

运算放大器 X 和 γ 辐射损伤的比较^[20]

陈盘训

(中国工程物理研究院应用电子学研究所 成都 610003)

摘要 比较了运算放大器在 X 和 γ 辐射环境下性能的变化,并对 X 射线对运算放大器产生的剂量增强效应作了研究。实验测量 X 射线对几种典型运放的相对剂量增强系数(RDEF)的范围为 3.4~12.3。 SiO_2/Si 界面产生的俘获空穴电荷和界面态是运算放大器在 X 和 γ 辐射环境下的主要失效模式。

关键词 运算放大器, X 射线, γ 射线, 辐射损伤, 剂量增强效应

运算放大器广泛应用于空间、武器和军用设备,典型的运放主要由高 β NPN、一般 NPN、横向 PNP 和衬底 PNP 四种双极晶体管组成。在 X 和 γ 辐射下,这些典型器件将产生表面损伤,在 SiO_2/Si 界面产生正电荷俘获和界面态^[1]。对于 NPN 器件,正电荷俘获可使界面材料产生反型,亦即使基区表面由 P 型硅变为 N 型硅;对于 PNP 器件,可使发射区和集电区表面反型,也使 P 型硅变为 N 型硅^[2,3]。这样在这些区的表面形成漏电通道,使器件增益降低和漏电流增加。在界面产生的界面态可以增加表面复合速度,也使增益下降和漏电流增加。在 X 和 γ 辐照下,这些器件性能下降,使运放性能变坏。典型的情况是输入偏置电流 I_B 和失调电压 V_{os} 上升,这样就使由运放等组成的电子系统性能达不到规定的指标。

最近十年的研究表明, X 射线对半导体器件和集成电路产生剂量增强效应,这是由于器件内部存在金属与硅的界面,或者在封装中含有重金属材料,在 X 射线辐射时,金属材料对 X 射线的吸收与原子序数 Z 的三次方成正比。当 X 射线能量低于 100keV 时,与物质作用主要是光电过程。与金属材料层相比,硅材料吸收的 X 射线要少得多,产生的光电子也少。这样在界面产生次级粒子的非平衡流动^[4],光电子携带一定的能量从金属层进入硅区或 SiO_2 区,使硅区或 SiO_2 区产生剂量增强。光电子具有一定的能量,可电离 SiO_2 ,产生的电子和空穴除部分复合外,其余的电子逸出 SiO_2 ,空穴向 SiO_2/Si 界面输运,且被 SiO_2/Si 界面 SiO_2 一侧的缺陷所俘获,积聚俘获正电荷的数量取决于形成 SiO_2 的质量,当形成的正电荷层产生的电场足够强时,可使 P 型硅反型,形成 N 型硅的漏电通道,使增益下降和漏电流增加。这种光电子亦可使 SiO_2/Si 界面硅键断裂,产生表面快态,使表面复合速度增加,从而影响双极器件的几个主要电参数,使运放性能退化。本文比较了运算放大器在 X 和 γ 辐射环境下性能的变化,测量 X 射线对运放产生的相对剂量增强系数,通过实验研究运放在 X 和 γ 辐射环境下的失效模式。

[20] 国家科工委基金资助项目 91J11.07,获 1996 年度国防科工委科技进步三等奖

收稿日期: 初稿 1996-08-28, 修回 1996-11-10

1 实 验 方 法

1.1 实验样品

选用市售的 F005C 中增益通用运算放大器、F007C 和 F741 高增益通用运算放大器及 F010B 和 F011C 低功耗运算放大器为 X 和 γ 射线电离辐射实验样品。由于运放输入失调电压 V_{os} 对电离辐射不灵敏,且它随辐射剂量的变化没有规律性,因此选用输入偏置电流 I_B 作为运放的辐射灵敏参数^[1]。

1.2 辐射方法

运算放大器 X 射线辐射实验在中科院物理和化学研究所的 RU 200(日本) X 射线机上进行。实验时该机电源电压为 35keV,电流为 30mA,使用银旋转靶。采用 TLD 热释光剂量计实测 X 射线剂量,用衍射法测量 RU 200 X 射线相对能谱,峰值能量为 17.2keV。实验所用热释光片在 ⁶⁰Co γ 射线源上标定, TLD 对 X 射线辐射较 γ 射线灵敏,以 TLD 对 ⁶⁰Co γ 射线辐射的灵敏度为 1,美国学者实测得到 TLD 对 17.2keV X 射线的灵敏度为 1.33^[5],给出的理论值也为 1.33^[6],用 TLD 实测的剂量除以 1.33,得到实际 X 射线的辐射剂量,再将此剂量计算成硅的吸收剂量。

