

模拟数字转换器 AD574 总剂量和单粒子翻转的协合效应

相传峰^{1,2,3} 姚帅^{2,3,4} 于新^{2,3} 李小龙^{2,3} 陆妩^{1,2,3} 王信^{2,3} 刘默寒^{2,3}
孙静^{2,3} 郭旗^{2,3} 蔡娇^{1,2,3} 杨圣^{2,3,4}

¹(新疆大学物理科学与技术学院 乌鲁木齐 830046)

²(中国科学院新疆理化技术研究所特殊环境功能材料与器件重点实验室 乌鲁木齐 830011)

³(中国科学院新疆理化技术研究所新疆电子信息材料与器件重点实验室 乌鲁木齐 830011)

⁴(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 以美国亚德诺半导体技术有限公司 bipolar/T²L 工艺的 12 位模拟数字转换器 AD574 为研究对象, 在 ⁶⁰Co γ 辐照条件下累积 400 Gy (Si) 的电离剂量 (Total ionizing dose, TID), 对累积总剂量前后的样品进行激光单粒子翻转 (Single-event upset, SEU) 试验, 获得了 0 V、1 V、2.5 V 输入信号条件下的输出码值翻转。结果显示: 累积 400 Gy (Si) 电离剂量后, AD574 输出码值的翻转向中心码值右侧偏移, 同时造成翻转次数的改变。本文初步分析了 AD574 的 TID-SEU 协合效应作用机制, 认为该现象与模拟/数字转换器内部比较器单粒子瞬态的敏感性有关。累积总剂量后, 比较器单粒子瞬态的幅值和宽度显著增大, 会导致 AD574 输出码值翻转分布及次数的变化。该 TID-SEU 协合效应研究对宇航元器件的抗辐射加固保障提供了有益参考。

关键词 模拟数字转换器, 总剂量效应, 单粒子翻转, 协合效应

中图分类号 O77⁺4, TN710.2

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021.rj.39.040702

Synergistic effect of total ionizing dose and single-event upset in the analog/digital converter AD574

XIANG Chuanfeng^{1,2,3} YAO Shuai^{2,3,4} YU Xin^{2,3} LI Xiaolong^{2,3} LU Wu^{1,2,3} WANG Xin^{2,3}
LIU Mohan^{2,3} SUN Jing^{2,3} GUO Qi^{2,3} CAI Jiao^{1,2,3} YANG Sheng^{2,3,4}

¹(College of Physics Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

²(Key Laboratory of Functional Materials and Devices for Special Environments, Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

³(Xinjiang Key Laboratory of Electronic Information Material and Device, Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

⁴(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

基金资助: 国家自然科学基金(11805270、U1532261、12005293)与中科院西部之光项目(2018-XBQNXZ-B-003)资助
第一作者: 相传峰, 男, 1995 年 11 月出生, 2018 年 6 月毕业于烟台大学核工程与核技术专业, 目前为新疆大学硕士研究生
通信作者: 陆妩, 研究员, 博士生导师, E-mail: luwu@ms.xjb.ac.cn
收稿日期: 初稿 2021-01-18; 修回 2021-05-27

Supported by National Natural Science Foundation of China (11805270, U1532261, and 12005293) and the West Light Foundation of the Chinese Academy of Sciences (2018-XBQNXZ-B-003)

First author: XIANG Chuanfeng (male) was born in November 1995, and graduated from Yantai University in June 2018, majoring in nuclear engineering and technology. Now he is a graduate student at Xinjiang University

Corresponding author: LU Wu, professor, doctoral supervisor, E-mail: luwu@ms.xjb.ac.cn

Received 18 January 2021; accepted 27 May 2021

ABSTRACT This study investigates the AD574, a 12-bit analog/digital converter (ADC) produced by American Analog Devices, Inc. (ADI) using bipolar/I²L technology. The test samples are subjected to a total ionizing dose (TID) of 400 Gy(Si) under ⁶⁰Co γ irradiation. The samples with and without the TID are then subjected to a single-event upset (SEU) test, and the upset times of the output codes under the input signal conditions of 0 V, 1 V, and 2.5 V are obtained. The test results indicate that, after accumulating a total dose of 400 Gy(Si), the upset of the AD574 output code shifts toward the right of the center code value, resulting in a change in the upset times. Furthermore, the mechanism of the TID-SEU synergistic effect for the AD574 is preliminarily analyzed; it is believed that this phenomenon is related to the sensitivity of the ADC internal comparator single-event transient (SET). The amplitude and width of the SET pulse of the comparator with the TID increase significantly; this causes a change in the AD574 output code value upset distribution and the number of upset times. This study on the TID-SEU synergistic effect serves as a useful reference for aerospace components with radiation hardness.

