

# 不同偏置下电流反馈运算放大器的电离辐射效应

王义元<sup>1,2,3</sup>, 陆 妩<sup>1,2</sup>, 任迪远<sup>1,2</sup>, 郑玉展<sup>1,2,3</sup>, 高 博<sup>1,2,3</sup>, 陈 睿<sup>1,2,3</sup>, 费武雄<sup>1,2,3</sup>

(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:**在不同偏置条件下,对基于互补双极工艺生产的电流反馈运算放大器(CFA)进行了高低剂量率下的电离辐射效应研究。研究发现,在不同偏置条件下,器件损伤差异明显。在零偏条件下,器件在低剂量率下损伤显著增强,表现为低剂量率损伤增强效应(ELDRS);在小工作电压下辐照时,器件损伤较小,且不同剂量率之间损伤差异不明显;而在大工作电压下辐照时,器件在高剂量率下的损伤明显大于低剂量率下的损伤,在随后的室温退火中,又恢复到与低剂量率损伤相当的程度,表现为时间相关效应。结果表明,双极器件是否具有 ELDRS 效应与实验偏置条件有重要关系。

**关键词:**电离辐射;电流反馈运算放大器;偏置;低剂量率损伤增强效应

**中图分类号:** TN431.1; O571.33

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-6931(2011)04-0461-06

## Ionizing Radiation Effect of Current-Feedback Amplifier Under Different Biases

WANG Yi-yuan<sup>1,2,3</sup>, LU Wu<sup>1,2</sup>, REN Di-yuan<sup>1,2</sup>, ZHENG Yu-zhan<sup>1,2,3</sup>,  
GAO Bo<sup>1,2,3</sup>, CHEN Rui<sup>1,2,3</sup>, FEI Wu-xiong<sup>1,2,3</sup>

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

2. Xinjiang Key Laboratory of Electronic Information Materials and Devices, Urumqi 830011, China;

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

**Abstract:** Current-feedback amplifier (CFA) based on the complementary bipolar processes was irradiated by <sup>60</sup>Co  $\gamma$  of low and high dose-rates under different biases. The damage varies with the biases and dose-rates. Irradiated with all pins grounded, the device gets more degradation at low dose rate than that at high dose rate. It exhibits enhanced low dose rate sensitivity (ELDRS). But the degradation is small under low supply voltage, and the difference between low and high dose-rates is not obvious. While under high supply voltage, the damage is severer at high dose rate than low dose rate, and it rebounds after irradiation annealing experiment, which is time-dependent effects. The ELDRS of bipolar device is related to the biases during the irradiation.

**Key words:** ionizing radiation; current-feedback amplifier; bias; enhanced low dose rate sensitivity

根据电路结构、工作模式的不同,运算放大器可分为电流反馈型和电压反馈型运算放大器。由于电流反馈运算放大器(CFA)理论上无限制的转换速率和闭环工作时具有与增益无关的带宽,在高速 A/D 和 D/A 转换器、数据采集、视频等高速航空航天电子系统中被广泛采用<sup>[1-3]</sup>。与通用电压反馈运算放大器(VFA)采用对称输入结构,通过两输入端的差值电压来控制输出电压不同,电流反馈运算放大器采用非对称输入结构,通过反向输入端的误差电流来控制输出电压。其工艺基于性能良好、匹配优良的互补双极工艺,采用全纵向 NPN 与 PNP 高性能晶体管来实现<sup>[1-3]</sup>。所以,随半导体工艺的不断进步,这种新型运算放大器得以实现。

然而,工作在空间辐射环境中的电子系统不可避免的要遭受电离辐射的影响,且电离辐射在氧化层中形成氧化物陷阱电荷和界面态共同作用于半导体器件,改变器件性能<sup>[4-6]</sup>。自双极器件的低剂量率损伤增强效应(ELDRS)发现以来,国内外对双极晶体管和通用电压反馈运算放大器进行了不同偏置、不同剂量率的电离辐射效应研究。结果显示,偏置条件对器件损伤程度有较大影响<sup>[4-7]</sup>,而其 ELDRS 则与晶体管隔离氧化层中较弱的电场有关<sup>[8-10]</sup>。所以,对双极电路的研究需关注偏置条件的变化。

