

瞬时电离辐射剂量率对 BiMOS 运放 输出扰动时间的影响

马 强, 林东生, 范如玉, 陈 伟, 杨善潮,
龚建成, 王桂珍, 齐 超

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 对两种不同类型 BiMOS 运算放大器 (JFET-Bi, PMOS-Bi) γ 瞬时电离辐射效应进行研究。结果显示, BiMOS 运放瞬时辐射扰动时间随剂量率变化呈现出一定的规律性, 在剂量率较低情况下扰动时间随剂量率指数增长, 剂量率较高时, 扰动时间呈现出饱和特性。另外, 输入信号不同, 输出扰动时间随剂量率的变化也会有差异。

关键词: BiMOS; 集成运算放大器; γ 瞬时电离辐射; 扰动时间; 剂量率

中图分类号: TN431; TN792 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931 (2010) S0-0545-05

Transient Radiation Induced Disturbance Duration Behavior of BiMOS Op-amp Output Due to Dose Rate

MA Qiang, LIN Dong-sheng, FAN Ru-yu, CHEN Wei, YANG Shan-chao,
GONG Jian-cheng, WANG Gui-zhen, QI Chao

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: This work was devoted to investigate the gamma transient ionizing radiation effect of two kinds of BiMOS op-amp (JFET-Bi, PMOS-Bi). The experimental results indicate the changing of the disturbance duration of the BiMOS op-amp output with dose rate shows some regularity. The time of the transient radiation disturbance increases exponentially with dose rate while the dose rate is low, and the disturbance duration presents saturated characteristics while in high dose rate. What's more, the disturbance duration of the output also behaves some differences for different input signals.

Key words: BiMOS; op-amp; γ ionizing irradiation; disturbance duration; dose rate

随着微电子技术和信息化技术的发展, BiMOS运放因其兼具双极运放高增益和场效应管运放高输入电阻的优点而得到越来越广泛的应用, 因此, 研究BiMOS运放的辐射效应具有重要意义。近年来国内外对BiMOS运放单道。BiMOS运放作为线性电路相对于具有较强

粒子效应和总剂量效应进行了深入研究^[1-3], 集成运放的瞬时 γ 电离辐射效应作为运放重要的辐射效应之一, 虽早在1969年文献[4]已经进行了剂量率效应研究, 但到目前为止国内还没有关于BiMOS集成运放剂量率效应研究的报容错能力的数字电路会表现出对瞬时辐射效应

敏感的特性，在高剂量率的瞬时 γ 辐射环境下运放的辐射扰动是不可避免的，在绝大多数应用于瞬时辐射环境下的系统均会设计成能容许一定的运放扰动，只要能在要求的时间内恢复即可，因此，BiMOS运放在受 γ 瞬时辐射时扰动时间与剂量率的关系需要进一步研究。

本文建立1套BiMOS运放瞬时辐射效应在线测试系统，对不同剂量率下OP42 JFET-Bi和CA3140 PMOS-Bi两种BiMOS运放瞬时 γ 辐射响应进行了实验，得到了两种运放瞬时辐射扰动时间随剂量率变化的关系曲线，并结合运放电路结构特点对实验结果进行了分析。

1 实验

实验所选用的样品为两种典型的 BiMOS 运放，JFET 输入双极运放 OP42 和 PMOS 输入双极运放 CA3140。为便于实验结果分析，减少外围电路对运放的干扰，实验电路接成最简单的反相放大和单位增益模式，OP42 JFET-Bi 采用如图 1 所示电路，输入电阻 R_i 为 2 k Ω ，反馈电阻 R_F 为 10 k Ω ，闭环增益 $A_v = R_F/R_i = -5$ ，CA3140 PMOS-Bi 采用如图 2 所示的电路，闭环增益 $A_v = R_F/R_i = 1$ 。为降低强辐射环境下的干扰，每个电路上均对电源加入电容进行滤波，同时，为保证实验数据的一致性和可信度，每次实验使用相同的 PCB 板和运放芯片，且根据两种运放的参数特性在实验过程中电源电压均接为 ± 10 V，输入信号频率均为 30 kHz。

