材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022101102

星载高速跨阻放大器电离总剂量效应研究

吕宗璟[1*]，陈彦丽[1]，李海涛[1]，刘　霄[1]，
盛　亮[1,2]，翁秀峰[1,2]，杨少华[1,2]，阮林波[1,2]
（1. 西北核技术研究所，西安 710024；2. 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室，西安 710024）

摘　要： 为得到卫星搭载的高速跨阻运算放大器在星载环境中长时间工作后的性能变化情况，对3款增益带宽积大于1 GHz的高速跨阻放大器芯片关键特征参数的电离总剂量损伤特性及变化规律进行了试验研究。辐照试验在^{60}Co γ射线源上采用高温加速评估的方法完成，辐照到放大器芯片上的剂量率为0.3～0.5 Gy(Si)/s。分析了放大器芯片输出偏置、输出噪声和带宽等关键电参数在辐照前后及高温(85 ℃±6 ℃)退火前后的特性，讨论了引起电参数变化的机理。结果表明，经过两轮150 Gy(Si)剂量辐照及高温退火后，放大器芯片的输出偏置和输出噪声水平无明显变化，时域脉冲响应正常，－3 dB带宽减小了3%左右。带宽为3款高速跨阻放大器芯片的辐射敏感参数，其变化与电离辐射在SiO_2/Si界面引起正电荷建立和界面态直接相关。辐照后的芯片仍然能够满足高带宽测试情况下的需求，150 Gy(Si)为电参数和功能合格的累积剂量。

关键词： 高速运算放大器；卫星载荷；^{60}Co γ辐照；电离总剂量效应
中图分类号： TP342＋.1　**文章编号：** 1001－5868(2023)01－0070－06

Impact of TID on High-Speed Operational Transimpedance Amplifier on Satellite

LV Zongjing[1], CHEN Yanli[1], LI Haitao[1], LIU Xiao[1],
SHENG Liang[1,2], WENG Xiufeng[1,2], YANG Shaohua[1,2], RUAN Linbo[1,2]
(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, CHN;
2. State Key Laboratory of Simulation and Effect for Intense Pulse Radiation, Xi'an 710024, CHN)

Abstract: In order to obtain the performance changes of the satellite-borne high-speed operational transimpedance amplifiers after a long period of operation in the on-board environment, experimental studies were conducted on the ionization total dose damage characteristics and change patterns of key characteristic parameters of three high-speed operational transimpedance amplifier chips with a gain bandwidth product greater than 1 GHz. The irradiation tests were completed using high temperature accelerated evaluation on a ^{60}Co γ-ray source at a dose rate of 0.3～0.5 Gy(Si)/s to the amplifier chip. The characteristics of key electrical parameters such as output bias, output noise and bandwidth of the amplifier chip before and after irradiation and before and after annealing at high temperature (85 ℃ ± 6 ℃) were analysed after the tests, and the mechanisms causing the changes in the electrical parameters were discussed. The results show that after two rounds of 150 Gy(Si) dose irradiation and high temperature annealing, the output bias and output noise level of the amplifier chip do not change significantly, the time domain impulse response was normal and the －3 dB bandwidth was reduced by about 3%. Bandwidth is a radiation-sensitive parameter for the three high-speed operational transimpedance amplifier chips, and its variation is directly related to the positive charge

收稿日期：2022－10－11.
*通信作者：吕宗璟　E-mail：lvzongjing@163.com

build-up and interfacial state induced by ionising radiation at the SiO_2/Si interface. The irradiated chip is still capable of meeting the demands of high bandwidth test situations, with 150 Gy(Si) being the cumulative dose for electrical parameters and functional qualification.

Key words: high speed operational amplifier; spacecraft payload; ^{60}Co γ irradiation; TID (total ionizing dose)

