

12 位 BiCMOS 模数转换器的剂量率效应

吴雪^{1,2,3} 陆妩^{1,2} 王义元^{1,2,3} 胥佳灵^{1,4} 张乐情^{1,2,3}
卢健^{1,2,3} 于新^{1,2,3} 胡天乐^{1,4}

1 (中国科学院新疆理化技术研究所 乌鲁木齐 830011)

2 (新疆电子信息材料与器件重点实验室 乌鲁木齐 830011)

3 (中国科学院研究生院 北京 100049)

4 (新疆大学 乌鲁木齐 830046)

摘要 对商用 BiCMOS 模数转换器(ADC)AD678 进行不同剂量率下电离辐射效应及室温退火特性的研究。结果表明, ADC 的敏感参数在不同剂量率下的响应有差异; 模拟电源电流和数字电源电流的辐照响应差别较大, 微分非线性误差(DNL)、积分非线性误差(INL)和失码(Misscode)在低剂量率下电离损伤更严重, 表现出明显的低剂量率损伤增强效应(Enhanced-Low-Dose-Rate-Sensitivity, ELDRS)。结合工艺条件和空间电荷模型对 ADC 的损伤机理进行了讨论。

关键词 BiCMOS, 模数转换器, 剂量率, ^{60}Co γ 辐照

中图分类号 TN431, TN792

模数转换器(ADC)是航天器和卫星的重要组成部分, 对系统性能和灵活性的影响至关重要。ADC 作为模拟系统和数字系统间的接口电路, 实现模拟信号的数字信号转换, 以作信号处理。研究发现^[1-5], 在太空中受电离辐射的作用, ADC 器件的电参数会受影响, 导致部分模块或全部模块损坏而功能失效, 给航天系统的可靠性带来很大隐患。因此, 开展 ADC 电离辐射响应规律的研究, 分析、评估其电离辐射效应的方法, 是抗辐射电子学领域的重要课题。

国外对 ADC 电离辐射效应研究始于 20 世纪 90 年代初^[1], 对逐次逼近结构 ADC 的研究居多, 有单一工艺和复合工艺。ADC 内有模拟模块和数字模块, 结构复杂, 很难对其辐射损伤机理进行系统分析。因此, 有关不同剂量率条件下复合工艺的 BiCMOS ADC 电离辐射效应的研究报道并不多。我国关于 ADC 电离辐射效应的研究起步稍晚^[5-7], 且均为单一工艺的器件。

Enlow 等^[8]报道, 双极工艺器件存在低剂量率损伤增强效应, 而 BiCMOS 工艺既有双极工艺又有 MOS 工艺, 故其电离辐射效应是否和单一工艺器件一致还有待验证。本文研究 BiCMOS 工艺器件 AD678 在不同剂量率下的电离辐射效应及室温退火特性。

1 实验方法

实验样品选用同一批次 BiCMOS 工艺的并行输出 ADC—AD678。辐照实验在中国科学院新疆理化技术研究所 $2.59 \times 10^{15} \text{ Bq}$ 和 $3.7 \times 10^{13} \text{ Bq}$ 钴源上进行, 剂量率分别为 0.1 和 $2 \times 10^{-4} \text{ Gy/s(Si)}$ 。辐照样品置于 Pb/Al 屏蔽盒内, 以屏蔽辐射环境中的低能散射光子。器件的偏置条件为: 电源端加上激励($\pm 12 \text{ V}$ 、 $+5 \text{ V}$), 信号端送入 24 kHz 的时钟信号, 采用内部自带参考电压, 输入电压为满量程电压 10 V, 所有输出端均悬空。辐照后, 对剂量率 0.1 Gy/s(Si)辐照样品保持与辐照相同的偏置条件进行室温退火实验, 退火时间等于相同总剂量的低剂量率辐照时间。