由于氧化物陷阱电荷和界面态对 NPN 和 PNP 晶体管作用机制略有不同<sup>[7]</sup>,在相同总剂量下,电离辐射引起它们损伤蜕变程度不同,从而引起两者的匹配性能变差。这可能导致依赖其匹配性工作的 CFA 电路参数变差,甚至功能失效。而这些在 VFA 对称输入结构中却无需考虑。且由于 CFA 内部处理的是电流信号,不同于通用运算放大器的工作模式,在电离辐射环境下可能有新的变化特征。关于电流反馈运算放大器的电离辐射效应的报道鲜见文献,因此,有必要单独对其进行不同偏置、不同剂量率的电离辐射效应研究,为迫切需求的工程评估、考核应用提供指导。

## 1 实验样品和方法

### 1.1 实验样品和偏置条件

实验样品是以 CFA 的基本结构为基础,采

用氧化物隔离的互补双极工艺生产的高速电流反馈运算放大器。其工作电压较宽:±4.5 V~±18 V,推荐工作电压为±5 V 或±15 V。

辐照过程中运算放大器处于不同的偏置条件:零偏和加电工作偏置。零偏时器件所有管脚接地(记为 0 V),加电辐照偏置条件如图 1 所示。根据电源电压  $V_s$  的不同,加电模式又分为两组: $V_s=5$  V 偏压和  $V_s=15$  V 偏压。

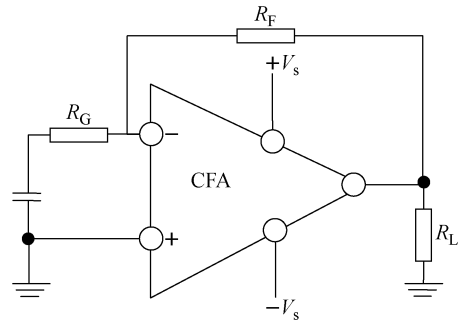


图 1 电流反馈放大器辐照偏置电路  
Fig. 1 Irradiation bias circuit for CFA

### 1.2 实验方法

辐照实验在中国科学院新疆理化技术研究所大、小<sup>60</sup>Co  $\gamma$  射线源上进行。分别采用实验室典型高剂量率 0.5 Gy(Si)/s 和与空间近似的低剂量率  $1.3 \times 10^{-4}$  Gy(Si)/s 辐照至  $1 \times 10^3$  Gy(Si) 的总剂量。辐照过程中,实验样品放置在根据美军标制作的铅铝屏蔽盒内,以消除低能散射的影响。考虑到低剂量率辐照时间较长,其辐照过程中有辐照损伤的退火现象,因此,高剂量率辐照后,进行相同偏置条件的室温退火,退火时间与低剂量率辐照时间相等。测试系统是根据电流反馈运算放大器电路特征而设计的一套由计算机控制、采集的电路测试系统,可精确地测试运算放大器的电源电流  $I_{cc}$ 、正负输入偏置电流( $I_{IB正}$ 、 $I_{IB负}$ )、输入失调电压  $V_{IO}$ 、共模抑制比  $K_{CMR}$  等各种静态参数。此外,还测试了电流反馈运算放大器特有参数开环跨阻  $T_z$ ,以评估其开环放大性能变化。辐照及退火实验均采用移位测试。

## 2 实验结果及分析

图 2 所示为不同条件下器件负偏置电流  $I_{IB负}$  随辐照总剂量及退火时间的变化关系。随

辐照剂量的积累,器件参数发生了不同程度的变化。然而,在高低剂量率下,不同偏置条件的辐照响应有很大差异。在高剂量率下辐照时,15 V 偏置条件下的变化最为严重;而在低剂量率下,0 V 偏置损伤较大;而无论高低剂量率,5 V 偏压下的辐照变化均较弱。对比不同偏置条件下的剂量率效应,发现不同偏置条件下的高低剂量率响应相差甚远。15 V 偏置时,高剂量率的损伤明显大于低剂量率下的辐射损伤。从图 2b 的退火曲线中可看出,随着退火时间的增加,器件负偏置电流  $I_{IB负}$  又恢复到初始值的范围,表现出时间相关效应(TDE)。而在 0 V