0　引言

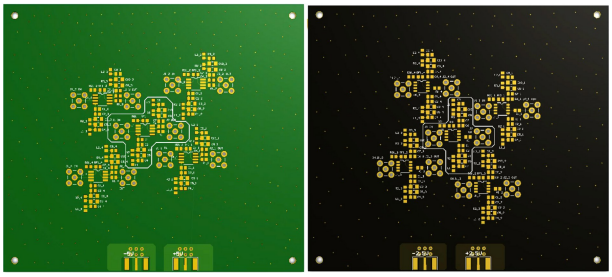
得益于外太空航天技术等领域的迅速发展，越来越多的半导体器件和集成电路能够作为载荷在卫星中工作。这些高性能电子元器件可能承担着粒子观测、辐射监测、图像获取以及潜在的核爆探测等多种任务[1-4]。电子元器件在空间辐射环境中工作时，必然受到空间辐射环境的影响。随着电子元器件工作时间的增加，这种影响随之增强，器件的可靠性不断下降。为保证电子器件在辐射环境下可靠工作，对电子元器件在卫星搭载环境中的辐照损伤特性进行研究是十分必要的。

运算放大器作为一种基本的线性电路在空间系统中得到广泛运用。近年来，国内外针对运算放大器在不同辐射环境，不同温度或不同剂量率下的变化规律与损伤特性已进行了较多研究[5-12]，但很多工作仅局限于增益带宽积(GBW)小于 1 GHz 的低速运算放大器上。跨阻运算放大器作为电子学系统中的第一级，其特性会严重影响整个电子学系统的性能。在粒子观测、辐射监测、图像获取以及潜在的核爆探测等多种测试任务中，信号可能具有较高的频率成分，这对测试系统带宽提出了很高的要求。因此，对于运算放大器辐射损伤特性的研究不能仅局限于低速运算放大器上，对高速跨阻运算放大器的电离总剂量损伤特性进行研究是十分必要的。

为获得高速运算放大器在卫星搭载环境中的抗辐射能力，本工作以包含双极型晶体管的 3 款 GBW 大于 1 GHz 的商用高速运算放大器为研究对象，在^{60}Co γ 辐照条件下，对其电离总剂量效应展开试验与理论研究。通过试验明确带宽、噪声、偏置等参数的变化规律，并探讨了电参数衰变的损伤机理。

1　试验方法

试验样品为相同批次的 3 款放大器芯片 op-amp-A，op-amp-B 和 op-amp-C，负输入连接输出形成负反馈状态焊接在试验 PCB 板上，其中所选用的 op-amp-A 和 op-amp-C 引脚定义一致，可焊接在同一种试验 PCB 板上。试验 PCB 板如图 1 所示，每种试验 PCB 板上均焊接 5 片放大器芯片，放大器芯片编号为 0＃～4＃。试验采用的 3 款放大器芯片均包含双极型晶体管，需进行加速退火试验，以判断时变效应(Time Dependence Effects，TDE)的影响。辐照及退火期间，采用直流电源进行±5 V(op-amp-A，op-amp-C)或者±2.5 V(op-amp-B)供电。



(a) op-amp-A 和 op-amp-C　　(b) op-amp-B

图 1　试验 PCB 板

电测采用移位测试。低速运算放大器常采用集成运放测试仪测量输入失调电压(V_{OS})、正负输入偏置电流(±I_B)、共模抑制比(*CMRR*)、开环增益(A_{OL})、电源电压抑制比(±*PSRR*)以及正负电源电流(±I_{SS})等电参数。对于高速运算放大器，集成运放测试仪的测量结果并不准确。运放输入失调电压、正负输入端的输入偏置电流、输入失调电流都以直流量形式存在，三者共同作用会影响运放的输出失调电压，正负输入端的电压噪声和电流噪声会影响运放输出噪声，传输带宽等决定了响应速度。偏置、噪声和带宽能够从外部直观反应放大器芯片的性能。因此，针对试验用的 3 款高速运算放大器，测试其辐照前后及退火前后测量放大器芯片空载输出电压的平均值和 rms 值、放大器芯片的 Bode 图、放大器芯片的输出脉冲波形响应，据此得到运算放大器辐照前后及退火前后的偏置、噪声、带宽等性能参数变化情况。本次试验由信号发生器提供输入信号至运算放大器，依次采用示波器测量放大器芯片的空载输出、带载输出等，采用网络分析仪测量放大器芯片的 Bode 图。

