

双极集成电路低剂量率辐射损伤增强效应的 高温辐照加速实验*

刘敏波, 陈 伟, 姚志斌, 黄绍艳, 何宝平, 盛江坤, 肖志刚, 王祖军

(西北核技术研究所 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024)

摘 要: 选择了四种典型双极集成电路, 在两种不同剂量率下, 开展了不同温度的高温辐照加速实验, 测量了典型双极集成电路的辐射敏感参数在不同高温辐照下的变化规律。实验结果表明: 高温辐照能够给出空间低剂量率辐射损伤增强效应的保守估计, 且存在最佳辐照温度, 最佳辐照温度随总剂量的增加向低温区漂移, 随剂量率的增大向高温区漂移, 在相同剂量率和总剂量下, 输入级为 NPN 晶体管的双极集成电路比输入级为 PNP 晶体管的最佳辐照温度低。

关键词: 双极集成电路; 低剂量率; 高温辐照; 界面态

中图分类号: TN432; TN722

文献标志码: A

doi:10.3788/HPLPB201426.034003

双极器件及双极集成电路在受到低剂量率辐照时的损伤大于高剂量率辐照后的损伤, 这就是所谓的低剂量率辐射损伤增强效应(ELDRS)^[1-2]。目前对星用器件空间总剂量效应考核广泛采用的是 50~300 rad(Si)/s 剂量率, 而实际的空间典型剂量率范围为 $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-2}$ rad(Si)/s, 对于具有低剂量率辐射损伤增强效应的双极器件来说, 目前的地面模拟试验考核方法将会高估电子元器件在实际空间环境下的抗总剂量水平^[3-5]。因此, 如何在实验室条件下开展辐照实验来模拟双极器件在实际空间环境中的总剂量效应, 是目前急待解决的现实问题。最直接的方法是开展低剂量率辐照实验, 但这种方法耗时太长, 以 10^{-3} rad(Si)/s 的剂量率为例, 要辐照到 100 krad(Si) 总剂量水平, 辐照时间长达 38 个月。因此必须探索低剂量率辐射损伤增强效应的加速实验方法, 这也是国外 20 世纪 90 年代后期以来总剂量研究工作的重点之一。最新的美军标^[6]中推荐了五种低剂量率加速模拟实验方法, 分别为: 室温低剂量率(大于 0.01 rad(Si)/s)辐照、高温辐照、高剂量率辐照后高温退火、变剂量率辐照、其他加速方法。高温辐照是目前美军标重点推荐的加速实验方法, 具有极大的适用性, 该方法的关键是高温辐照温度及辐照剂量率的选取, 但美军标中只给出了方法, 没有给出具体的操作步骤以及辐照温度和辐照剂量率的选取方法。本文以空间应用的典型双极集成电路为研究对象, 开展了高温加速辐照模拟试验, 证明了高温辐照模拟空间低剂量率辐照损伤的可行性, 研究了高温辐照的辐照温度、辐照剂量率及总剂量之间的关系。

1 实验样品和实验方法

实验选取了卫星常用且国外文献报道低剂量率增强效应明显的三种双极运算放大器和一种双极比较器作为实验样品, 详见表 1。

表 1 实验选用的双极集成电路

Table 1 Bipolar integrated circuit (IC) used in the experiment

type	function	lot code	input stage	channels	manuf.	package
LM101AJ	operational amplifiers	XH020ED	VNPN	1	NSC	J08A
LM124J	low power quadruple operational amplifiers	H0932	SPNP	4	NSC	J14A
LM158J	low power dual operational amplifiers	H0831	SPNP	2	NSC	J08A
LM111J-8	voltage comparator	H0810	SPNP	1	NSC	J08A

辐照实验在西北核技术研究所⁶⁰Co γ 源上进行, 辐照样品放置于 Pb/Al 屏蔽盒内, 以防止低能散射光子对实验造成的影响。为研究不同剂量率下高温辐照造成的损伤规律, 选取了两种辐照剂量率, 并且两种剂量率下的损伤要有明显差异, 且实验时间不要太长。首先根据国外高温加速试验结果, 高温加速试验剂量率应该选

* 收稿日期: 2013-05-27; 修订日期: 2013-11-14

作者简介: 刘敏波(1982—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事辐照效应研究工作; liuminbo2008@aliyun.com。