和5 V偏压下,低剂量率下的损伤较高剂量率下的大。高剂量率辐照后退火时,器件参数基本未发生变化,又表现为明显的低剂量率损伤增强效应。由图 2 还可看出,不同偏置下,器件参数变化方向也不一致,15 V 高剂量率下  $I_{IB负}$  在不断增加,在 800 Gy(Si)的测试点时就超出测试系统量程(图中虚线仅表示参数变化趋势)。而在其它辐照条件下,偏置电流在减小。图 3 所示为表征电流反馈放大器放大特性的开环跨阻增益的辐照和退火特征,其与偏置电流有类似的变化规律。不同的是,15 V 偏置下的变化幅度较其它两种偏置下的显著。

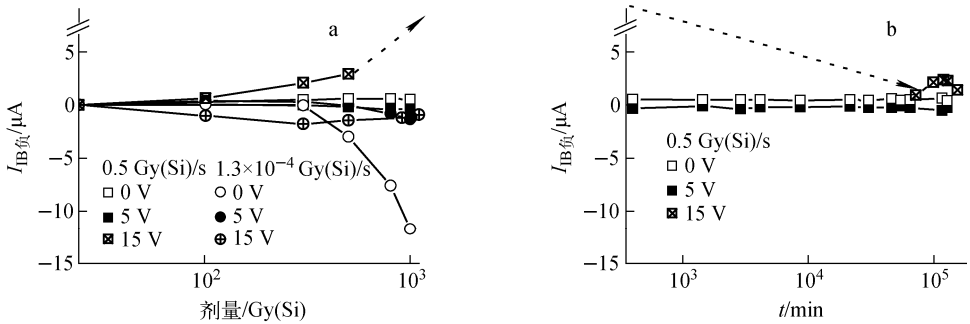


图 2 负偏置电流随辐照总剂量(a)及室温退火时间(b)的变化

Fig. 2  $I_{IB负}$  versus total dose (a) and room-temperature annealing time (b)  
负偏置电流已减去初始值

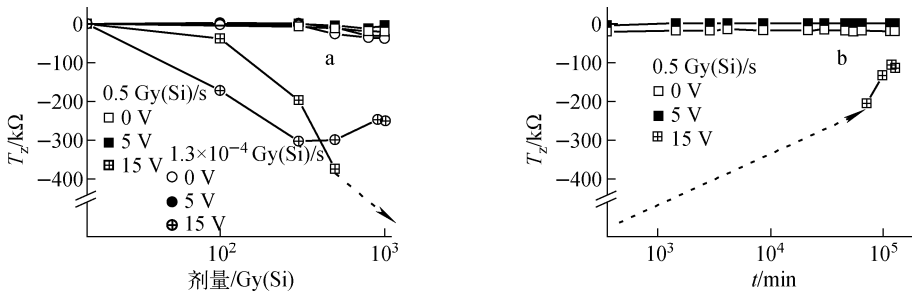


图 3 CFA 的开环跨阻  $T_z$  随辐照总剂量(a)及室温退火时间(b)的变化

Fig. 3  $T_z$  of CFA versus total dose (a) and room-temperature annealing time (b)  
 $T_z$  已减去初始值

图 4 所示为器件的失调电压在电离辐射环境中的变化情况。15 V 高剂量辐照时,  $V_{I0}$  变化较大,在 800 Gy(Si)时就超出测试范围。且随着室温退火时间的积累,  $V_{I0}$  又恢复到测试范围内,直到恢复至初始值左右。在其它偏置条件下辐照时,失调电压  $V_{I0}$  基本未发生变化,这与上述参数变化规律不同。分析电流反馈运算

放大器的失调电压发现,其主要包括由输入级 NPN 与 PNP 管  $V_{be}$  不同引起的输入失调电压  $V_{I0}$ ;其次,反相输入端偏置电流  $I_{IB负}$  和同相输入端偏置电流  $I_{IB正}$  引起的失调电压,其中,  $I_{IB负}$  引起的失调电压较  $I_{IB正}$  的大,其影响也最为严重<sup>[1-3]</sup>,因此,对  $V_{I0}$  的分析需结合这两个参数的变化来考虑。由图 2a 可看出,15 V 高剂量