辐照实验在西北核技术研究所的“强光一号”加速器上进行，由于加速器在产生 γ 射线过程中会产生诸如电磁脉冲等大量干扰，因此，信号传输线用同轴电缆外加金属蛇皮套进行双屏蔽，电路板放在铝屏蔽盒内并在屏蔽盒外包裹铜网进行双屏蔽^[5]，铜网与屏蔽盒绝缘并与同轴电缆的金属蛇皮套相连。整个屏蔽系统的内屏蔽层连接到实验大厅外的信号地，外屏蔽层连接到辐照装置前端地。另一重要问题是阻抗匹配，由于需要50 Ω 同轴电缆进行长线传输，因此，要在运放的输入端并接50 Ω 电阻

进行匹配。

建立的信号测量系统如图 3 所示，“强光一号”出射的 γ 射线照射到实验器件上，射线与器件相互作用，产生效应信号，效应信号经传输电缆到示波器，由示波器记录，示波器由给定的触发信号统一触发，实验器件由屏蔽间内的供电系统经由传输电缆供电，所有测试记录设备均在屏蔽间内摆放以消除电磁干扰对测试记录设备的影响。

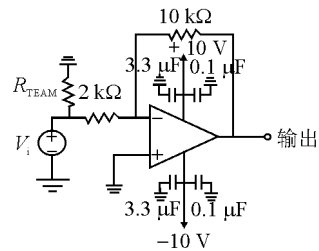


图 1 5 倍反相放大电路

Fig. 1 5 times reversed-phase amplifier circuit

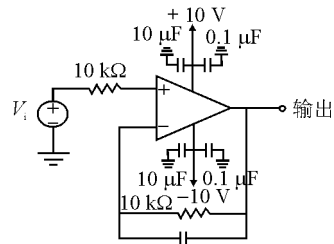


图 2 单位增益电路

Fig. 2 Unit gain circuit

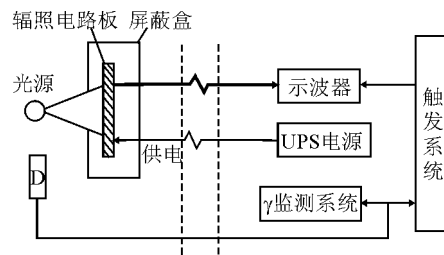


图 3 瞬时电离辐射信号测量系统框图

Fig. 3 Framework of transient ionizing radiation signal test system

2 实验结果及分析

2.1 OP42 JFET 输入 BiMOS 运算放大器的瞬时辐射效应

OP42 JFET-Bi 是一种常用的高速、快调节

的精密模拟电路。图 4 所示为 OP42 5 倍反相放大电路接法下的瞬时辐射典型输出波形，在 γ 射线辐照瞬间输出电压被拉低至负电源电压水平，持续十几 μs 后被拉升，在震荡两个周期后波形开始恢复。为保证精度和便于作图，扰动时间定义为虚线段之间的长度，即为辐照瞬间（零时）到扰动最后 1 个波峰的下沿。

图 5 所示为 OP42 瞬时辐射扰动时间与 γ 剂量率的关系，从图中可以看出，剂量率在 $6 \times 10^8 \text{ Gy/s}$ （以 Si 计，下同）以下时，指数拟合曲线与实验数据符合较好，且在更高剂量率时扰动时间呈现饱和特性，饱和时间约 $50 \mu\text{s}$ 。

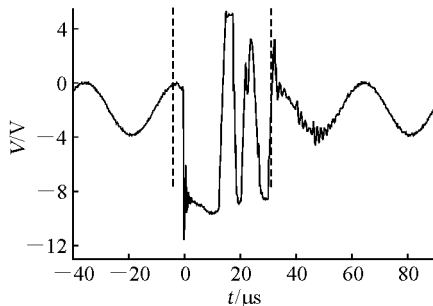


图 4 5 倍反相放大电路 γ 瞬时辐射输出波形
Fig. 4 Output waveform of 5 times reversed-phase amplifier circuit