KEYWORDS AD converter, Total ionizing dose, Single-event upset, Synergistic effect

CLC O77⁺4, TN710.2

模拟数字转换器 (Analog-digital converter, ADC) 电路可以将模拟信号转换为数字信号, 在卫星载荷中起到不可替代的作用。典型空间环境剂量率为 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ Gy (Si)/s, 电子元器件普遍存在电离总剂量 (Total ionizing dose, TID) 效应, 含有双极工艺的电子器件对低剂量率损伤增强 (Enhance low dose rate sensitivity, ELDRS) 效应敏感, 同时重离子、质子等高能粒子还会导致单粒子效应 (Single event effect, SEE), 如单粒子翻转 (Single event upset, SEU)、单粒子瞬态 (Single event transients, SET) [1-2]。对于含有双极工艺的电子器件同时面临 ELDRS 和 SEE 的威胁 [3-4], 现行评估标准尚未考虑不同类型辐射效应的影响, 宇航候选元器件存在预期之外的风险。

国外有研究对 ADC 的 TID 效应和 SEE 分别进行了报道 [5-8], TID 使 ADC 参数退化, SEE 使 ADC 电路功能失效。国外对 ADC 电路的 TID-SEU 协合效应也进行了相关报道 [9], TID 会改变 ADC 电路在不同线性传能密度 (Linear energy transfer, LET) 下发生 SEU 的次数, SEU 的次数增多或减小取决于生产厂家的工艺技术。国内对 ADC 电路 TID 的测试方法进行了总结, 提出了一种基于计算机控制的动态测试系统 [10-11]。中国科学院新疆理化技术研究所和中国电子科技集团等单位对国产 ADC 电路开展了低剂量率辐照试验, 并确定了国产双极工艺 ADC 电路存在 ELDRS 效应 [12-14]。国内对 ADC 电路的 SEE 也有相关的研究 [15-17], 发现入射粒子的 LET 值越高, 工作频率越高, 输入电压越高, ADC 电路发生 SEE 的概率越大。文献 [18] 通过电路设计对 ADC 电路进行抗 SEE 加固, 提高

了电路抗单粒子门锁 (Single-event latchup, SEL) 的能力。总体来看, 国外针对 ADC 电路 TID-SEU 的协合效应研究限于一种型号 ADC 电路, 缺乏不同型号 ADC 电路 TID 对 SEU 的影响研究。国内对双极工艺 ADC 电路的 TID-SEU 协合效应鲜有报道。因此, 本工作以含有双极工艺的 AD574 为研究对象, 在 10^{-4} Gy (Si)/s 的低剂量率条件下累积电离辐射, 对 TID-SEU 协合效应进行深入研究, 分析协合效应影响机制, 对评估方法的持续改进具有重要意义。

1 样品及条件

试验样品为 ADI 公司 bipolar/I²L 工艺的 12 位逐次逼近型模拟数字转换器电路 AD574, 由电压比较器、控制逻辑电路、逐次逼近寄存器 (Successive approximation register, SAR)、高精度基准电压源和时钟等单元组成, 如图 1 所示。

试验由两部分组成: (1) ⁶⁰Co γ 辐照试验在中国科学院新疆理化技术研究所的 ⁶⁰Co γ 放射源上进行, 考虑到选取的样品为双极工艺产品, 辐照时选用美军标规定的空间实际剂量率 10^{-4} Gy (Si)/s, 室温辐照且试验样品所有管脚接地, 累积总剂量为 400 Gy(Si); (2) 激光单粒子试验在中国科学院国家空间中心进行, 激光波长为 1 064 nm, 光斑直径为 1.5 μ m, 能量为 1.2 nJ, 频率为 1 kHz, 激光扫描步长为 3 μ m。根据文献 [19], 该条件下激光的表面 LET 约为 80 MeV $\cdot$ cm²/mg, 与中国科学院近代物理研究所加速器给出的 Ta 离子表面 LET 相当。TID 与 SEU 试验装置及过程示意图如图 2 所示。⁶⁰Co γ 辐照试验时由直流电源提供可靠接地, SEU 试验