率辐照时,器件的  $I_{\text{IB负}}$  变化较大,且是增加的趋势。而其他条件下,  $I_{\text{IB负}}$  是反向变化的趋势,且变化较小。因此,可认为在 15 V 高剂量率辐照时,  $I_{\text{IB负}}$  的变化对器件失调电压具有较大影响,使其发生较大变化。在其他辐射条件下,因  $I_{\text{IB负}}$  的反向变化趋势较小,其引起的失调电压

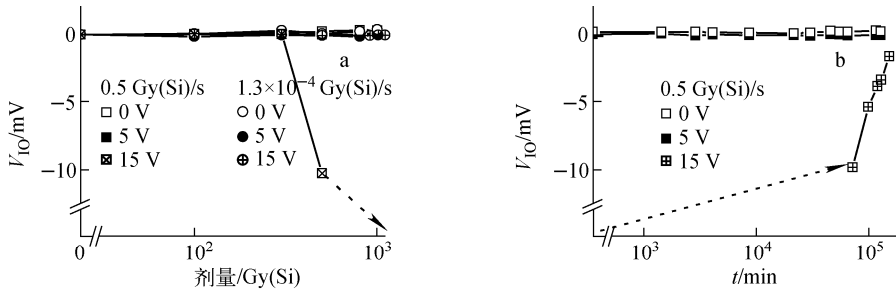


图4 失调电压随辐照总剂量(a)及室温退火时间(b)的变化

Fig. 4  $V_{10}$  versus total dose (a) and room-temperature annealing time (b)

失调电压已减去初始值

### 3 讨论

研究表明,电离辐射在氧化层中形成的氧化物陷阱电荷  $N_{\text{ot}}$  和界面态  $N_{\text{it}}$  共同作用于半导体器件,影响着电路性能。然而,它们的退火性质不同,氧化物陷阱电荷退火温度较低,在室温下会有大量退火;而界面态退火温度较高,在 100 °C 以上高温才会导致界面态的大量退火<sup>[11]</sup>。因此,从退火特性中可分析出是哪一种因素在影响器件性能。由图 2b 和图 4b 的退火曲线发现,在 0 V 和 5 V 偏压下的辐照和退火过程中,器件参数变化较小,且在整个退火过程中未发生较大变化。这说明此时界面态作为主要因素影响器件参数变化。而在 15 V 偏置条件下,虽然辐照过程中变化较大,但在室温退火时,又恢复到与其它两种偏置损伤相当的程度。这表明,此时氧化物陷阱电荷显著增加而引起器件参数损伤更加明显,而界面态未显著增加。导致此类结果的原因是不同偏置条件使氧化物中电场发生改变,从而使氧化层中形成的氧化物陷阱电荷数量不同,使其表现出不同的损伤情况:15 V 偏置时,  $N_{\text{ot}}$  占主导,由于低剂量率下  $N_{\text{ot}}$  的退火效应,而表现出 TDE;5 V 和 0 V 偏压时,  $N_{\text{it}}$  占主导,低剂量率辐照时  $N_{\text{it}}$  增加,而表现出 ELDRS。电流反馈运算放大器反向输入端由两个匹配的互补晶体管组成,而负输

的变化与由 NPN 与 PNP 管  $V_{\text{be}}$  变化所引起失调电压的变化相抵消,使得  $V_{10}$  保持基本不变。最终形成失调电压  $V_{10}$  与器件偏置电流变化相关(图 4),在 15 V 高剂量率下的损伤明显增大,而其他偏置条件下基本不变。