取 $1\sim 5\text{ rad(Si)}/\text{s}$, 根据我们的试验条件选取 $2.14\text{ rad(Si)}/\text{s}$, 选择 $50, 75, 87, 100, 125, 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 六个温度分别进行高温辐照, 辐照最大总剂量 100 krad(Si) , 分别在辐照达到 $10, 30, 50, 70, 100\text{ krad(Si)}$ 时进行离线参数测试; 其次在目前考核常用剂量率 $50\sim 300\text{ rad(Si)}/\text{s}$ 之间, 根据我们的试验条件选取 $56\text{ rad(Si)}/\text{s}$ 剂量率, 选择 $50, 75, 100, 125, 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 五个温度分别进行高温辐照, 因为双极器件高剂量率辐照损伤要弱于低剂量率, 因此高剂量率辐照选择较大总剂量 200 krad(Si) , 分别在辐照达到 $30, 70, 100, 150, 200\text{ krad(Si)}$ 时进行离线参数测试。因为全部管脚短接接地是双极集成电路的 γ 辐照最劣偏置, 因此选择的辐照偏置为全部管脚短接接地。

辐照后对电路进行降温处理, 将电路冷却至室温进行参数测试, 冷却和测试在辐照之后 40 min 之内完成, 符合国军标 1 h 辐照后测试时间要求。辐射后参数测试采用 BJ3197 集成运放参数测试仪, 测试的参数主要有: 输入电流 I_{cc} 、输入偏置电流 I_{b} 、输入失调电压 V_{os} 、共模抑制比 (CMRR) 等。

2 试验结果

实验前, 对实验样品进行了筛选, 选择功能参数正常, 且偏置电流的一致性在 10% 以内的电路进行实验, 各型号电路在每种剂量率和每种温度下各选 3 只样品, 实验后对 3 只电路的测试结果进行了平均处理。对于双极运算放大器和比较器电路, 在辐照测试的所有参数中, 输入偏置电流对电离辐射最敏感, 因此给出的测试数据和讨论分析主要针对输入偏置电流 I_{b} 。

图 1(a)~(d) 为典型双极电路的偏置电流 I_{b} 的变化量 ΔI_{b} 在剂量率 $2.14\text{ rad(Si)}/\text{s}$ 、不同辐照温度下的变化规律; 图 1(e)~(h) 为典型双极电路的偏置电流 I_{b} 的变化量 ΔI_{b} 在剂量率 $56\text{ rad(Si)}/\text{s}$ 、不同辐照温度下的变化规律。图中实线为实验数据拟合而成, 拟合函数选取高斯函数: $y = p_1 + p_2 \exp[-p_3(x - p_4)^2]$, \star 标记对应拟合曲线的最高点。可以看出随着辐射总剂量的增加 ΔI_{b} 逐渐增大, 在相同总剂量下, $2.14\text{ rad(Si)}/\text{s}$ 剂量率下的辐射损伤大于 $56\text{ rad(Si)}/\text{s}$ 下的辐射损伤, 且在不同温度下 ΔI_{b} 增大的幅度不同。对实验数据的拟合曲线除了 LM111 在 $56\text{ rad(Si)}/\text{s}$ 剂量率下没有最高峰值出现外, 其他几种电路在两种不同剂量率和相同总剂量下的 ΔI_{b} 随不同辐照温度都有一个最高峰, 即高温辐照下存在一个损伤的最大值, 这个最大值所对应的温度称为最佳辐照温度。因为高温辐照只能是对低剂量率效应的保守预估, 所以一般情况下高温辐照考核实验温度的选取要尽量靠近最佳辐照温度。

图 1(h) 中 LM111 在 $56\text{ rad(Si)}/\text{s}$ 剂量率高温辐照的结果没有出现最高点, 是因为此时的损伤最大值对应的温度在 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近, 或高于 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, 已经大于实验的最高温度。