试验样品均包含双极型晶体管，需考虑低剂量

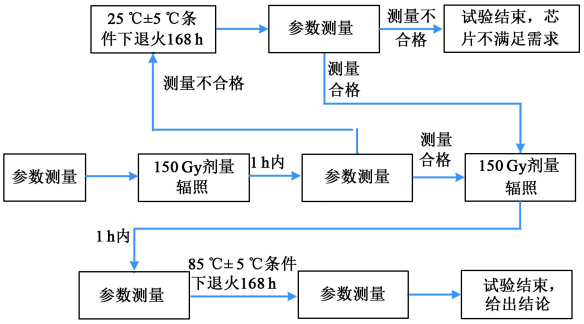


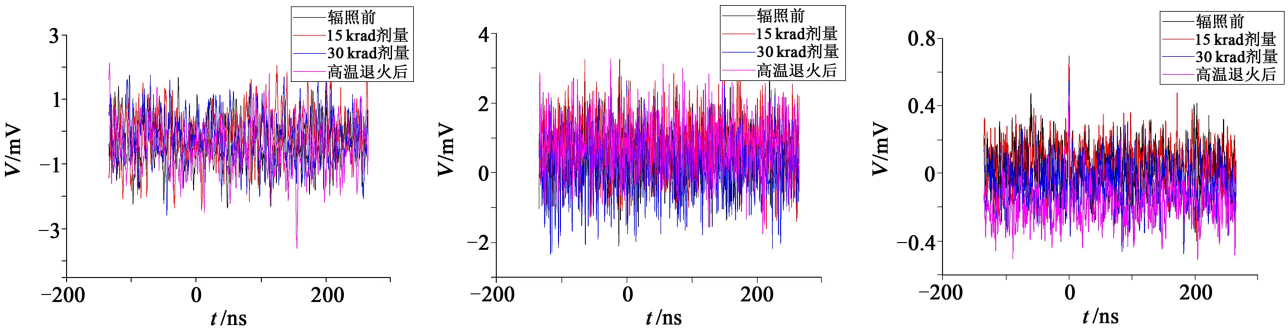
图 2 试验流程及试验条件

率增强效应的影响。为克服采用太空中低剂量率考核电子元器件时间较长的问题，采用高温加速的方法进行评估。电参数的测量都是在室温下(24 ℃±6 ℃)进行的，每次电参数的测量都在辐照或退火后1 h内完成。共进行两轮辐照，每轮辐照的总剂量为150 Gy(Si)。根据有关航天部门的抗辐射加固相关要求，综合考虑空间辐射环境与卫星蒙皮的影响，选用元器件应满足总剂量指标不小于150 Gy(Si)的要求。考虑到商用运算放大器芯片的工作温度，第2轮辐照完成后进行85 ℃±6 ℃条件下168 h退火的高温加速评估，退火完成后测量芯片参数。辐照试验在西北核技术研究所的^{60}Co γ射线源上完成，辐照到放大器芯片上的剂量率为0.3～0.5 Gy(Si)/s。

2 试验结果

每款放大器芯片得到5组实验结果，5组结果之间无明显差异，选取3块试验板上编号为0#的放大器芯片测试结果进行说明。

图3为3款放大器芯片辐照前后及退火前后的零输入输出电压。



(a) op-amp-A (b) op-amp-B (c) op-amp-C

图3 辐照前后及退火前后的零输入输出电压

经计算，3款放大器芯片的输出电压平均值和rms值如表1，2所示。输出电压平均值表征放大器芯片输出偏置，输出电压rms值表征放大器芯片输出噪声水平。

表1 三种放大器芯片输出电压平均值

芯片	$V_{辐照前}$/mV	$V_{15\ krad}$/mV	$V_{30\ krad}$/mV	$V_{高温退火}$/mV
op-amp-A	−0.40	−0.056	−0.17	−0.53
op-amp-B	0.53	0.74	0.11	0.78
op-amp-C	0.030	0.062	−0.054	−0.17

表2 三种放大器芯片输出电压rms值

芯片	$V_{辐照前}$/mV	$V_{15\ krad}$/mV	$V_{30\ krad}$/mV	$V_{高温退火}$/mV
op-amp-A	0.69	0.74	0.73	0.73
op-amp-B	0.74	0.80	0.80	0.75
op-amp-C	0.13	0.13	0.12	0.12