时由直流电源供电ADC电路，信号源提供ADC电路0 V、1 V及2.5 V模拟输入信号，数字输出信号由数据采集模块采集，并通过计算机控制及保存

数据。在激光辐照开始之前设置好电源电压和模拟输入信号, 开始进行激光辐照的同时采集数字输出信号, 直至整个芯片扫描结束。

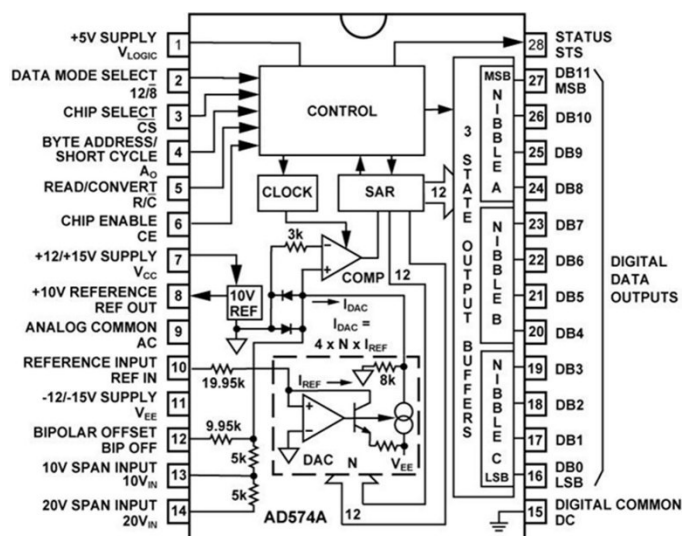


图1 模拟数字转换器AD574内部电路结构
Fig.1 Internal circuit structure of ADC AD574

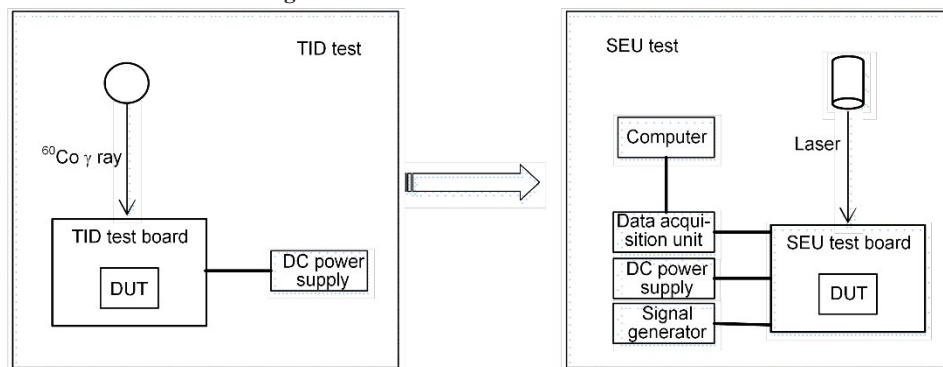


图2 总剂量与单粒子翻转试验装置及过程示意图
Fig.2 Diagram of TID and SEU test device and process

2 结果

^{60}Co γ 辐照前后 AD574 的 SEU 结果如图 3~5 所示。结果表明 AD574 的 TID-SEU 协合效应显著。图 3 为累积 400 Gy (Si) 剂量前后, 0 V 模拟输入信号对应的输出码值翻转情况, 每条竖线代表 100 个码值内的翻转次数。AD574 输入信号为 -5~5 V, 对应输出码值在 0~4 095, 其中 0 V 对应的中心码值为 2 048。为比较输出码值的翻转情况, 图 3 中未显示中心码值 2 048 的翻转次数。 ^{60}Co γ 辐照之前输出码值翻转以 2 048 码值为中心, 较为均匀地分布在其两边; ^{60}Co γ 辐照之后输出码值翻转更多分布在中心码值右侧, 在输出码值 2 000~3 000 内, 输出码值翻转次数从 484 次增加到 751 次, TID 效应改变了 AD574 的输出码值翻转的分布。