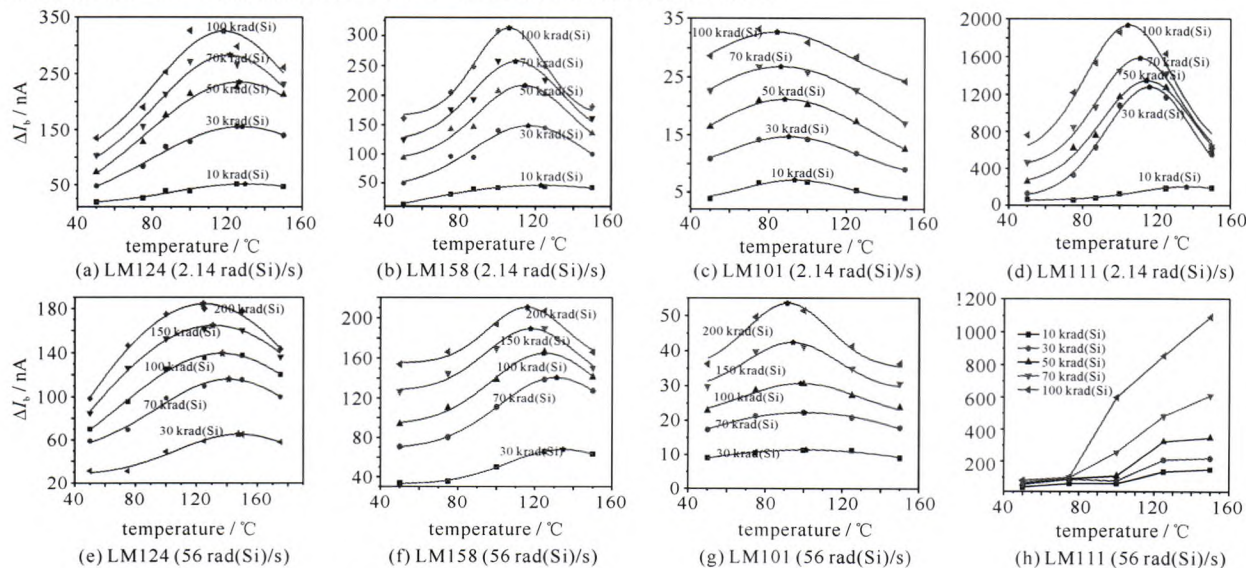


Fig. 1 Increase in input bias currents vs irradiation temperature

图 1 输入偏置电流在不同辐照温度下的变化

根据国外卫星在轨测试结果, 双极电路的实际效应跟 $0.01\sim 0.001\text{ rad(Si)}/\text{s}$ 剂量率地面辐照结果一致。但 2008 年美国喷射推进实验室 (JPL) 依据在轨卫星的剂量率变化情况模拟了空间总剂量环境, 测试结果处于

0.02~0.2 rad(Si)/s 之间,可见国外对选取何种剂量率开展实验才能真实代表空间效应仍无一致结论^[4-5]。因此,本文的研究过程中暂时以低剂量率 0.03 rad(Si)/s 下的实验数据作为空间真实情况数据。

图 2(a)~(d)是几种实验样品在不同剂量率下,高温辐照与 0.03 rad(Si)/s 低剂量率实验结果的比较。从图中可以看出,对电路 LM158,LM111,LM101 和 LM124,按照 2.14 rad(Si)/s 剂量率,高温下进行加速辐照实验,得到的输入电流 I_b 的变化要高于低剂量率 0.03 rad(Si)/s 常温时的实验结果,因此选取 2.14 rad(Si)/s 剂量率和合适的温度能够给出空间低剂量率效应的保守估计。

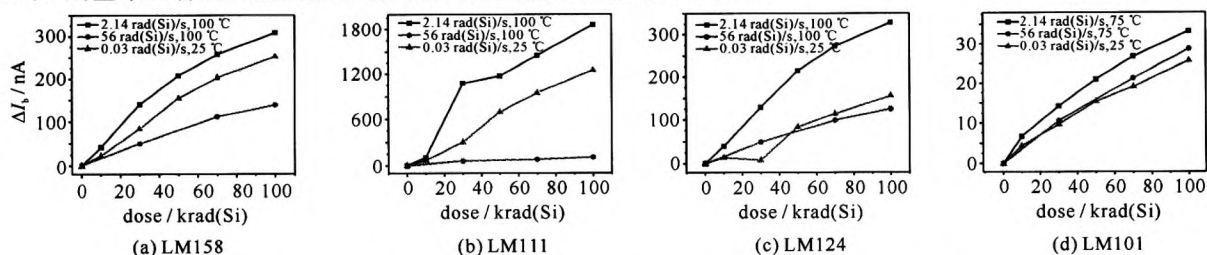


Fig. 2 Increase in input bias current vs total dose at different temperature and dose rate