由表可知，3款放大器芯片输出偏置变化均小于1 mV，输出噪声水平无明显变化。辐照对放大器芯片输出偏置和输出噪声水平的影响在可接受范围内。

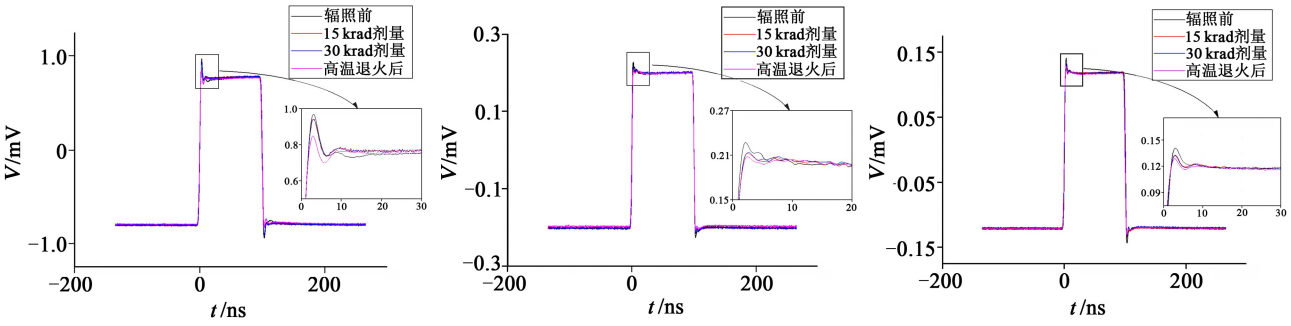
图4为3款放大器芯片辐照前后及退火前后的脉冲响应。

由图可知，波形上升时间T_r(10%～90%)无变化，仍然为3.3 ns。前后沿过冲明显减小，放大器芯片的高频响应发生变化，可以结合Bode图进一步分析。

图5为3款放大器芯片辐照前后及退火前后的Bode图。

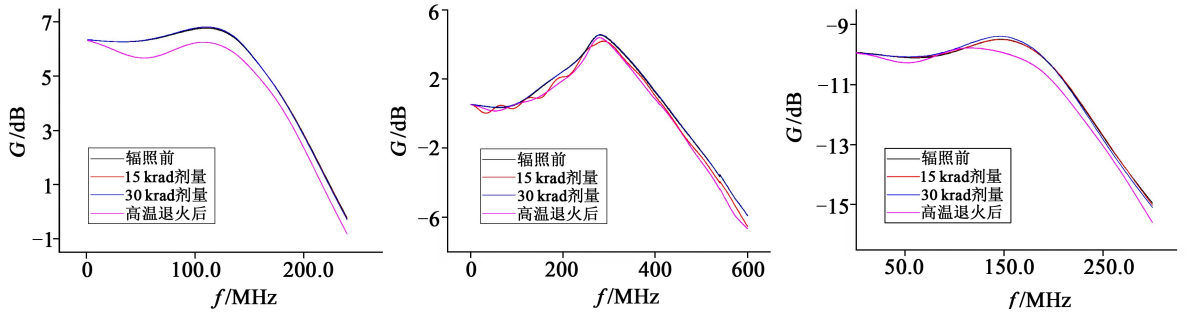
辐照前后及退火前后，3种放大器芯片的−3 dB带宽如表3所示。

由表可知，3种放大器芯片的高频响应变化明显，与时域脉冲响应过冲减小相对应。辐照前后及退火前后，op-amp-A的−3 dB带宽辐射诱发变化为3.11%，op-amp-B的−3 dB带宽辐射诱发变化为3.35%，op-amp-C的−3 dB带宽辐射诱发变化为2.36%，电参数经辐射诱发变化后仍然能够满足高带宽测试情况下的需求。



(a) op-amp-A　　(b) op-amp-B　　(c) op-amp-C

图 4　辐照前后及退火前后的脉冲响应



(a) op-amp-A　　(b) op-amp-B　　(c) op-amp-C

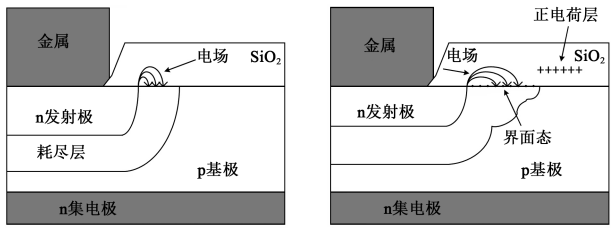
图 5　辐照前后及退火前后的 Bode 图

表 3　三种放大器芯片−3 dB 带宽

芯片	$V_{辐照前}$/MHz	$V_{15\ krad}$/MHz	$V_{30\ krad}$/MHz	$V_{高温退火}$/MHz
op-amp-A	193	193	193	187
op-amp-B	508	499	508	491
op-amp-C	254	254	253	248