辐照和退火测试均采用移位测试(off-line test), 辐照后 30 min 在 AMIDA3000XP 模拟混合信号测试仪上完成。测试参数包括功耗(P_w)、电源电流($I_{\text{power supply}}$)、微分非线性误差(DNL)、积分非线性误差(INL)、失码(Misscode)等。

2 实验结果

在上述偏置条件下, 对样品进行高、低剂量率辐照实验, 高剂量率辐照完成后, 保持相同偏置条件, 进行室温退火, 退火时间与低剂量率相同。退

第一作者: 吴雪, 男, 1986 年出生, 2009 年毕业于长春理工大学, 现为中国科学院新疆理化技术研究所硕士研究生, 专业: 微电子学与固体电子学

收稿日期: 2011-06-13, 修回日期: 2011-07-12

火过程中, P_w 、DNL、INL 等参数均有明显变化, Misscode 基本保持不变。

图 1 为样品的功耗变化(ΔP_w)随辐照总剂量及退火时间的响应关系。由图 1(a), 在 ^{60}Co γ 辐照下, P_w 对电离辐照非常敏感, 在两种剂量率辐照下, P_w 均有显著增加, 高剂量率下的增幅比低剂量率下稍大。100 Gy 前, 器件在高、低剂量率下的电离损伤变化趋势一致, 差别不大。100 Gy 后, 高剂量

率辐照下, 辐射损伤持续增大, 损伤程度超过低剂量率下的损伤。由图 1(a), 低剂量率下的损伤趋于饱和。图 1(b)的室温退火特性显示, 高剂量率辐照的样品在退火初期向初始值方向恢复明显, 在退火 208 h(低剂量率辐照至 150 Gy 所需的时间)处, P_w 的恢复值低于低剂量率辐照至 150 Gy 的损伤值, 300 h 后趋势变缓, 表现出一定的时间相关效应。

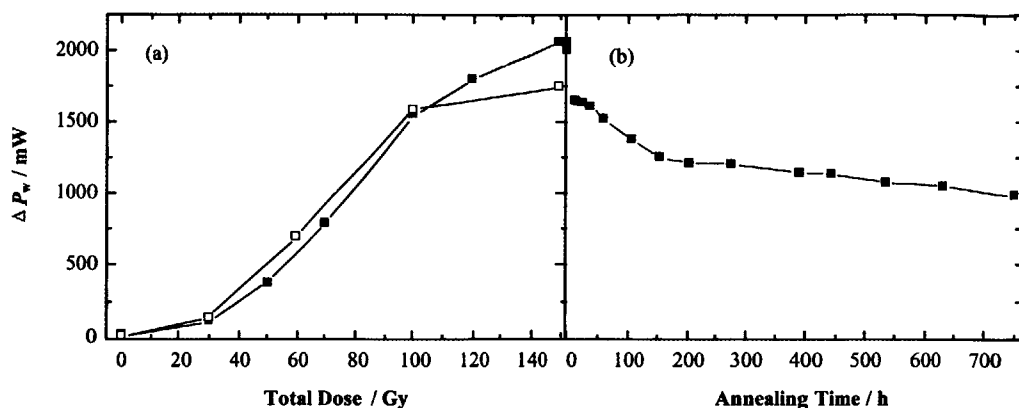


图 1 功耗(P_w)随辐照总剂量(a)及退火时间(b)的变化
Fig.1 P_w of the ADC vs total dose (a) and time of room temperature annealing (b).
■ 0.1 Gy/s □ 0.0002 Gy/s