运放 γ 辐射实验在四川原子核应用技术研究所 5.92PBq ⁶⁰Co 源上进行,它由两个平行的平板源组成,样品印制板面积为 10cm × 10cm,实验时它置于两平板源中心且平行于两平板,测得样品板上 γ 剂量的最大偏差为 4.8%,在规定的误差范围内。

2 实 验 结 果

运算放大器 X 和 γ 辐射实验按国军标<<GJB762.2-89 半导体器件辐射加固试验方法 γ 总剂量辐照试验>>的要求进行。RU 200X 射线机上的实验剂量率在 0.011~0.22 Gy/s 之间;在 ⁶⁰Co 源实验 γ 剂量率在 0.024~1.04 Gy/s 之间。

在运放 X 和 γ 辐射实验中,采用原位加偏置和不加偏置两种辐照方式。结果表明,对运算放大器而言,加偏置和不加偏置对实验结果均无明显影响。由于所有实验运放的有源器件均为双极晶体管,无偏置辐照是双极器件的最坏情况,因此无偏置辐照也是双极型运放的最坏情况。本工作给出的是无偏置辐照下的数据。

2.1 输入偏置电流

图 1~5 给出了 F005C、F007C、F741、F010B 和 F011C 运算放大器输入偏置电流变化量 ΔI_B 与 X 和 γ 射线总剂量 D 的关系曲线,图中还给出 5 种运放 X 射线辐射相对剂量增强系数。表 1 综合了这 5 种运放的失效判据、X 和 γ 辐射失效阈和 X 辐射相对剂量增强系数。

2.2 开环增益

图 6 给出了 F741 运算放大器归一化开环增益 $G_{OL}(D)/G_{OL}(0)$ 与 X 和 γ 射线总剂量 D 的关系曲线。随着电离辐射剂量的增加,开环增益逐渐变小,但 X 辐射使开环增益减少的变化较 γ 辐射的要快。

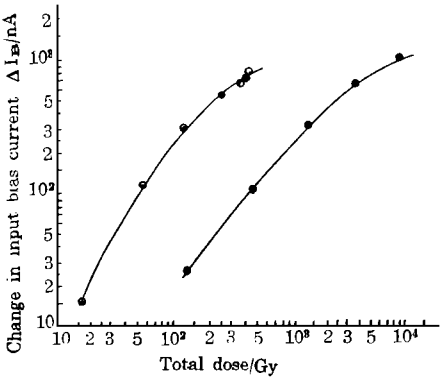


Fig. 1 X⁻radiation effects and dose enhancement effect on the F005C operational amplifiers
([○]) RU200 X⁻ray ([●]) ⁶⁰Co γ-ray
failure criterion: $\Delta I_B=700$ nA, RDEF=12.3

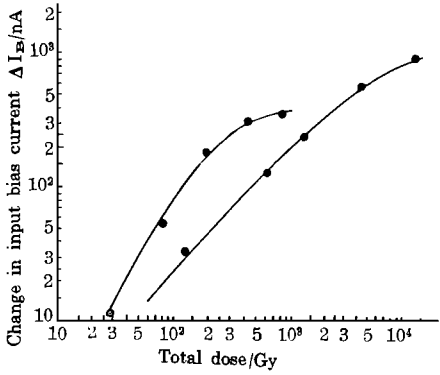


Fig. 2 X⁻radiation effects and dose enhancement effect on the F007C operational amplifiers
([○]) RU200 X⁻ray ([●]) ⁶⁰Co γ-ray
failure criterion: $\Delta I_B=300$ nA, RDEF=4.1

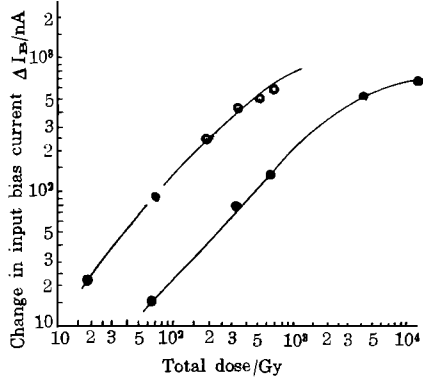


Fig. 3 X⁻radiation effects and dose enhancement effect on the F741 operational amplifiers
([○]) RU200 X⁻ray ([●]) ⁶⁰Co γ-ray
failure criterion: $\Delta I_B=53$ nA, RDEF=6.3

