (Si) 后, 随辐照总剂量的增加,  $I_{bs}$  迅速增大, AVOL、 $I_{ss}$  逐渐减小, 辐照到  $1 \times 10^4$  Gy (Si) 时, 与初始值相比,  $I_{bs}$  增大了 2 个数量级以上,  $I_{ss}$  和 AVOL 则分别减小了 20% 和 30%。

在所测试的电参数中, 除了上述参数发生变化外, 共模电压抑制比 CMRR 及电源电压抑制比 SVRR 也

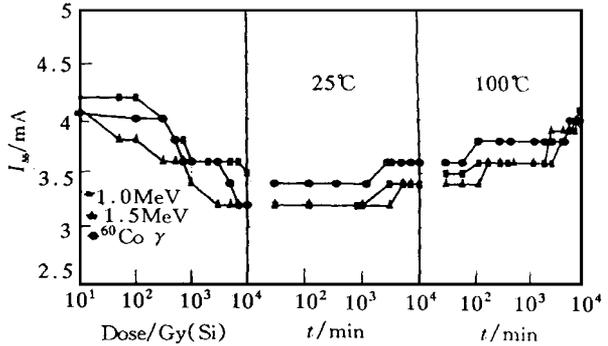


图 3 OP-07 运放  $I_{ss}$  随辐照总剂量及辐照后在不同温度下随时间的变化关系

从图 1~ 3 还可以看到, OP-07 运放电路在  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 、1 MeV、1.5 MeV 电子等不同辐射源 (辐射能量) 辐照下, 其电参数无论是随辐照总剂量的变化, 还是辐照后在不同温度条件下随时间的变化, 趋势都基本相同, 没有表现出较大的差异, 表明 OP-07 运放在上述不同辐照源条件下辐照的损伤机制基本相同

### 3.2 OP-07 双极运放电路的质子辐照效应

图 4~ 6 分别给出了 OP-07 双极运算放大器电路的辐照敏感参数失调电压  $V_D$ 、开环电压增益 AVOL 及电源电流  $I_{ss}$

在三种不同能量质子辐照下, 随总剂量增加而变化的曲线 可以看出, 三种不同能量质子辐照下的运放电路, 在总剂量达  $1 \times 10^3 \text{ Gy (Si)}$  时, 都发生了明显的变化, 其中失调电压  $V_{\text{io}}$  及电源电流  $I_{\text{ss}}$  随辐照总剂量增加而增大, 开环电压增益  $\Delta V_{\text{OL}}$  则大幅度减小 而当总剂量达到  $3 \times 10^3 \text{ Gy (Si)}$  时, 除了电源电流  $I_{\text{ss}}$ 、偏置电流  $I_{\text{bs}}$  继续增大以外, 绝大多数电参数都出现了功能失效现象, 表现出对质子辐照相当大的损伤敏感性 另外, 仔细观察图 4~ 图 6 还可以发现, 其电参数的变化与质子能量有较强的依赖关系, 即能量越大, 损伤越严重

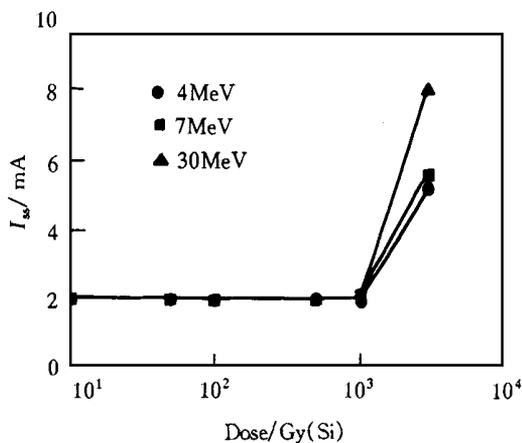


图 5  $I_{\text{ss}}$  与质子辐照剂量的关系

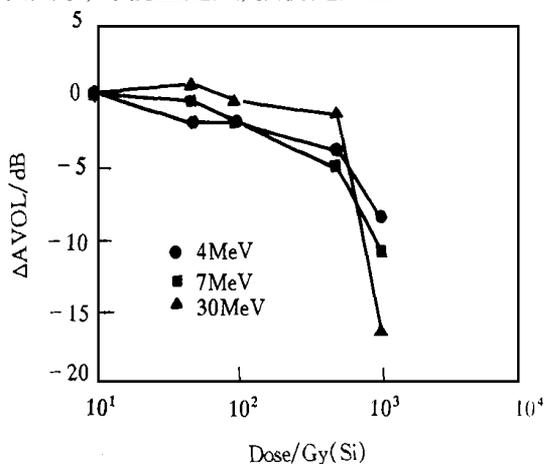


图 6  $\Delta V_{\text{OL}}$  与质子辐照剂量的关系

## 4 讨论

从以上的实验结果中可以看出, OP-07 运算放大器无论是在  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  和电子辐射环境中, 还是在不同能量的质子辐照环境中, 都表现出了相当大的损伤敏感性, 而且实验结果还表明, OP-07 运放电路对质子辐照更为敏感 造成 OP-07 运放电路在二种不同辐射环境中电参数变化出现差异的原因, 主要是由于  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  电子和质子对器件的不同损伤机理引起的 一般认为<sup>[1,9]</sup>, 在电离辐射环境中, 有三种基本的损伤机制影响双极运算放大器的性能退化: (1) 体损伤; (2) 电离辐射感生的界面态导致表面复合率的增加; (3) 钝化层(一般为  $\text{SiO}_2$ ) 中正电荷俘获引起的表面反型, 下面结合我们的实验结果来进行具体分析