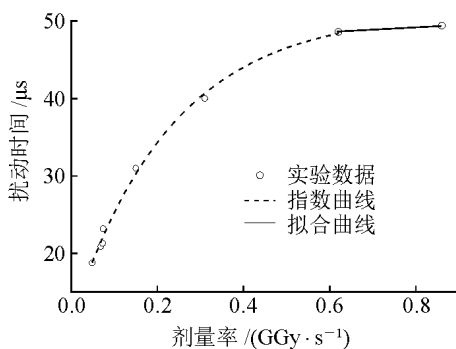


图 5 输出信号扰动时间与剂量率关系
Fig. 5 Disturbance duration of output versus dose rate

2.2 CA3140 PMOS 输入运算放大器的瞬时辐射效应

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放电路。图

6 所示为 CA3140 单位增益电路接法下不同输入时瞬时辐射典型输出波形，在 γ 射线辐照瞬间输出电压被拉低至负电源电压水平，并在约 $2 \mu\text{s}$ 迅速拉升至负电压的一半处后慢拉升至低电平，此时，输出电压又有一陡增至 2.5 V 左右并在高处震荡，正弦输入明显比方波输入情况在远处震荡的时间长。扰动时间定义为辐照瞬间（零时）到输出波形恢复正常的时间。

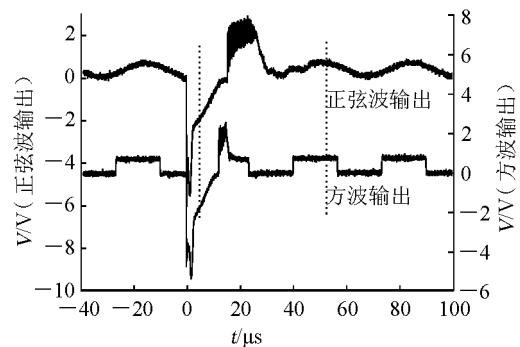


图 6 单位增益电路不同输入下 γ 瞬时辐射输出波形
Fig. 6 Output waveform of γ transient radiation on unit gain circuit under different input

在不同输入情况下对 CA3140 进行 γ 瞬时辐射实验，其瞬时扰动时间与剂量率的关系示于图 7。由图 7 可看出，剂量率超过 $6 \times 10^7 \text{ Gy/s}$ 时，正弦波输入时输出扰动时间明显大于方波的，但不论在哪种输入情况下，剂量率较低时瞬时扰动时间都随剂量率指数增长，并且在剂量率较高时表现出饱和特性，正弦波输入时饱和时间约 $50 \mu\text{s}$ ，方波输入时饱和时间约 $20 \mu\text{s}$ 。

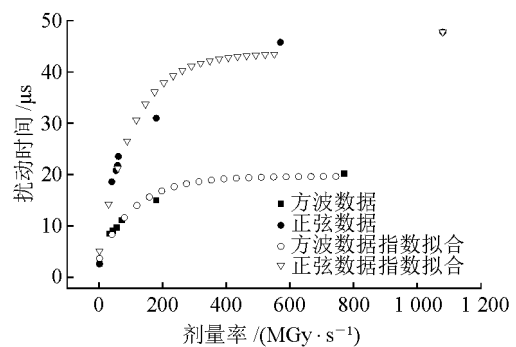


图 7 CA3140 输出端扰动时间与剂量率关系
Fig. 7 Disturbance duration of output for CA3140 versus dose rate

2.3 两种运算放大器的瞬时辐射效应分析

BiMOS 集成电路瞬时辐射的损伤包括了双极晶体管和场效应晶体管损伤的共同作用,但其实质都是瞬时 γ 射线在晶体管中电离出载流子,形成光电流。BiMOS 运放瞬时辐射响应就是运放对瞬时辐射产生的光电流的响应,瞬态电离辐射产生的光电流扰乱了 BiMOS 运放的偏压条件,电路在被扰动的偏压条件下回到正常状态的电路输出为电路的辐射响应。

对于外加偏置等条件相同的情况,运放瞬时辐射响应由剂量率决定,下面分析 BiMOS 运放光电流与剂量率的关系。

在运放未受辐照时,组成运放的晶体管内的载流子处于一种动态平衡,当瞬时辐射作用于晶体管的反偏 pn 结时会产生大量非平衡载流子,这些载流子的输运形成光电流,光电流的大小与过剩载流子密度及载流子扩散系数和迁移率有关^[7]。

低剂量率辐射下,辐射感生的过剩载流子密度比多数载流子密度小很多,电子和空穴可以被看作单个粒子,电子空穴的复合为 SRH 复合(陷阱复合),随着剂量率的增加,载流子生成率大于复合率,因此光电流增大,光电流对 BiMOS 运放电路偏压的扰动也增强,电路回到正常状态的时间也增加。当剂量率增加时,辐射感生的过剩载流子密度相当于或超过多数载流子密度,复合机制发生变化,从陷阱复合改变为直接复合,最后载流子生成率与复合率相同,过剩载流子密度达到最大值,BiMOS 运放中光电流也达到最大,电路回到正常状态的时间不再随剂量率增加而变化。