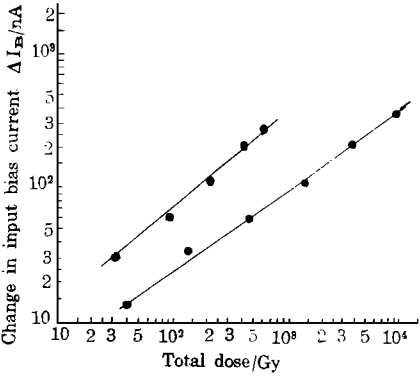


Fig. 4 X⁻radiation effects and dose enhancement effect on the F010B operational amplifiers
([○]) RU200 X⁻ray ([●]) ⁶⁰Co γ-ray
failure criterion: $\Delta I_B=300$ nA, RDEF=10.0

2.3 电离辐射损伤退火

图 7 给出了 F007C 输入偏置电流 I_B 与 X 和 γ 辐射后的时间的关系, X 射线辐射总剂量为 1.03×10^3 Gy, γ 辐射总剂量为 1.4×10^4 Gy。两次实验的辐照样品取自于同一批次。可以看到, 经两种射线辐照后, 增大了的输入偏置电流 I_B 随辐射后的时间线性减小, 且两条直线基本平行。

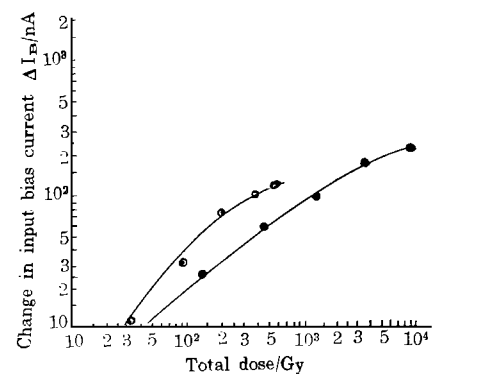


Fig. 5 X γ -radiation effects and dose enhancement effect on the F011C operational amplifiers
($\circ$) RU200 X-ray ($\bullet$) ^{60}Co γ -ray
failure criterion: $\Delta I_B=100$ nA, RDEF=3.4

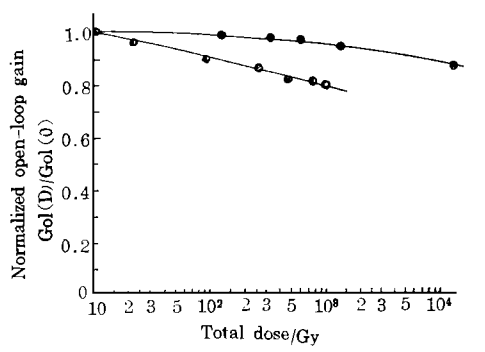


Fig. 6 Normalized open-loop gain $G_{ol}(D) : G_{ol}(0)$ versus total dose $D(\text{Gy})$ on the F741 operational amplifiers
($\circ$) RU200 X-ray ($\bullet$) ^{60}Co γ -ray $G_{ol}(0)=91$

Tab. 1 Relative radiation dose enhancement factor in the operational amplifier

Type	Failure criterion	$\Delta I_B/\text{nA}$	X-ray/Gy	γ -ray/Gy	RDEF
F005C		700	410	5000	12.3
F007C		300	400	1700	4.1
F741		53	43	270	6.3
F010B		300	69	690	10.0
F011C		100	400	1320	3.4

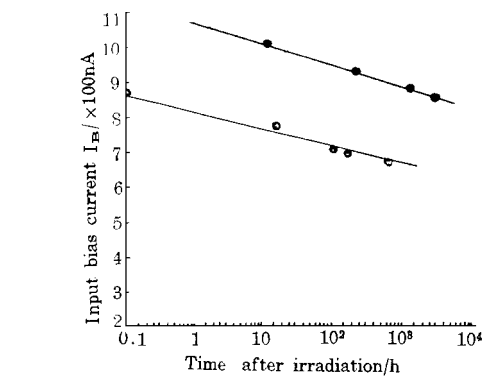


Fig. 7 The input bias current I_b versus the time after irradiation on the F007C operational amplifiers
($\circ$) RU200 X-ray, $D=1.0 \times 10^3$ Gy, $I_B(0)=120$ nA
($\bullet$) ^{60}Co γ -ray, $D=1.4 \times 10^4$ Gy, $I_B(0)=98$ nA

3 讨 论

从图 1~5 和表 1 的结果可以看出, 对运算放大器而言, X 射线辐射产生的损伤较 γ 辐射严重得多, 这是由 X 射线剂量增强效应引起的^[4]。对于典型运放, 实验测得的相对剂量增强系数范围为 3.4~12.3。从图 1~5 还可看出, 运放输入偏置电流变化量 ΔI_B 与 X 和 γ 射线总剂量 D 的关系曲线较为相似, 这是由于剂量增强效应使 X 射线损伤曲线向低剂量区平移。在这两种辐射环境下, 在较低剂量区时, $\Delta I_B \sim D$ 的关系基本呈线性和亚线性, 随着剂量的增加, 除 F010B 外, 其它运放损伤均趋向于饱和。从