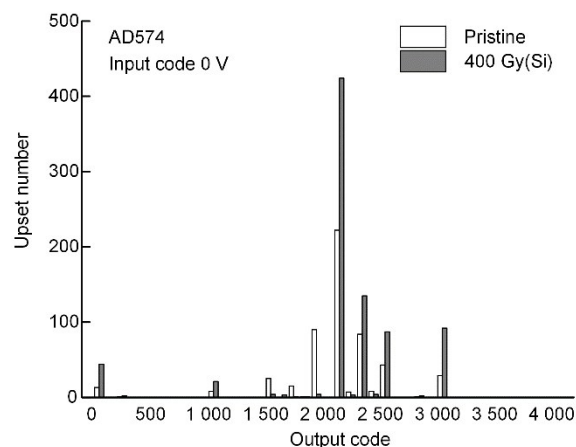


图3 输入信号0 V时累积总剂量对AD574单粒子输出码值翻转的影响

Fig.3 Influence of TID on SEU output code value at input signal of 0 V for ADC AD574

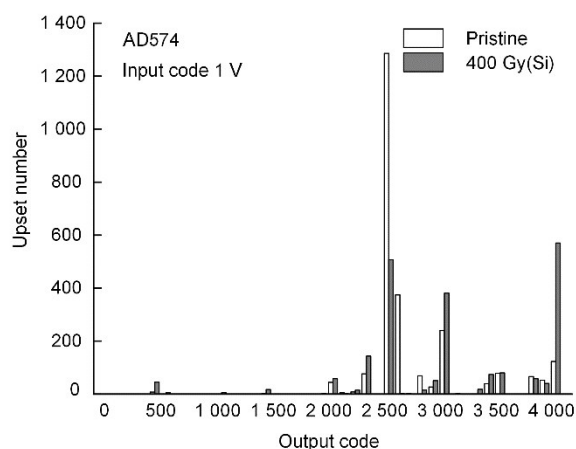


图4 输入信号1 V时累积总剂量对AD574单粒子输出码值翻转的影响

Fig.4 Influence of TID on SEU output code values at input signal 1 V for ADC AD574

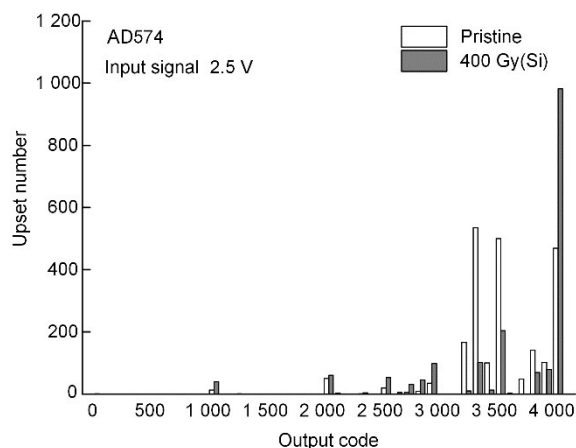


图5 输入信号2.5 V时累积总剂量对AD574输出码值翻转的影响

Fig.5 Influence of TID on SEU output code values at input signal 2.5 V for ADC AD574

当输入信号为1 V时, ^{60}Co γ 辐照前后输出码值翻转情况如图4所示,对应的输出码值是2 458。未进行 ^{60}Co γ 辐照时输出码值翻转更多地偏向中心码值右侧,翻转的输出码值最高位达到4 000~4 095,而且小于500的码值没有发生翻转;进行 ^{60}Co γ 辐照后输出码值的翻转向中心码值右侧偏移更加显著。在输出码值为4 000~4 095位置翻转次数由175次增加到610次。

图5为2.5 V模拟信号输入时的输出码值翻转变化,此时器件的输出码值为3 072。与1 V模拟信号输入的情况类似,输出码值翻转更多地偏向中心码值右侧。 ^{60}Co γ 辐照前输出码值翻转集中在3 500~4 000,出现翻转的最低位码值在1 000~1 100,与1 V输入条件相比更大。 ^{60}Co γ 辐照后输出码值