入偏置电流的变化则是由此晶体管特征参数的蜕变及其之间匹配失衡引起。以下结合负偏置电流的影响因素及氧化物陷阱电荷和界面态的对器件损伤影响规律对实验结果进行讨论。

#### 3.1 偏置的影响

在基射结上施加正向偏置电压时,在氧化层中存在两种类型的电场。1) 边缘电场,在 PN 结附近由于电子空穴的扩散和复合,形成空间电荷区,产生内建电势差,内建电势差将在其 PN 结上方氧化层中形成由 N 型区指向 P 型区的边缘电场<sup>[5,7]</sup>。2) 外加电场,由于金属电极与屏蔽氧化层接触,当在 PN 结上施加外加电压时,电压也施加到氧化物两边,所以,正偏压下形成由 P 区表面指向 N 区表面的外加电场。

当外加电压改变时,氧化层中两种电场同时发生变化。而氧化层中电场的变化将严重影响辐射产生电子-空穴对的初始复合速率,从而影响界面态和氧化物陷阱电荷的产额<sup>[12]</sup>。在 0 V 偏压状态下,晶体管氧化层中只有电场强度较弱的边缘电场。因此,在低电场的电离辐射环境中,双极器件氧化层内电离辐射产生的电子空穴对大部分又很快复合,而部分逃脱初始复合的空穴被俘获,形成氧化物正陷阱电荷,另有少量空穴在电场作用下漂移到界面处形成

界面态。当在晶体管中施加小的正偏压时,一方面形成与边缘电场方向相反的外加电场,另一方面减小了器件的内建电势差,从而减弱了边缘电场的强度<sup>[7]</sup>。两者同时作用在氧化层中,使氧化层内的电场减弱,产生的氧化物陷阱电荷也将更少,而形成 5 V 偏压下的损伤较 0 V 偏压下的小。而随着正偏压增大,边缘电场将进一步减弱,外加电场则进一步增大。最后在氧化层中形成与零偏时方向相反、电场强度较大的外加电场。外加电场的增加,加速电子漂移速度,减小其初始复合,使氧化物中形成的氧化物陷阱电荷显著增多,导致在 15 V 偏置条件下氧化物陷阱电荷占主导的损伤模式。

### 3.2 剂量率的影响

在双极电路中,当氧化物陷阱电荷占主导作用时,电路表现出时间相关效应;界面态多于氧化物陷阱电荷时,则可能表现出 ELDRS 效应<sup>[13]</sup>。因此,相对于其它两种偏置条件,15 V 偏置条件下形成的氧化物陷阱电荷较多,对器件的损伤占主导作用。而在低剂量率辐照时,一方面电子-空穴对的产生率低,形成的氧化物陷阱电荷少;另一方面其在相当长的实验过程中,也发生退火效应,所以,在总剂量达到一定程度时,损伤不增反降,最终导致 15 V 低剂量率辐照时的损伤比高剂量率明显减小,形成图 2、3 所示的低剂量率下总剂量达到 500 Gy(Si)后开始回漂,表现出明显的时间相关效应。

而在 0 V 和 5 V 偏置条件下,形成的氧化物陷阱电荷较少,而使界面态多于氧化物陷阱电荷。根据空间电荷模型<sup>[8-10,13]</sup>可知,由于高低剂量率下形成的空间电场不同,使器件在低剂量率下产生界面态显著增多,从而导致 0 V 和 5 V 偏置下低剂量率损伤增强效应。

另外,对于实验用的电流反馈运算放大器,其工作性能的实现得益于全对称互补双极工艺,对内部工作 NPN 和 PNP 晶体管的匹配性能要求较高<sup>[1-3]</sup>。因此,当电离辐射引起两种晶体管发生不对称变化时,将破坏电路的对称性,影响器件参数及性能。界面态和氧化物陷阱电荷对 NPN 和 PNP 的影响不同<sup>[7-9]</sup>。界面态对两种晶体管影响作用是一致的,而氧化物陷阱电荷的影响却相反。NPN 晶体管损伤随氧化物陷阱电荷的增加而增大,PNP 晶体管损伤却

随氧化物陷阱电荷的增加而减小<sup>[7]</sup>。因此,当零偏辐照时,形成的界面态占主导地位,PNP 和 NPN 晶体管损伤随界面态的增加而增大,两者的损伤差别不大。在 15 V 偏置条件时,氧化物陷阱电荷的显著增加,可能使 NPN 的损伤明显大于 PNP 的,破坏电路中两种晶体管的匹配关系,使器件参数发生变化。而输入端 PNP 和 NPN 晶体管的匹配关系,则决定了偏置电流的变化方向,当输入端 NPN 晶体管损伤明显大于 PNP 的损伤时,可能导致其显著增加,反之,则减小。