图 2 是 DNL 和 INL 随辐照总剂量及室温退火时间的关系。由图 2(a)和(c)可知, DNL 和 INL 对电离辐照都很敏感。图 2(a)表明, 在低剂量率辐照至 100 Gy 时, DNL 明显增大, 高剂量率辐照至 100 Gy 前, DNL 变化并不明显, 120 Gy 处才出现显著增大。辐照累积总剂量 100 Gy 后, 低剂量率下的辐照电离损伤急剧增大, 远超过高剂量率下的损伤程度, 表现出明显的低剂量率损伤增强效应。图 2(b)为 DNL 高剂量率辐照后室温退火的变化关系。由图可见, 样品经室温退火后向初始值恢复。退火 208 h 处, DNL 有向初始值恢复的趋势, 与此对应, 低剂量率辐照至 150 Gy 总剂量时, DNL 却持续增加, 表明对 BiCMOS 器件的 DNL, 不同剂量率电离损伤间的差异, 不能用相同时间的室温退火来消除, 是真正意义上的低剂量率损伤增强效应。INL 的电离辐照效应和 DNL 相似, 也表现出真正的低剂量率损伤增强效应。

图 3 是 Misscode 随辐射总剂量及室温退火时间的变化关系。由图 3(a), Misscode 对电离辐射更为敏感。辐照至 60–70 Gy 时, 测试样品出现失码, 此后随总剂量逐渐增多。辐照总剂量达 100 Gy 时, 低剂量率下失码数达 4 009, 是高剂量率下的 8 倍, 体现了低剂量率损伤增强效应。辐照总剂量累加至 150 Gy 时, 样品的输出码值全部丢失, 达到饱和。

由图 3(b), 在室温退火过程中, Misscode 稍有恢复。退火时间 208 h 处, Misscode 恢复至 4 040, 这可能与 DNL、INL 退火时的恢复有关。

由不同剂量率辐照及相同偏置条件下的室温退火行为看, 高、低剂量率下, 测试样品电参数对辐照很敏感, 且在室温退火下有一定程度的恢复, 但不同参数对剂量率的响应不同, 这与 ADC 的工艺及内部模块较多有关。

3 讨论

3.1 P_w 的电离辐射效应

AD678 内部既有模拟模块又有数字模块, 需不同电源给不同模块供电, 讨论 P_w 的电离辐射效应须从电源电流开始。归一化电源电流随辐照总剂量及退火时间的关系如图 4 所示, 其中 I_D 为数字电源 V_{DD} 电流, I_C 为 +12 V 模拟电源 V_{CC} 电流, I_E 为 -12 V 模拟电源 V_{EE} 电流。

由图 4(a), 辐照总剂量达 150 Gy 时, I_D 增大了 15 倍, 而模拟电源电流仅稍有增加, 且变化在参数允许范围内。电源 V_{DD} 主要为 AD678 内部数字模块供电, 而 BiCMOS 工艺器件的数字模块一般由 MOS 工艺制作。相对双极工艺, 在辐照环境中 MOS 器件的漏电较为严重, 包括源漏间漏电及晶体管间漏

电等^[9], 这也是 I_D 随辐照总剂量变化比模拟电源电流敏感的原因。对于双极工艺, 辐照会造成晶体管的基极电流增加, 而集电极电流基本不变^[10], 并且在集电极和发射级之间也会产生类似 MOS 工艺的漏电, 但小得多。这对图 4(a)中 I_C 和 I_E 的电离损伤变化有了很好的解释, 文献[11,12]报道, BiCMOS 的 ADC 及 DAC 的电源电流出现类似的变化趋势。

由图 4(b), I_D 的退火效应非常明显, I_D 的增大主要由辐照产生的氧化物陷阱电荷造成。相对而言, I_C 和 I_E 的退火并不明显, 这与模块的工艺相关, 因为对双极工艺, 退火过程中, 在氧化物陷阱正电荷减少的同时, 界面陷阱电荷的形成也会增加参数的电离损伤, 所以模拟电源电流的退火效应并不明显。