图 2 不同温度不同剂量率下输入偏置电流随总剂量的变化

3 讨论

对图 1 所示典型双极集成电路输入偏置电流 I_b 在不同辐照温度下的变化结果进行分析,可以得到以下几个关系。

3.1 辐射损伤与辐照温度的关系

由图 1 可以看出,双极运算放大器和比较器电路总剂量敏感参数 I_b 的辐射损伤跟辐照温度有着密切的关系。因为偏置电流 I_b 的效应主要是由运算放大器和比较器输入级晶体管的总剂量效应引起的,所以这一关系可以用双极器件 ELDRS 的空间电荷模型来解释^[7-11];与场效应管(MOS)器件不同,双极器件的氧化层处于弱场之中,因此容易受辐照产生的空间电荷场所影响,高剂量率下会在双极晶体管氧化层中形成比较强的空间电场,而低剂量率下形成的空间电场比较弱或不能建立,这也是造成低剂量率辐射增强效应的关键。而适当的温度会增加晶体管氧化层浅能级陷阱被热激发的几率,从而使空间电场减弱或难以形成,致使更多的空穴和 H^+ 可以到达 Si-SiO₂ 界面附近,形成正的氧化物陷阱电荷及界面态陷阱,从而加速了电路参数的退化。但当温度增大到一定程度时,氧化物陷阱电荷和在 Si-SiO₂ 界面附近被深能级陷阱所俘获的空穴有更高的几率热激发,界面态陷阱也会与 H^+ 相互作用而发生钝化,从而使电路的损伤变弱。因此,随温度的升高氧化物陷阱电荷及界面态陷阱的增加和退火是一个竞争的关系,在辐射损伤的最高点之前,氧化物陷阱电荷及界面态陷阱的生成大于氧化物陷阱电荷及界面态陷阱的退火,在最高点之后,氧化物陷阱电荷及界面态陷阱的退火大于氧化物陷阱电荷及界面态陷阱的生成,而当辐照温度满足氧化物陷阱电荷及界面态的增加和退火相平衡时,电路辐射损伤最严重。因此在最大辐照损伤退化点所对应的温度为最佳辐照温度,因为此时高温辐照加速的效率最高。

3.2 最佳辐照温度与总剂量的关系

图 3 为两种剂量率下最佳辐照温度随总剂量的变化曲线,可以看出在两种剂量率下,随电路辐照总剂量的增加,最佳辐照温度不断减小。导致这一现象的物理机制与双极器件界面态陷阱密度对界面态陷阱退火温度的影响有关。有研究表明,界面态陷阱的退火温度随它的浓度增大而减小^[12-13]。这也就是说在辐照环境中,随辐照总剂量的增大双极器件 Si-SiO₂ 界面处的界面态陷阱浓度会逐渐增大,因而界面态陷阱的退火温度会随总剂量的增大而减小,导致在相同温度时,高总剂量与低总剂量下相比界面态陷阱的退火率增加,从而使最佳辐照温度随辐照总剂量的增加向低温区漂移。

3.3 最佳辐照温度与辐照剂量率的关系

从图 3 还可以看出,在相同总剂量时,剂量率越高,高温辐照的最佳辐照温度也越高。这是因为剂量率越高,同一时刻双极器件氧化层内产生的电子-空穴对越多,使得有更多的空穴被氧化层中的浅能级陷阱所俘获,更容易形成空间电场,阻止空穴与 H^+ 向界面的输运。而高温会提高被浅能级俘获空穴的热激发几率,当单位时间自由空穴被浅能级陷阱俘获的几率小于被浅能级俘获空穴热激发的几率时,空间电场将无法建立。剂量率越高,空穴被浅能级陷阱俘获的几率越大,因此为了使高温辐照达到加速的效果,必须提高被浅能级俘获空