翻转主要集中在4 000~4 095,从469次增加982次。

3 讨论

当激光辐照改变AD574内部逐次逼近寄存器(SAR)结构逻辑状态时,就会导致SEU的发生,这种改变可以分为直接改变和间接改变。直接改变是激光扫描到SAR电路时,直接改变逻辑存储状态,使存储出现0到1或1到0的变化,引起SEU。间接改变是激光辐照与SAR相连的比较器,可能导致电压比较器出现SET并进一步传导到SAR电路,从而改变输出码值并引起SEU。ADC电路输出信号为数字信号,所以单粒子形态为SEU。在分析SEU起因时,有必要对内部模拟单元的单粒子效应进行分析,例如电压比较器^[19]。电压比较器的输出信号为模拟信号,对应的单粒子形态为SET。前期针对电压比较器TID与SET协合效应的研究结果显示,低电平输出时,TID会增加电压比较器SET的幅值和脉冲持续时间^[20-23],如图6~7所示。图6中是激光扫描同一位置产生的三种SET波形,累积电离辐射后,电压比较器的幅值由5 V增加到9 V,脉冲宽度由0.5 μs 展宽到3 μs 。累积电离辐射后,电压比较器SET更易传播到存储电路,使低电平上升到高电平,引起ADC电路的SEU次数增多。

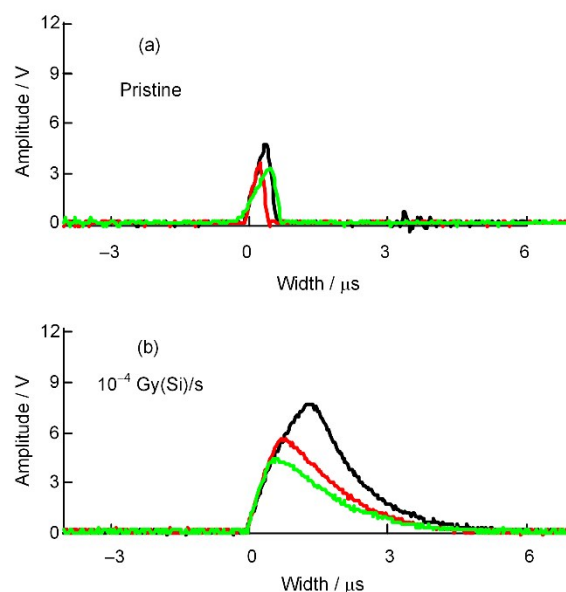


图6 低电平输出偏置时电压比较器的典型单粒子瞬态波形:(a)未累积总剂量;(b)低剂量率 10^{-4} Gy(Si)/s辐照

Fig.6 Typical waveform of the SET in voltage comparator with low-level output: (a) unirradiated; (b) irradiated with LDR of 10^{-4} Gy(Si)/s

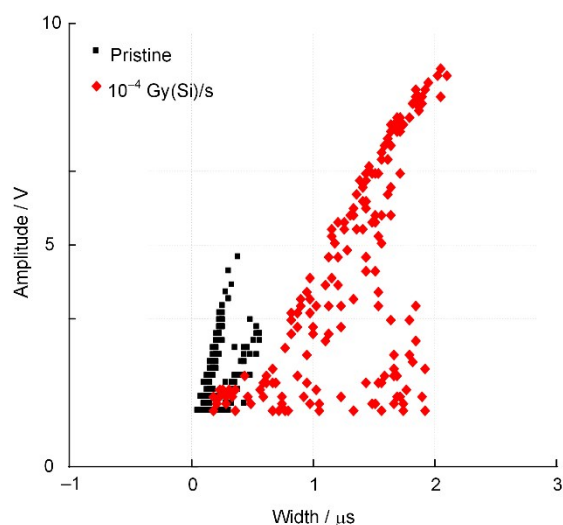


图7 低电平输出时电压比较器单粒子瞬态脉宽-幅值统计分布

Fig.7 Amplitude width statistical distribution of the SET in voltage comparator with low level

4 结论

累积 400 Gy (Si) 电离剂量后, AD574 的 TID-SEU 试验结果表明, 累积电离剂量会对双极工艺 ADC 的输出码值翻转产生影响, 主要表现为输出码值翻转分布及次数的改变, 在输入模拟信号为 0 V、1 V、2.5 V 的条件下, 输出码值的翻转均向中心码值的右侧漂移, 导致大于中心码值位置的翻转次数增大。当激光扫描到 SAR、与之相连的比较器时, 会导致 ADC 输出码值的翻转, 由于比较器在累积电离剂量后单粒子瞬态幅值和宽度显著增大, 会引起与之相连的 SAR 状态改变, 从而导致输出码值的翻转。累积电离总剂量后比较器单粒子瞬态敏感性的增加, 有可能导致 ADC 输出码值翻转的分布及次数发生变化。由于 ADC 电路结构复杂, 需要进一步借助仿真手段深入分析 ADC 的 TID-SEU 协同效应影响机制。