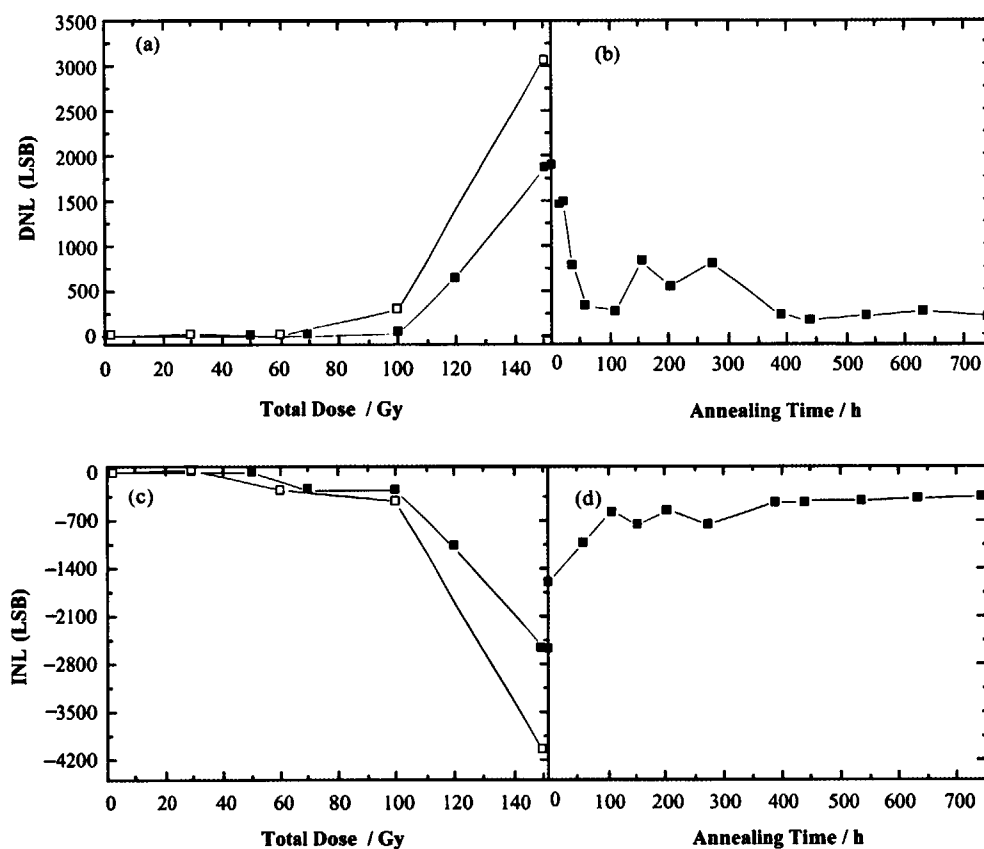


图 2 DNL 和 INL 随辐照总剂量及退火时间的变化

Fig.2 DNL and INL of the ADC versus total dose and time of room temperature annealing.

■ 0.1 Gy/s □ 0.0002 Gy/s

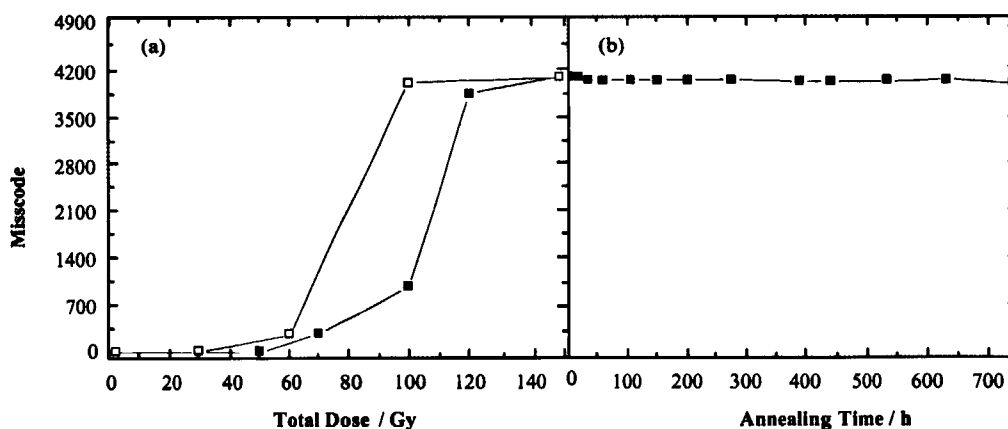


图 3 Misscode 随辐照总剂量(a)及退火时间(b)的变化

Fig.3 Misscode of the ADC versus total dose (a) and time of room temperature annealing (b).