3　讨论

试验采用的 3 款放大器芯片均包含双极型晶体管，且输入级均为场效应管[13-15]。双极晶体管采用 SiO_2 钝化层保护器件表面，从而形成 Si-SiO_2 界面，硅栅以及金属栅 MOS 器件在栅与衬底间均有一层 50～200 nm 的 SiO_2 介质，因此也会形成 Si-SiO_2 界面。根据以往对氧化物电荷和界面态退火特性的研究结果可知，影响芯片退化的主要因素是电离在 Si-SiO_2 界面感生的界面态和正电荷层引起的[16]。^{60}Co γ 射线辐射对放大器芯片产生的损伤主要是电离损伤[10-11]。电离辐射会在晶体管或 MOS 管的 SiO_2 介质中产生电子-空穴对，大部分空穴在电场作用下向 Si-SiO_2 界面输运，界面附近会形成正电荷层，从而改变 Si-SiO_2 界面势位。电离辐射在 Si-SiO_2 界面 SiO_2 一侧约 0.5 nm 的范围内引起的部分 SiO_2 价键断裂，以及电离空穴到达界面引起的相互作用，均可产生随机分布的 3 价硅原子，这就破坏了硅晶格势场的周期性，将硅导带、价带中的部分能带扰动至禁带中，从而在界面处引入界面态。从试验结果可知，正电荷层与界面态会导致与频率特性有关的电学参数退化。



(a) 未辐照　　(b) 辐照后

图 6　总剂量效应造成的 NPN 晶体管电荷累积示意图

3.1　总剂量效应对带宽的影响

典型的运算放大器为输入级、中间级和输出级组成的三级结构，如图 7 所示，其中 I_{BQ} 为直流偏置电流。为保证放大器芯片在频域上的稳定性，中间级两端通常并联一个补偿电容 C_x，此时放大器芯片的频率特性主要取决于输入级和补偿电容 C_x[17]。

大多数运算放大器的频率响应都只具有一个极点，式(1)描述了单极运算放大器的开环频率响应。

$$A(f)=\frac{A_0}{1+\mathrm{j}\dfrac{f}{f_{CA}}} \tag{1}$$

其中，A_0 为直流增益，f_{CA} 为−3 dB 截止频率。运

算放大器的闭环增益同样具有直流增益 G_O 和 −3 dB 截止频率 f_{CG}，且 $G_O \times f_{CG} = A_O \times f_{CA} = f_u$，其中 f_u 为运算放大器的增益带宽积。对于典型的运算放大器，式(2)描述了其增益带宽积 f_u，直流偏置电流 I_{BQ} 和补偿电容 C_x 之间的关系。

$$f_u = \frac{I_Q}{4\pi V_T C_x} \tag{2}$$

压摆率 S_R 描述了输出信号改变的最大速率，其受限于输入级为补偿电容 C_x 充电的最大充电电流。补偿电容 C_x 通过直流偏置电流 I_{BQ} 实现充放电，因此压摆率等于式(3)描述的比例关系。

$$S_R = \frac{I_Q}{C_x} \tag{3}$$

综上所述，开环增益特性曲线 $A(f)$，闭环增益特性曲线 $G(f)$，压摆率 S_R 和增益带宽积 f_u 等与频率特性有关的电参数与直流偏置电流 I_{BQ} 相关联。