参考文献

- 1 Turflinger T L, Davey M V, Mappes B M. Single event effects in analog-to-digital converters: device performance and system impact[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1994, **41**(6): 2187-2194. DOI: 10.1109/23.340561.
- 2 Cai C, Liu T Q, Li X Y. *et al.* Heavy-ion and pulsed-laser single event effects in 130-nm CMOS-based thin/thick gate oxide anti-fuse PROMs[J]. Nuclear Science and Techniques, 2019, **30**(5): 92-102. DOI: 10.1007/s41365-019-0602-6.
- 3 蔡娇, 姚帅, 陆妩, 等. 双极运算放大器 LM158 电离总剂量与重离子协同辐射效应研究[J]. 核技术, 2021, **44**(5): 050502. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.050502. CAI Jiao, YAO Shuai, LU Wu, *et al.* Synergistic effect of total ionization dose and single event transient in bipolar operational amplifier LM158[J]. Nuclear Techniques, 2021, **44**(5): 050502. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.050502.
- 4 Zhang X Y, Guo Q, Li Y D, *et al.* Total ionizing dose and synergistic effects of magnetoresistive random-access memory[J]. Nuclear Science and Techniques, 2018, **29**(8): 1-5. DOI: 10.1007/s41365-018-0451-8.
- 5 Lee C I, Johnston A H. Comparison of total dose responses on high resolution analog-to-digital converter technologies[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1998, **45**(3): 1444-1449. DOI: 10.1109/23.685221.
- 6 Lee C I, Rax B G, Johnston A H. Total ionizing dose effects on high resolution (12-/14-bit) analog-to-digital converters[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1994, **41**(6): 2459-2466. DOI: 10.1109/23.340602.
- 7 Lee C I, Rax B G, Johnston A H. Total ionizing dose effects in 12-bit successive-approximation analog-to-digital converters[C]//1993 IEEE Radiation Effects Data Workshop. Snowbird, UT, USA: IEEE xplore, 1993: 112-117. DOI: 10.1109/REDW.1993.700576.
- 8 Wilson D J, Dorn D A. Characterization of single event effects for the AD677, 16-bit A/D converter[C]//1994 IEEE Radiation Effects Data Workshop. Tucson, AZ, USA: IEEE xplore, 1994: 78-85. DOI: 10.1109/REDW.1994.633039.
- 9 Salvy L, Varotsou A, Samaras A, *et al.* Total ionizing dose influence on the single event effect sensitivity of active EEE components[C]//2016 16th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). Bremen, Germany: IEEE xplore, 2016: 1-8. DOI: 10.1109/RADECS.2016.8093123.
- 10 李贵山, 赵又新, 刘保录, 等. 12 位 A/D 转换器总剂量辐射效应的测试技术[J]. 核技术, 2000, **23**(10): 721-725. LI Guishan, ZHAO Youxin, LIU Baolu, *et al.* Total dose effects testing techniques for 12 bit A/D converters[J]. Nuclear Techniques, 2000, **23**(10): 721-725.
- 11 王旭利, 许献国, 姚远程, 等. 模数转换器的辐射性能及其试验测试技术研究[J]. 电子技术应用, 2009, **35**(4): 107-109. DOI: 10.3969/j.issn.0258-7998.2009.04.048.