电离辐照在 Si 中产生的复合中心(体损伤), 将增加电子-空穴对的复合率, 使得双极晶体管基区少数载流子寿命缩短, 电流增益下降, 此外, 体损伤还会引起双极晶体管集电极负载电路电阻率增大, 造成集电极饱和电流增多, 晶体管漏电增大 根据 Brown<sup>[10]</sup>等人的研究结果, 这种由电离辐射对 Si 造成的载流子寿命损伤, 一般需在 200~ 400 高温退火条件下, 才可产生比较明显的恢复 但如图 1~ 3 所示, 在我们的实验结果中, OP-07 在 100 温度下退火  $1 \times 10^4$  分钟, 电参数已基本恢复至初始值, 因此, 我们认为对于  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  和能量 1 MeV 左右的电子来说, 由于入射粒子的体积和能量都较小, 产生体损伤的可能性不大, 因此对运放电参数影响也较小 这一结论也可以从图 3 中电源电流  $I_{\text{ss}}$  随辐照总剂量的增大而减小中得到进一步证实

双极晶体管的钝化层( $\text{SiO}_2$ )一般较厚,如果不采用特殊的抗辐射加固工艺,在电离辐射环境中,将非常容易在器件的钝化层( $\text{SiO}_2$ 层)和Si界面产生并积累大量的界面态, $S_{\text{snow}}$ 等人的研究表明<sup>[9, 11, 12]</sup>,晶体管的表面复合率 $S_o$ 与界面态密度 $D_{it}$ 有如下关系:

$$S_o = (\pi k T / 2) V_t (\sigma_n \sigma_p)^{1/2} D_{it} \quad (3)$$

其中  $V_t$  为载流子热速度;  $\sigma_n$ 、 $\sigma_p$  分别为电子和空穴的俘获截面。可以看到,表面复合率与界面态密度成正比,器件的增益将随界面态密度的增加而下降,从而造成运放参数的退化。另外,根据 Sabnis 等人的研究结果<sup>[13]</sup>,界面态一般在 100 时开始退火,我们图 1~ 图 3 的实验结果也正反映了这一点。因此有理由认为电离辐照导致双极运算放大器的电参数退化和失效,主要是由于电离辐射感生界面态引起双极晶体管增益下降而造成的。

电离辐射在双极运算放大器的钝化层( $\text{SiO}_2$ 层)产生并积累的氧化物电荷将引起器件内部晶体管的表面反型,造成器件漏电流的增大。但在我们的实验结果中,随辐照总剂量的增加,OP-07 运放电源供应电流  $I_{ss}$  不但没有增大,反而有相当程度的减小,这一方面是由于氧化物电荷的积累与辐照偏置有很强的依赖关系,在零偏辐照下不足以引起晶体管表面的强反型。另一方面如上所述,电离辐射产生的复合中心和界面态,尤其是界面态,造成双极晶体管的电流增益减小,从而使整个电路的正常工作电流减小,引起电源电流  $I_{ss}$  减小。

通过以上的分析可以看出,在 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 和电子辐射环境中,造成 OP-07 运算放大器电路参数变化的主要机制是电离辐射感生的界面态,导致晶体管增益下降,从而造成电路的损伤。

对质子辐照来说,一般有两个重要的效应造成器件特性的退化。一是入射粒子与硅核碰撞,引起晶格中的原子位移,并产生大量空位,即在硅中产生大量的复合中心,也就是我们在前面提到的(体损伤)。有资料表明<sup>[14]</sup>,双极晶体管在质子辐照下,最重要的参数变化是由于位移损伤效应引起的共发射极电流增益  $I_c/I_b$  即  $h_{fe}$  的衰减,并且增益衰减满足关系式

$$1/h_{fe} = 1/h_{fe0} + k\Phi \quad (4)$$

这里  $1/h_{fe0}$  和  $1/h_{fe}$  分别表示辐照前后器件的电流增益倒数;  $K$  是复合位移损伤因子,  $K$  的值依赖于特定的粒子能量;  $\Phi$  是入射粒子注量。由(4)式可知,增益倒数  $1/h_{fe}$  与粒子注量成正比,即器件的电流增益随着质子能量的增大而不断减小。