■ 0.1 Gy/s □ 0.0002 Gy/s

3.2 非线性误差及 Misscode 的电离辐射效应

实验样品为 Pipelined 结构,其单级和 FlashADC

的结构特点见图 5。和逐次逼近结构 ADC 一样,其内部也有比较器模块。辐照时,逐次逼近结构的 ADC 内部模块和电参数对应关系如表 1。

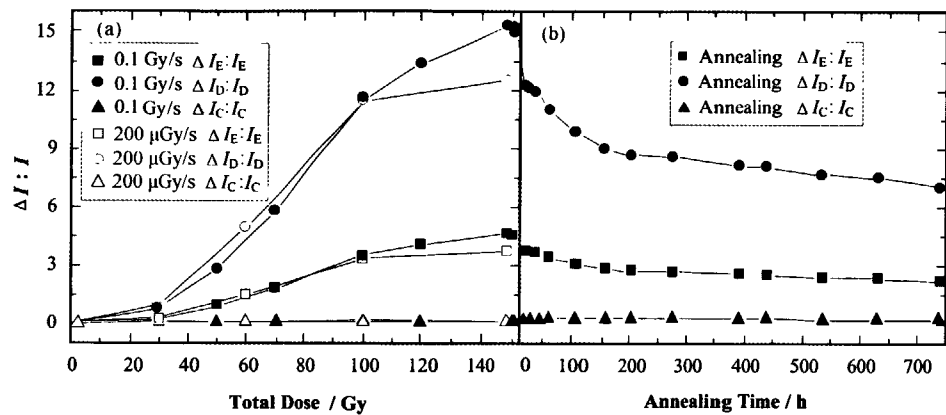


图 4 归一化电源电流随辐照总剂量(a)及退火时间(b)的变化
Fig.4 The normalized operating current of ADC versus to total dose (a) and annealing time (b) at room temperature.

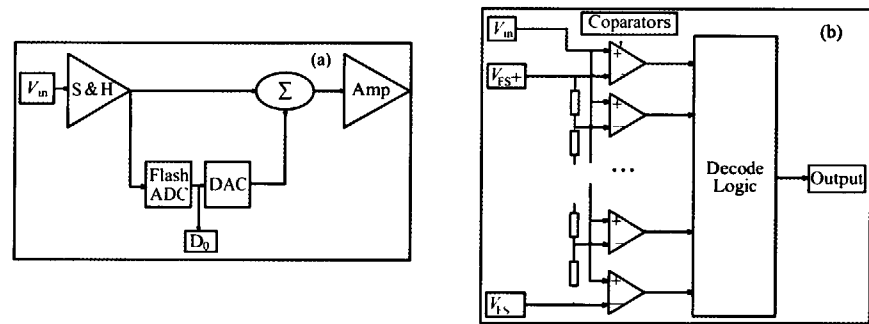


图 5 Pipelined 单级结构(a)和 FlashADC 结构(b)图
Fig.5 The block diagram of one stage (a) and Flash ADC (b)Pipelined ADC.

表 1 逐次逼近型 ADC 的内部模块和电参数的对应关系
Table 1 Electrical parametric of ADC versus internal block.