对于载流子的扩散系数和迁移率也表现出类似的现象,当辐射感生的过剩载流子密度相当于或超过多数载流子密度时,电子空穴对具有等离子体的特性,这时,电子空穴不会独立运动,电子运动导致电荷的不平衡分布,产生内建电场,内建电场使空穴跟着电子运动,结果是电子与空穴的扩散系数变成一样的,成为晶体管扩散系数,同样,空穴和电子的迁移率也变成一样的,成为晶体管迁移率,不再随

剂量率增加而变化,如图 8 所示^[8]。

由于运放中含有大量的晶体管、电阻、电容以及寄生的 pn 结^[9],对于同一个运放在剂量率和外加电压等条件相同的情况下,输入信号不同运放内各种单元器件电场不同。不同输入时运放在辐射后的几 μs 内由于光电流较大,输入信号对运放影响较小,但随着器件的恢复,输入信号电压对运放内器件电场影响变大,由于方波信号电场相对较强,运放恢复时间较小,而正弦波的电压却是不断变化的,且有效电压要小于方波有效电压,因此,增加了运放的恢复时间。

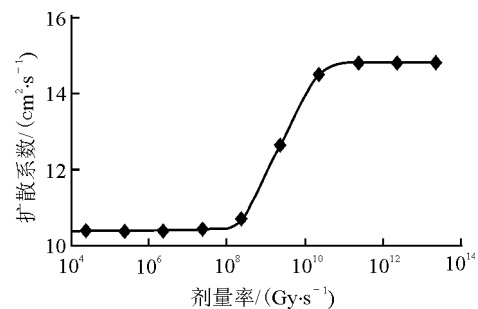


图 8 扩散系数与剂量率的关系

Fig. 8 Variation in diffusion coefficient in doped silicon dose rate
硅的掺杂浓度: $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

3 结论

本文通过对两种 BiMOS 运放进行的瞬时辐射实验所得实验数据的分析,总结了效应规律。结果表明,BiMOS 运放受到瞬时电离辐射时,在较低剂量率下运放输出扰动时间随剂量率增加而呈指数增加规律,在较高剂量率下输出扰动时间会达到饱和。因此,在应用这两种运放进行瞬时辐射环境下的电子系统设计时,可将饱和剂量率下的输出扰动时间作为参考标志,进行系统的抗辐射性能评估。

参考文献:

- [1] 陆妩,任迪远,郭旗,等. 运算放大器不同剂量率的辐射损伤效应[J]. 半导体学报, 2005, 26 (7): 1 464-1 468.

- LU Wu, REN Diyuan, GUO Qi, et al. Radiation effects of operational amplifier in different dose rates[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2005, 26(7): 1 464-1 468(in Chinese).
- [2] FLEETWOOD D, GALLOWAY K, MASSENGILL L. Muri-overview 2003[R]. [S. l.]: [s. n.], 2003.
- [3] DAVID M, HIEMSTR A. Guide to the 2007 IEEE radiation effects data workshop record[J]. IEEE REDW, 2008: 146-152.
- [4] NICHOLS J S, ALEXANDER D R, HITTINGER G H. Characterization and modeling of the 709 integrated circuit operational amplifier [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1969, NS-16: 172.
- [5] 王桂珍, 龚建成, 姜景和, 等. 电子元器件及电路的剂量率效应测试技术研究[J]. 微电子学, 2001, 31 (4): 131-134.
- WANG Guizhen, GONG Jiancheng, JIANG Jinghe, et al. Measurment of dose rate effects on electronic device and circuits[J]. Microelectronics, 2001, 31(2): 131-134(in Chinese).
- [6] WUNSCH T F, AXNESS C L. Modeling the time-dependent transient radiation response of semiconductor junctions[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1992, NS-39: 2 158-2 169.
- [7] DAVID R A. Transient ionizing radiation effects in devices and circuits[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2003, 50(3): 565-582.
- [8] FJELDLY T A. Modeling of high-dose-rate transient ionizing radiation effects in bipolar devices[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2001, 48: 1 721-1 730.
- [9] DEVAL Y, LAPUYADE H, BARNABY H, et al. Evaluation of a design methodology dedicated to dose-rate-hardened linear integrated circuits[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2002, 49(3): 1 468-1 473.