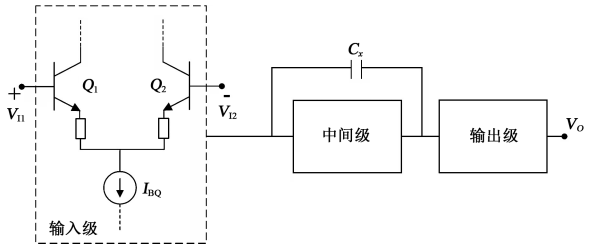


图 7 典型运算放大器的三级结构

电离辐射在晶体管和 MOS 管 Si-SiO_2 界面引起正电荷建立和界面态，使表面势位增加，从而引起直流偏置电流 I_{BQ} 的变化，进而导致电参数发生变化。在高温退火阶段，由图 5 可知，放大器芯片表现出明显的退火现象。图 5 中放大器芯片 Bode 图的变化，主要是开环增益下降导致的。参考文献[18, 19]表明直流偏置电流 I_{BQ} 和电流增益 h_{FE} 相关联，二者为反比关系。放大器芯片开环增益与晶体管和 MOS 管增益成正比关系，晶体管和 MOS 管增益下降直接导致放大器芯片开环增益的退化，且开环增益下降越大，Bode 图变化越显著，试验电路带宽减小越明显。图 4 中辐照前后及退火前后的脉冲响应进一步佐证了这一点。开环增益特性曲线 $A(f)$，闭环增益特性曲线 $G(f)$，压摆率 S_R 和增益带宽积 f_u 等与频率特性有关的电参数是辐射敏感参数。

3.2 总剂量效应对偏置和噪声的影响

许多研究表明[17,20]，放大器芯片的输入失调电压(V_{OS})、输入失调电流(I_{OS})和正负输入偏置电流($\pm I_B$)与直流偏置电流 I_{BQ} 相关，因而是电离总剂量效应的辐射敏感参数。$\pm I_B$ 是总剂量效应的增函数，V_{OS} 和 I_{OS} 可增可减，三者都以直流量形式存在，共同作用会影响放大器的输出失调电压。失调的根源在于运算放大器内部的电路结构以及非对称性，为衡量辐照对放大器芯片固有非对称性的影响，对相关参数进行了测量。由图 3 辐照前后及退火前后的零输入输出电压可以看出，放大器芯片输出偏置无明显变化，说明 3 款放大器芯片输出失调电压对 150 Gy(Si)剂量辐照不敏感。

输出噪声水平反映了运算放大器测量微弱信号的准确程度，试验对放大器芯片零输入输出噪声进行了测量，结果表明，电离辐射在 Si-SiO_2 界面形成的正电荷层以及引入的界面态对放大器芯片的噪声水平无明显影响。

4 结论

本文以包含双极型晶体管的 3 款 GBW 大于 1 GHz 的商用高速运算放大器为研究对象，对其关键特征参数的电离总剂量损伤特性及变化规律进行了试验研究，并得到如下结论：

(1)与运算放大器频率特性有关的电参数是辐射敏感参数，经过两轮 150 Gy(Si)剂量辐照及高温退火后，试验电路的−3 dB 带宽减小了 3%左右；

(2)放大器芯片的输入失调电压(V_{OS})、输入失调电流(I_{OS})和正负输入偏置电流($\pm I_B$)会影响其输出失调电压。总体来看，放大器芯片的输出失调电压对 150 Gy(Si)剂量辐照不敏感；

(3)经过两轮 150 Gy(Si)剂量辐照及高温退火后，放大器芯片的输出噪声水平无明显变化。

综上所述，辐照后的芯片仍然能够满足高带宽测试项目的需求，150 Gy(Si)为电参数和功能合格的累积剂量。

参考文献：

[1] Tae H W. Anti-nuclear terrorism modeling using a flying robot as drone's behaviors by global positioning system (GPS), detector, and camera[J]. Annals of Nuclear Energy, 2018, 118: 392-399.

[2] 王馨悦，荆 涛，张珅毅，等. “嫦娥一号”卫星太阳高能粒子探测器的首次观测结果[J]. 地球物理学进展，2012，27(6)：2289-2295.
Wang X Y, Jing T, Zhang S Y, et al. The first results of Chang'e-1 high energetic particles detector[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(6): 2289-2295.

[3] Carlos G, Stepan P, Zdenek V, et al. The SATRAM Timepix

spacecraft payload in open space on board the Proba-V satellite for wide range radiation monitoring in LEO orbit [J]. Planetary and Space Science, 2016, 125: 114-129.

[4] 王春琴，孙越强，张珅毅，等. FY2G 卫星新一代高能带电粒子探测器观测数据分析[J]. 地球物理学报，2016，59(9)：3148-3158.
Wang C Q, Sun Y Q, Zhang S Y, et al. Energetic particle observations on board the FY2G satellite[J]. Chinese J. of Geophysics, 2016, 59(9): 3148-3158.

[5] Petrov A S, Tapero K I, Ulimov V N, et al. Impact of elevated temperature applied during low dose rate irradiation on the degradation of BiCMOS operational amplifiers [J]. Microelectronics Reliability, 2018, 88(90): 961-964.