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www

这些变化趋势可以看出, 尽管 X 射线产生剂量增强, 但 X 和 γ 射线对运放电离辐射损伤模型基本一样, 即它们电离引起 SiO_2/Si 界面产生正电荷累积和界面态, 由于在较高剂量下界面态的增加趋向饱和, 反映到运放的损伤在高剂量下也趋向于饱和。正电荷累积和界面态增加使表面复合速度增加, 这就使双极器件增益下降和漏电流增加, $\text{F}010\text{B}$ 可能要在更高的剂量下才能趋向于饱和。X 和 γ 辐射使运放的高 β NPN、一般 NPN 和横向 PNP 双极晶体管性能下降, 从而使运放性能退化。图 6 中归一化开环增益与 X 和 γ 射线总剂量 D 关系曲线变化趋势与图 1~5 情况相似, 不过前者是减少, 而后者是增加, 但开环增益对电离辐射不灵敏。从图 7 中可以看出, 运放受 X 和 γ 辐射产生的损伤随辐照后时间线性退火, 器件受两种射线辐射后, 退火的变化率相近。这也说明, X 和 γ 射线对运放产生的电离辐射损伤有相同的模式。

4 结 论

实验表明, X 射线辐射对运放造成的损伤较 γ 射线要严重得多, X 射线对运放产生剂量增强效应, 就典型运放而言, 相对剂量增强系数在 3.4~12.3 之间, 运放输入偏置电流 I_B 对 X 和 γ 射线电离辐射灵敏。两种射线对运放电离辐射损伤有相同的损伤模型: SiO_2/Si 界面产生正电荷累积和界面态。在高剂量下, 界面态趋于饱和, 使运放损伤在高剂量下也趋向于饱和。X 和 γ 射线对运放的表面损伤有相似的退火规律, 也说明这种辐射环境对运放产生相同的损伤模式。

参 考 文 献

- 1 Johnston A H, Plaag R E. IEEE NS-34, 1987, (6):1474
- 2 Srour J R, Long D M, Millward D G. Radiation Effects on and Dose Enhancement of Electronic materials, Noyes Publications, New Jersey USA, 1984
- 3 Beutler D E, Fleewood D M. IEEE NS-34, 1987, (6):1544
- 4 Brown D B. IEEE INS-REC, 1990:1
- 5 Oberhofer M. 应用热释光剂量, 中国计量出版社, 北京:1988:81
- 6 贝克尔 K. 固体剂量学, 原子能出版社, 1985:59

COMPARISON OF X- AND γ -RADIATION DAMAGE ON OPERATIONAL AMPLIFIERS

Chen Panxun

(*Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Chengdu 610003*)

ABSTRACT Character change of operational amplifiers was compared in X-and γ radiation enviroments. Dose enhancement effect ofX- and γ - radiation was studied to opera-tional amplifiers. Relative dose enhancement factors (RDEF) measured are about 3.4~12.4 in the experiment. SiO₂/Si interface trapped hole charges and interfacestates are main failure model of operationalamplifiers in X-and γ radiation enviroments.

KEYWORDS Operational amplifier, X-ray, γ ray, Radiation damage, Dose enhance-ment effect

(上接第 90 页 Continued from p90)

STUDY ON THE CHEMICAL ACTIVITY OF PODOPHYLLOTOXIN AND ITS DERIVATIVES

Wang Shilong Yao Side⁽¹⁾ Wang Mei LiYijiu Zhang Zhicheng⁽²⁾ Zhang Manwei⁽²⁾
(*Analysis and Research Centre of TongJi University, Shanghai 200093*)

⁽¹⁾(*Laboratory of Radiation Chemistry, Shanghai Institute of NuclearResearch, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*)

⁽²⁾(*Deparment of Application Chemistry, University of Science and Technolo gy of China, Hefei 230026*)

ABSTRACT The laser flash photolysis and pulse radiolysisof podophyllotoxin and its derivatives have been performed for the first time. The mechanism of photo-ionization has been confirmed and illustrated. Podophyllotoxin and its derivatives are high photosensitivity (UV) and can be readily photo-ionized to produce some transient species, which will be in-duced biological toxicities. In addition, they can react with hydrated electron, hydrogen radi-cal and hydroxyl radical. This will give chemist some advice to synthesize new derivatives of podophyllotoxin in cancer treatment.

KEYWORDS Podophyllotoxin and its derivatives, Pulse radiolysis, Laser flash photol-ysis, Anti-tumour activity