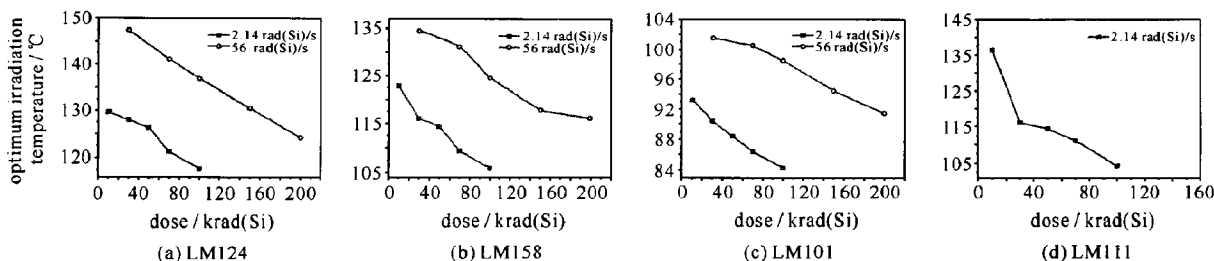


Fig. 3 Optimum irradiation temperature vs total dose

图 3 最佳辐照温度随总剂量的变化

穴热激发的几率,即提高辐照温度。

3.4 输入级为 NPN 和 PNP 型晶体管的双极电路最佳辐照温度的差异

实验样品中,LM101 是输入级为 NPN 晶体管的双极集成电路,而 LM158,LM124,LM111 的输入级均是 SPNP(Substrate PNP)晶体管。图 4 给出了几种电路在剂量率为 2.14 rad(Si)/s 下得到的最佳辐照温度的比较。可以看出,输入级为 NPN 的 LM101 的最佳辐照温度整体比其他电路低 20~30 °C。导致这一现象的原因与双极比较器和双极运放的输入级晶体管的总剂量效应差异有关^[14]。输入级为 NPN 晶体管的总剂量效应使 P 型基区耗尽,氧化物陷阱电荷与界面态陷阱相互调制、相互增强造成 NPN 管的辐射损伤。而输入级为 SPNP 或 LPNP(Lateral PNP)晶体管,其 N 型基区在辐射过程中积累,使得氧化物陷阱电荷与界面态对辐射损伤的作用是相互抵消的。因此对于 NPN 管,高温使氧化物陷阱电荷退火的同时也削弱了界面态陷阱对辐射损伤的作用。而 PNP 管的氧化物陷阱电荷退火反而使界面态作为复合中心的作用更为明显,只有在界面态陷阱退火时,其效应损伤才有可能变小。而根据部分国外文献报导,界面态陷阱的退火温度(大于 100 °C)一般都要高于氧化物陷阱电荷的退火温度。从而导致输入级为 NPN 的双极集成电路的最佳辐照温度更低。

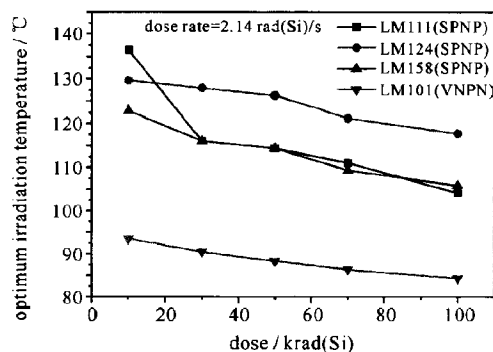


Fig. 4 Optimum irradiation temperature of various circuits under test

图 4 不同电路的最佳辐照温度比较

4 结 论

本文通过开展典型双极集成电路的低剂量率辐射损伤增强效应的高温加速辐照实验研究,发现双极集成电路的总剂量效应对温度非常敏感,高温能增强总剂量效应,但温度过高也会使效应减弱。根据实验结果得到以下结论:(1)一定的考核总剂量下,选取合适的温度和剂量率,采用高温辐照加速实验方法能够保守预估空间低剂量率辐射效应;(2)一定的剂量率和总剂量,不同辐照温度下双极集成电路的电离辐射损伤存在最大值,这个最大值所对应的温度为最佳辐照温度;(3)双极集成电路的最佳辐照温度随总剂量的增加,向低温区漂移,随剂量率的增加向高温区漂移,且相同剂量率和总剂量下,输入级为 NPN 比输入级为 PNP 的双极集成电路的最佳辐照温度低,对于本文研究的双极器件,要低 20~30 °C。