[6] Liu Y, Chen W, Yang S C, et al. Synergistic effect of mixed neutron and gamma irradiation in bipolar operational amplifier OP07 [J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A, 2016, 831: 334-338.

[7] Li R B, Wang G Z, Chen W, et al. Impact of TID on response to pulsed X-ray irradiation in the bipolar operational amplifier [J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58: 390-396.

[8] 姜　柯，陆　妩，马武英，等. 质子辐射环境下 PNP 输入双极运算放大器辐照效应与退火特性[J]. 原子能科学技术，2015，49(11)：2087-2092.
Jiang K, Lu W, Ma W Y, et al. Irradiation effect and annealing character of PNP input bipolar operational amplifier in proton radiation environment [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(11): 2087-2092.

[9] 胡天乐，陆　妩，何承发，等. 双极运算放大器在不同电子能量下的辐射效应和退火特性[J]. 原子能科学技术，2013，47(4)：657-663.
Hu T L, Lu W, He C F, et al. Irradiation effects of different energy electrons and annealing characteristics on operational amplifier[J]. Atomic Energy Science and Technol., 2013, 47(4): 657-663.

[10] 马　强，范如玉，陈　伟，等. 双极型运算放大器瞬时电离辐射效应实验研究[J]. 原子能科学技术，2013，47(6)：1064-1069.
Ma Q, Fan R Y, Chen W, et al. Experimental study of transient ionizing radiation effects in bipolar operational amplifier[J]. Atomic Energy Science and Technol., 2013, 47(6): 1064-1069.

[11] 马　强，林东生，金晓明，等. 基于正交设计的 BiMOS 运算放大器瞬时电离辐射效应影响因素分析[J]. 原子能科学技术，2012，46(增刊)：592-597.
Ma Q, Lin D S, Jin X M, et al. Analysis of affecting factors of transient ionizing radiation effects on BiCOM Op-amp by orthogonal design[J]. Atomic Energy Science and Technol., 2012, 46(Suppl.): 592-597.

[12] 许发月，陆　妩，王义元，等. PNP 输入双极运算放大器的辐射效应[J]. 原子能科学技术，2012，46(2)：229-233.
Xu F Y, Lu W, Wang Y Y, et al. Radiation response of PNP input bipolar operational amplifiers[J]. Atomic Energy Science and Technol., 2012, 46(2): 229-233.

[13] Analog Devices. Demo Manual DC2414A LTC6268 and LTC6268-10 3-channel SOT-23 transimpedance amplifier [EB/OL]. https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/user-guides/DC2414AF.PDF, 2004.

[14] Texas Instruments. OPA657 1.6-GHz, low-noise, FET-input operational amplifier[EB/OL]. https://www.ti.com.cn/product/cn/OPA657, 2001.

[15] Analog Devices. Low noise, 1 GHz FastFET Op Amps ADA4817-1/ADA4817-2[EB/OL]. https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADA4817-1_4817-2.pdf, 2008.

[16] 姜　柯，陆　妩，胡天乐，等. 电子辐射环境中 NPN 输入双极运算放大器的辐射效应和退火特性[J]. 物理学报，2015，64(13)：302-308.
Jiang K, Lu W, Hu T L, et al. Radiation damage effect and post-annealing treatments of NPN-input bipolar operational amplifier in electron radiation environment [J]. Acta Phys. Sin., 2015, 64(13): 302-308.

[17] Assaf J. Radiation and annealing effects on integrated bipolar operational amplifier[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2017, 131: 100-104.

[18] Johnston A H, Swift G M. Total dose effects in conventional bipolar transistors and linear integrated circuits [J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1994, 41(6): 2427-2436.

[19] Gautam, Ajay K. Analogue integrated circuit unit Ⅲ-IC741 OP-AMP. 2012.

[20] Masahiro M, Shintaroh S, Ryoh K, et al. Electrical characterization of the operational amplifier consisting of 4H-SiC MOSFETs after gamma irradiation[J]. Materials Science Forum, 2018, 924: 984-987.

作者简介：

吕宗璟(1993—)，男，吉林省舒兰市人，2016 年毕业于中国科学技术大学，获学士学位，2018 年毕业于西北核技术研究所，获硕士学位，工程师，主要从事核电子学方向的研究。