### 3.3 电路的影响

对于集成电路的损伤变化,不但要考虑其内部单管的损伤,也要考虑到电路中隔离结构的电离损伤。实验器件采用氧化物隔离,其不同电场下也会形成不同的电离辐射响应,从而对晶体管之间的隔离性能产生影响,甚至影响整个电路的特征参数。且电路在设计时对内部各单管均有严格要求,电路参数的变化可能与内部单管的变化不成比例。

## 4 结论

通过对基于互补双极工艺生产的电流反馈运算放大器在不同偏置条件下的高低剂量率的电离辐射效应研究发现,辐照偏置及剂量率均对电离辐射效应有影响。零偏辐照时,器件表现出剂量率效应,具有 ELDRS;而大工作电压偏置辐照时,器件又表现出时间相关效应;小工作电压辐照时,不同剂量率下的损伤较小。因此,双极器件的 ELDRS 与电场有密切关系,在工程应用考核中,对这种辐照条件依赖性要给予重视,根据需要合理选择实验考核条件。

不同偏置下的电离辐照及退火实验表明了氧化物陷阱电荷的产生随偏置条件的不同而变化。且由于氧化物陷阱电荷对 NPN 和 PNP 晶体管的影响不同,使两者产生损伤差异,破坏他们的对称匹配性能,从而导致依赖于这种匹配关系来实现的 CFA 电参数的严重蜕变。

### 参考文献:

- [1] BRANDENBURG D. Current vs voltage feedback amplifiers[R]. [S. l.]: National Semiconductor, 1998.

- [2] 周跃庆,赵玉山. 电流反馈运算放大器电路与性能综述[J]. 微电子学,1995,25(6):15-20.  
ZHOU Yueqing, ZHAO Yushan. Current feedback operational amplifiers: The circuitry and performance[J]. Microelectronics, 1995, 25(6): 15-20(in Chinese).
- [3] FRANCO S. Analytical foundations of current-feedback amplifier[C]. Chicago: IEEE, 1993: 1 050-1 053.
- [4] McCLURE S S, GORELICK J L, YUI C C, et al. Continuing evaluation of bipolar linear devices for total dose bias dependency and ELDRS effects [C]// 2003 IEEE Radiation Effects Data Workshop Record. USA: IEEE, 2003: 1-5.
- [5] NOWLIN R N, ENLOW E W, SCHRIMPF R D, et al. Trends in total-dose response of modern bipolar transistors [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1992, 39(6): 2 026-2 035.
- [6] 任迪远,陆妩,余学锋,等. 双极器件和电路的不同剂量率的辐射效应研究[J]. 固体电子学研究进展,2006,26(4):471-476.  
REN Diyuan, LU Wu, YU Xuefeng, et al. The radiation effects of the bipolar liner circuits and devices for high and low dose rate total dose irradiations[J]. Research & Progress of SSE, 2006, 26(4): 471-476(in Chinese).
- [7] PERSHENKOV 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): 1 840-1 848.
- [8] 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): 2 339-2 351.
- [9] FLEETWOOD D M, KOSIER S L, NOWLIN R N, et al. Physical mechanisms contributing to enhanced bipolar gain degradation at low dose rates[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1994, 41(6): 1 871-1 883.
- [10] RASHKEEV S C, SCHRIMPF R D, FLEETWOOD D M, et al. Physical mode for enhanced interface-trap formation at low dose rates [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2002, 49(6): 2 650-2 655.
- [11] BOCH J, SANGNE F, SCHRIMPF R D, et al. Elevated temperature irradiation at high dose rate of commercial linear bipolar ICs[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2004, 51(5): 2 903-2 907.
- [12] BOCH J, SAIGNE F, SCHRIMPF R D, et al. Physical model for the low-dose-rate effect in bipolar devices[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2006, 53(6): 3 655-3 660.
- [13] 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).