参考文献:

- [1] Enlow E W, Pease R L, Combs W E, et al. Response of advanced bipolar processes to ionizing radiation[J]. *IEEE Trans on Nuclear Science*, 1991, **38**(6):1342-1351.
- [2] Pease R L, Schrimpf R D, Fleetwood D M, et al. ELDRS in bipolar linear circuits: A review[J]. *IEEE Trans on Nuclear Science*, 2009, **56**(4):1894-1908.
- [3] Johnston A H, Swift G M, Rax B G, et al. Total dose effects in conventional bipolar transistors and linear integrated circuits[J]. *IEEE Trans on Nuclear Science*, 1994, **41**(6):2427-2436.
- [4] Turflinger T L, Schemichel W M, Krieg J F, et al. ELDRS in space: An updated and expanded analysis of the bipolar ELDRS experiment on MPTB[J]. *IEEE Trans on Nuclear Science*, 2003, **50**(6):2328-2334.
- [5] Harris R D, McClure S S, Rax B G, et al. TID effects in space-like variable dose rate[J]. *IEEE Trans on Nuclear Science*, 2008, **55**(6):

3088-3095.

- [6] MIL-STD-883-H. Test Method 1019. 8, Ionizing Radiation (Total Dose) Test procedure[S].
- [7] 陈盘训. 半导体器件和集成电路的辐射效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005. (Chen Panxun. Radiation effects on semiconductor devices and integrated circuits. Beijing: National Defense Industry Press, 2005)
- [8] Carriere T, Ecoffet R, Poirot P, et al. Evaluation of accelerated total dose testing of linear bipolar circuits[J]. *IEEE Trans on Nuclear Science*, 2000, **47**(6):2350-2357.
- [9] Pease R L, Gehlhausen M. Elevated temperature irradiation of bipolar linear microcircuits[J]. *IEEE Trans on Nuclear Science*, 1996, **43**(6):3161-3166.
- [10] Graves R J, Cirba C R, Schrimpf R D, et al. Modeling low-dose rate effects in irradiated bipolar-base oxides[J]. *IEEE Trans on Nuclear Science*, 1998, **45**(6):2352-2360.
- [11] Witczak S C, Lacoe R C, Mayer D C, et al. Space charge limited degradation of bipolar oxides at low electric fields[J]. *IEEE Trans on Nuclear Science*, 1998, **45**(6):2339-2351.
- [12] Fleetwood D M, Thome F V, Tsao S S, et al. High-temperature SOI electronics for space nuclear power systems: Requirements and feasibility[J]. *IEEE Trans on Nuclear Science*, 1988, **35**(5):1099-1113.
- [13] 何宝平, 王桂珍, 龚建成, 等. 空间低剂量率辐射诱导电荷效应评估技术研究[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(3):275-278. (He Baoping, Wang Guizhen, Gong Jiancheng, et al. Estimating research on space low dose rate radiation-induced charge effects. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(3):275-278)
- [14] Hjalmarson H P, Pease R L, Witczak S C, et al. Mechanisms for radiation dose-rate sensitivity of bipolar transistors[J]. *IEEE Trans on Nuclear Science*, 2003, **50**(6):1901-1909.

Accelerated test of enhanced low dose rate sensitivity using elevated temperature irradiation

Liu Minbo, Chen Wei, Yao Zhibin, Huang Shaoyan, He Baoping, Sheng Jiangkun, Xiao Zhigang, Wang Zujun
(State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of
Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: Four types of bipolar integrated circuits were irradiated at different elevated temperature with two different dose rates, after that, the corresponding sensitive parameters were extracted and analyzed. The results prove that elevated temperature irradiation could provide a conservative estimation for the radiation damage at low dose rate when the optimum irradiation temperature is selected. The optimum irradiation temperature increases with the dose rate but decreases with the total dose. With the same total dose and dose rate, the optimum irradiation temperatures of bipolar integrated circuits with NPN input stage are lower than those with PNP input stage.

Key words: bipolar integrated circuit; low dose rate; elevated temperature irradiation; interface state

PACS: 85.30.Pq; 61.80.Ed; 61.80.Jh