模块 Block	有效参数效应 Net Effect
参考电压 Vref	增益和失调误差 Gain, offset error
比较器 Comparator	非线性误差 INL/DNL
放大器 Internal Amp	增益和失调误差及动态误差 Gain, offset, dynamic error
主次逼近寄存器 SAR	积分非线性误差及动态误差 INL, dynamic error
控制逻辑 Control logic	功能失效 Functional failure
数模转换器 DAC	积分非线性误差及动态误差 INL, dynamic error
输出级 Output stage	直流参数、功能失效 DC parametric, functional failure

根据表 1,比较器模块影响器件的非线性误差,包括 DNL 和 INL。另外,比较器是模拟器件,是一种特殊的运算放大器,在 BiCMOS 工艺中一般由双极工艺制成。研究发现^[5,12],在辐照环境下,比较器的失调会增加,共模抑制比及输出电压会降低,这样在 ADC 中就使器件的量化值漂移,进而影响

ADC 输出码值的跳变点,这可用式(1)、式(2)描述:

$$DNL(i)=\{[S(i+1)-S(i)]/LSB\}-1, \quad i=1,2,...,2^N-2 \quad (1)$$

$$INL(i)=\sum_{k=1}^{i-1} DNL(k), \quad i=1,2,...,2^N-2 \quad (2)$$

其中, $S(i+1)$ 和 $S(i)$ 分别是第 $i+1$ 和第 i 个码值对应的模拟输入。辐照引起比较器电参数的变化,会影响器件的DNL和INL。由式(1), $DNL(i)=-1$, 码值 i 丢失。

另外,图2-3显示出参数DNL、INL和Misscode具有低剂量率损伤增强效应,这与文献[10]报道的双极工艺的电参数具有低剂量率损伤增强效应一致,应用空间电荷模型对此进行解释。

研究表明,电离辐射会在双极晶体管基射结区的 SiO_2 中产生氧化陷阱电荷和界面态,其形成与 SiO_2 中的电场及中性H捕获辐照产生的空穴形成 H^+ 有关,空间电荷模型^[10,13-15]认为,不同剂量率辐照下,氧化陷阱电荷形成的空间电场不同,对界面态的产生有很大影响。高剂量率辐照下, SiO_2 层中短时间内产生大量的氧化陷阱电荷,这些正的陷阱电荷在 SiO_2 层中形成一个空间电场,阻碍空穴和 H^+ 向 Si/SiO_2 界面运动,仅少量空穴和 H^+ 能到达 Si/SiO_2 界面,被界面陷阱捕获形成界面态。低剂量率辐照下,由于辐照产生的电子-空穴对速度较慢,形成的空间电场也较弱,且辐照时间较长,这样就会有大量的空穴和 H^+ 到达 Si/SiO_2 界面,形成界面态。这些界面态在基区表面形成复合中心,从而增加基极电流,降低晶体管的增益,造成低剂量率辐照损伤的增强。参数DNL、INL等的变化正是体现了这一点。

4 结语

电离辐照环境下,数字电源和模拟电源电流的变化趋势一致,但数字电源表现更为敏感。

辐照过程中, P_w 、DNL、INL、Misscode等参数变化较明显,在低剂量率辐照下DNL、INL和Misscode变化更显著,表现出明显的低剂量率损伤增强效应。

由于样品是BiCMOS的复合工艺,辐照过程中,各参数的变化趋势不一致,和双极工艺制作的模块相关的参数表现出明显的低剂量率损伤增强效应,而电源电流则表现出时间相关效应,这也正是复合工艺ADC难以评估的所在,因此,评估此类器件时还需更多的实验及对参数变化的综合考虑。