- WANG Xuli, XU Xianguo, YAO Yuancheng, *et al.* Study on ADC radiation-tolerant performance and its testing technique[J]. Application of Electronic Technique, 2009, **35**(4): 107-109. DOI: 10.3969/j. issn. 0258-7998.2009.04.048.
- 12 吴雪, 陆妩, 王义元, 等. 12 位 BiCMOS 模数转换器的剂量率效应[J]. 核技术, 2011, **34**(9): 669-674.
- WU Xue, LU Wu, WANG Yiyuan, *et al.* Radiation effect of 12-bit BiCMOS ADC at different dose rates[J]. Nuclear Techniques, 2011, **34**(9): 669-674.
- 13 王义元, 陆妩, 任迪远, 等. 10 位双极数模转换器的电离辐射效应[J]. 固体电子学研究与进展, 2009, **29**(4): 551-555. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3819.2009.04.016.
- WANG Yiyuan, LU Wu, REN Diyu, *et al.* Ionizing radiation effect of a 10-bit bipolar D/A converter[J]. Research & Progress of Solid State Electronics, 2009, **29**(4): 551-555. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-3819.2009.04.016.
- 14 胥佳灵. 不同辐射源下模拟数字转换器(ADC)辐射效应及损伤机理的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2012. DOI: 10.1109/cecnet.2012.6202063.
- XU Jialing. Total dose radiation effect and damage mechanisms of ADC by different irradiation sources[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2012. DOI: 10.1109/cecnet.2012.6202063.
- 15 安康, 梁斌, 李晋文. 辐射效应对 SAR ADC 影响及加固方法[C]//徐伟遐. 第十九届计算机工程与工艺年会暨第五届微处理器技术论坛论文集. 合肥: 湖南科学技术出版社, 2015: 179-183. DOI: 10.1109/cicc. 2015. 7338380.
- AN Kang, LIANG Bin, LI Jinwen. Effects of radiation on SAR ADC and antiradiation methods[C]//XU Weixia. The 19th annual conference on computer engineering and technology and the 5th workshop on microprocessor technology. Hefei: Hunan science&technology press, 2015: 179-183. DOI: 10.1109/cicc.2015.7338380.
- 16 陈良. 基于标准工艺的模数转换器抗辐照加固设计与验证[D]. 成都: 电子科技大学, 2016. DOI: 10.21436/inbom.12382432.
- CHEN Liang. Design and verification of antiradiation of analog to digital converter based on standard process[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016. DOI: 10.21436/inbom.12382432.
- 17 张凤祁, 王勋, 姚志斌, 等. 模数转换器单粒子效应影响因素试验研究[J]. 现代应用物理, 2020, **11**(2): 27-33. DOI: 10.12061/j.issn.2095-6223.2020.020602.
- ZHANG Fengqi, WANG Xun, YAO Zhibin, *et al.* Influence factors of single event effects on analog-to-digital converter[J]. Modern Applied Physics, 2020, **11**(2): 27-33. DOI: 10.12061/j.issn.2095-6223.2020.020602.
- 18 Huang J G, Han J W. Calculation of LET in SEE simulation by pulsed laser[J]. Science in China (Series G), 2005, **48**(1): 113-121. DOI: 10.1007/BF02736591.
- 19 Buchner S, Campbell A B, Sternberg A, *et al.* Validity of using a fixed analog input for evaluating the SEU sensitivity of a flash analog-to-digital converter[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2005, **52**(1): 462-467. DOI: 10.1109/TNS.2004.842721.
- 20 Yao S, Lu W, Yu X, *et al.* Synergistic effect of enhanced low-dose-rate sensitivity and single event transient in bipolar voltage comparator LM139[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2019, **56**(2): 172-178. DOI: 10.1080/00223131.2018.1539352.
- 21 Yao S, Lu W, Yu X, *et al.* Using a temperature-switching approach to evaluate low-dose-rate ionizing radiation effects on SET in linear bipolar circuits[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2019, **66**(7): 1557-1565. DOI: 10.1109/TNS.2019.2908959.
- 22 王利斌, 姚帅, 陆妩, 等. 双极电压比较器 LM311 电离总剂量与单粒子瞬态协同效应研究[J]. 电子学报, 2020, **48**(8): 1635-1640. DOI: 10.3969/j. issn. 0372-2112.2020.08.024.
- WANG Libin, YAO Shuai, LU Wu, *et al.* Synergistic effect of ionization total dose and single particle transient in bipolar voltage comparator LM311[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, **48**(8): 1635-1640. DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.08.024.
- 23 Yu X, Lu W, Yao S, *et al.* Simulation of synergism effect using temperature switching irradiation on bipolar comparator[J]. Chinese Physics Letters, 2018, **35**(8): 088401. DOI: 10.1088/0256-307x/35/8/088401.