另一方面,入射的质子在它们的入射轨迹上还会与硅材料中的原子和分子的束缚电子发生非弹性碰撞,并引起它们的电离和激发,其电离辐射效应与质子的能量密切相关。Brucker 等人的研究结果表明<sup>[15, 16]</sup>,由能量为 12MeV 以下质子产生的电离效应低于 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 射线的效应,而对质子能量高于 12MeV 时的电离效应则与 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 射线的等剂量的效应相当。由此可知,质子的辐照效应同时存在位移损伤和电离损伤二种作用。对运放电路来说,它所造成的损伤实际上是这二种效应的叠加,因此,这些综合的损伤因素反映在运放的电路中,必然引起各敏感参数相对较大的改变。

另外,我们的实验结果显示出质子的辐照损伤与能量有较强的依赖关系,即能量越大,损伤越大,这一方面是由于能量越大,造成的电离损伤越大,另一方面在相同总剂量条件下,质子的能量越大,它的累积注量相应也越大,而由(4)式可知,  $h_{fe}$  与  $\Phi$  成正比,二者综合的结

果, 必然会引起电参数相对较大的变化, 正如实验结果中所看到的那样

从图 5 还可看出, 质子辐照时 OP-07 运放电路的电源电流  $I_{ss}$  随辐照总剂量的增加而增大, 这与在  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  和电子辐照环境中  $I_{ss}$  随着总剂量增加而减小的现象不同, 这表明体损伤在质子辐照损伤中占有很重要的地位, 这也是质子辐照和  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  电子辐照损伤机制的最主要差异

## 5 结论

1.  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  电子和质子辐照都会使 OP-07 双极运算放大器的电参数产生明显的退化, 而质子的辐照损伤更为严重

2. 双极运算放大器在  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  和 1M eV、1.5M eV 电子辐照下的电离辐照响应特性和退火特性基本相似, 因此, 具有基本相同的电离辐照损伤机制

3. 电离辐照感生的界面态是导致  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  和电子辐射环境下双极运算放大器的电参数变化, 功能失效的最主要的原因

4. 双极运放电路的质子辐照效应必须同时考虑位移损伤和电离损伤两种因素, 而位移效应造成的体损伤在质子辐照损伤中占有很重要地位

5. 质子的辐照损伤与能量有较强的依赖关系, 在实验范围内, 能量越大, 损伤越大

## 参 考 文 献

- [ 1 ] L. J. Palkuti *et al* , IEEE Trans Nucl Sci , 1976, **23**(6): 1756
- [ 2 ] A. H. Johnnton IEEE Trans Nucl Sci , 1976, **23**(6): 1709
- [ 3 ] A. H. Johnnton IEEE Trans Nucl Sci , 1977, **24**(6): 2071
- [ 4 ] A. H. Johnnton *et al* , IEEE Trans Nucl Sci , 1979, **26**(6): 4769
- [ 5 ] V. Conditto *et al* , IEEE Trans Nucl Sci , 1981, **28**(6): 4325
- [ 6 ] John J. Panlos *et al* , IEEE Trans Nucl Sci , 1987, **34**(6): 1442
- [ 7 ] S. Me Clure *et al* , IEEE Trans Nucl Sci , 1994, **41**(6): 2544
- [ 8 ] 李星洪等编, 辐射防护基础, 原子能出版社, 1982 年版
- [ 9 ] A. H. Johnston *et al* , IEEE Trans Nucl Sci , 1987, **34**(6): 1474
- [ 10 ] T. P. Ma and Paul V. Dressendorfer JOHN W LEY & SONS, Inc , 1989, 52
- [ 11 ] E. H. Snow *et al* , Proc of the IEEE, 1967, **55**: 1168
- [ 12 ] M. W. Hillen *et al* , Solid-Stste Electronics, 1983, **26**: 453
- [ 13 ] T. P. Ma and Paul V. Dressendorfer JOHN W IIEY & SONS, Inc , 1989, 226
- [ 14 ] G. P. Summers *et al* , IEEE Trans Nucl Sci , 1987, **34**(6): 1134
- [ 15 ] R. W. Taion *et al* , IEEE Trans Nucl Sci , 1985, **33**(6): 4393
- [ 16 ] T. M. Oldham *et al* , IEEE Trans Nucl Sci , 1981, **28**(6): 3975

## Radiation Effects and Annealing Characteristics of Bipolar Operational Amplifiers

Lu Wu, Ren Diyuan, Guo Qi, Yu Xuefeng, Fan Long,  
Zhang Guoqiang, Yan Rongliang

(Xinjiang Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011)

Received 11 March 1997, revised manuscript received 15 May 1997

**Abstract** OP-07 bipolar operational amplifiers have been exposed to  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  ray, electrons and protons of various energy, and the annealing properties of the damage induced by the irradiation of  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  and electrons are measured at room temperature and 100 °C. Based on the results of these experiments, we discussed the mechanisms of damage of OP-07 induced by irradiation of different sources, the dependence of damage degree on proton energy and the difference of damages caused by  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  ray, electrons and protons.

**EEACC:** 1220, 2570, 2550A