参考文献

- 1 Lee C I, Rax B G, Johnston A H. Total ionizing dose effects in 12-bit successive-approximation analog-to-digital converters[C] // IEEE Radiation Effects Data Workshop. Snowbird,Utah: IEEE, 1993, 112-117
- 2 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 Trans Nucl Sci, 1994, 41(6): 2459-2466
- 3 Lee C I, Rax B G, Johnston A H. Hardness assurance and testing techniques for high resolution (12 to 16 bit) analog-to-digital converters[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1995, 42(6): 1681-1688
- 4 Youk G U. Dose rate effects of a bipolar AD converter[C] // IEEE Radiation Effects Data Workshop. Indian Wells: IEEE, 1996: 38-43
- 5 郭旗,任迪远,范隆,等.模数转换器的 ^{60}Co γ 射线和电子辐照效应[J].核技术,1997,20(1): 753-756
GUO Qi, REN Diyuan, FAN Long, et al. Ionizing radiation effect of analog to digital converters[J]. Nucl Tech, 1997, 20(1): 753-756
- 6 邢克飞,王跃科,潘华锋.数模/模数转换器和大容量存储器件 γ 射线辐射试验研究[J].辐射研究与辐射工艺学报,2006,24(4): 253-256
XING Kefei, WANG Yueke, PAN Huafeng. Radiation effect test on ADC/DAC and high density memory devices with ^{60}Co γ -rays[J]. J Radiat Res Radiat Processing, 2006, 24(4): 253-256
- 7 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,2009,4: 107-109
WANG Xuli, XU Xianguo, YAO Yuancheng, et al. Study on ADC radiation-tolerant performance and its testing technique[J]. Appl Electron Tech, 2009, 4: 107-109
- 8 Enlow E W, Pease R L, Combs W, et al. Response of advanced bipolar processes to ionizing radiation[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1991, 49(6): 1342-1351
- 9 Shaneyfelt M R, Dodd P E, Draper B L, et al. Challenges in hardening technologies using shallow-trench isolation[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1998, 45(6): 2584-2592
- 10 郑玉展,陆旻,任迪远,等.不同发射极面积npn晶体管高低剂量率辐射损伤特性[J].物理学报,2009,58(8): 5572-5577
ZHENG Yuzhan, LU Wu, REN Diyuan, et al. Characteristics of high-and low-dose-rate damage for domestic npn transistors of various emitter areas[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(8): 5572-5577
- 11 Lee C I, Johnston A H. Comparison of total dose responses on high resolution analog-to-digital converter technologies[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1998, 45(3): 1444-1449

- 12 Chavez R M, Rax B G, Scheick L Z, *et al.* Total ionizing dose effects in bipolar and BiCMOS devices[C]// IEEE Radiation Effects Data Workshop. IEEE, 2005: 144–148
- 13 Fleetwood D M, Kosier S L, Nowlin R N, *et al.* Physical mechanisms contribution enhanced bipolar gain degradation at low dose rate[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1994, 41(6): 1871–1883
- 14 Rashkeev S N, Cirba C R, Fleetwood D M, *et al.* Physical model for enhanced interface-trap formation at low dose rate[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2002, 38(6): 2650–2655
- 15 Hjalmarson H P, Pease R L, Witczak S C, *et al.* Mechanisms for radiation dose-rate sensitivity of bipolar transistors[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2003, 50(6): 1901–1909

Radiation effect of 12-bit BiCMOS ADC at different dose rates

WU Xue^{1,2,3} LU Wu^{1,2} WANG Yiyuan^{1,2,3} XU Jialing^{1,4} ZHANG Leqing^{1,2,3}
LU Jian^{1,2,3} YU Xin^{1,2,3} HU Tianle^{1,4}

1 (Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

2 (Xinjiang Key Laboratory of Electronic Information Material and Device, Urumqi 830011, China)

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

4 (Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract Radiation effects and room-temperature annealing behaviors of BiCMOS ADC (AD678) irradiated by ^{60}Co γ -rays at dose rate of 0.1 and 2×10^{-4} Gy/s, respectively, are investigated in this paper. The results show that the device's responses in the sensitive parameters to the dose rates differ distinctly. Big differences occur in radiation effects between analog power supplying current and digital power supplying current. The parameters DNL, INL and Misscode are more sensitive to low dose rate, exhibiting enhanced-low-dose-rate-sensitivity. The damage mechanism of this special response was discussed combining the process and space charge model.

Key words BiCMOS, ADC, Dose-rate, ^{60}Co γ radiation

CLC TN431, TN792