

不同参数对静态随机存储器总剂量效应的影响

张付强¹ 陈启明¹ 龚艺豪¹ 肖舒颜¹ 张铮¹ 马旭¹
赵树勇¹ 郑宏超² 张健鹏² 郭刚¹

¹(中国原子能科学研究院国防科技工业抗辐照应用技术创新中心 北京 102413)

²(北京微电子技术研究所 北京 100076)

摘要 基于中国原子能科学研究院钴源建立的器件总剂量辐照装置试验平台,开展了静态随机存储器(SRAM)的总剂量效应研究。分别研究了器件特征工艺尺寸、累积辐照剂量、辐照剂量率以及温度对器件总剂量效应的影响。研究表明:在一定范围内剂量率对器件的总剂量效应影响不大,器件特征工艺尺寸越大总剂量效应的影响越大,温度越高总剂量效应影响越弱。此外还测量得到了该总剂量辐照实验平台的典型剂量率分布及均匀性。相关结果为宇航、核工业用电子器件抗辐射加固设计提供了一定的参考。

关键词 静态随机存储器,总剂量效应,功耗电流,特征尺寸

中图分类号 TN47

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0120

引用该文:

张付强,陈启明,龚艺豪,等.不同参数对静态随机存储器总剂量效应的影响[J].辐射研究与辐射工艺学报,2023,41(6):060703. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0120.

ZHANG Fuqiang, CHEN Qiming, GONG Yihao, *et al.* Impact of different parameters on the static random access memory under the total ionizing dose[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2023, 41(6): 060703. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0120.



Impact of different parameters on the static random access memory under the total ionizing dose

ZHANG Fuqiang¹ CHEN Qiming¹ GONG Yihao¹ XIAO Shuyan¹ ZHANG Zheng¹ MA Xu¹
ZHAO Shuyong¹ ZHENG Hongchao² ZHANG Jianpeng² GUO Gang¹

¹(National Innovation Center of Radiation Application, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

²(Beijing Institute of Microelectronics Technology, Beijing 100076, China)

ABSTRACT The effect of the total ionizing dose (TID) on the static random access memory (SRAM) is conducted on the ⁶⁰Co radioactive source in the China Institute of Atomic Energy. The study explores the influence of the device process size, dose rate, temperature and total dose on TID. The results indicated that within a certain range, the dose rate had little influence on the TID of the device. The larger the characteristic size of the device, the greater TID effect, while the higher temperature, the weaker the total dose effect. In addition, the typical dose rate and the uniformity of the source are achieved. The research of the paper provide an insight into radiation hardening,

第一作者:张付强,男,1989年12月出生,2016年于北京师范大学获博士学位

通信作者:郭刚,研究员, E-mail: ggg@ciae.ac.cn

收稿日期:初稿 2022-11-08; 修回 2023-02-12

First author: ZHANG Fuqiang (male) was born in December 1989, and obtained his doctoral degree from Beijing Normal University in 2016

Corresponding author: GUO Gang, professor, E-mail: ggg@ciae.ac.cn

Received 08 November 2022; accepted 12 February 2023

particularly in the aerospace and the nuclear industries.

KEYWORDS Static random access memory, Total dose effect, Power supply current, Feature size

CLC TN47

航天器及核工业装备运行在辐射环境中，其电子器件将面临辐射效应的影响。辐射效应不仅有可能导致器件功能退化或者数据出错，甚至有可能导致其损毁^[1]。航天器所面临的辐射环境通常由银河宇宙射线、太阳宇宙射线以及地磁场俘获带所组成，粒子的主要成分为重离子、质子以及电子。核工业装备所面临的辐射环境通常由人造放射源或天然放射源所组成，粒子的主要成分为中子和光子^[2]。总剂量效应作为辐射效应的一种，是航天及核工业电子器件面临的共同威胁^[3-5]。

总剂量效应是指带电粒子入射到器件氧化层后经过电离作用产生电子空穴对，由于空穴迁移率远低于电子，使得电子被扫出氧化层而空穴则在电场的作用下进行漂移^[6-7]。当其到达Si-SiO₂界面后，被陷阱态俘获变为正空间电荷，同时在Si-SiO₂界面产生辐照感生界面态。氧化物陷阱电荷的产生将会导致器件阈值电压的负向漂移，引发N沟道晶体管的漏电流增加，最后影响器件的工作状态及性能。因此，开展器件的总剂量效应研究、探究各因素对效应的影响，对提高器件的抗辐射能力显得非常重要^[8-10]。

中国原子能科学研究院核物理所辐射效应研究团队针对其特点开展了器件总剂量辐照适应性改造，测量了辐照场分布，设计了根据剂量率样品自动定位装置。本研究是该装置完成改进后的首次器件辐照实验，不仅验证了该装置开展大规模用户辐照实验的能力，更将为揭示器件总剂量效应影响因素及规律提供参考。

1 材料与方法

1.1 器件

选取3款CMOS工艺静态随机存储器(SRAM)作为实验器件，分别是北京微电子技术研究所生产的28 nm非加固SRAM(型号28SRT)、容量128 kbit，65 nm非加固SRAM(型号M328C)、容量1 Mbit，180 nm非总剂量加固SRAM(型号B8R512K8 ARH)，容量4 Mbit。

1.2 方法

实验主要在中国原子能科学研究院钴源辐照装置上进行，实验所用待测芯片固定于专用测试板上，不同待测器件由稳压电源提供不同的工作电压，辐照实验过程中将所有器件额定工作电压上浮10%作为工作电压进行测试，稳压电源同时监测器件的静态功耗电流，整体测试布局如图1所示。稳压电源型号为KEYSIGHT N6705C，其可同时提供电压输出、电流监测及过流保护功能。



图1 器件总剂量辐照实验现场图
Fig.1 Picture of the device under ⁶⁰Co irradiation

为降低器件退火效应的影响，器件分批次进行辐照。为保证芯片的安全且方便测试，器件辐照的累计总剂量不完全一致。其中180 nm SRAM采取剂量率0.4 Gy/s辐照至3 000 Gy，然后采用剂量率0.25 Gy/s辐照至4 000 Gy；65 nm SRAM采取剂量率0.4 Gy/s辐照至3 000 Gy，然后采用剂量率0.25 Gy/s辐照至5 000 Gy；28 nm SRAM采取剂量率0.4 Gy/s辐照至3 000 Gy，然后采用剂量率0.25 Gy/s辐照至6 000 Gy。器件完成总剂量辐照后将28 nm SRAM取出放置于干冰中保存，随后利用半导体参数测试台对器件的各项功能进行测试，通过写入和读出棋盘格数据观察辐照后的器件电流变化。辐照结束到动态测试开始前中间时间间隔约14 h，符合国军标GJB 762.2-1989^[11]对器件总剂量辐照时间间隔要求。在温度对器件总剂量影响的实验中，选取国产苏珀CZ0001电热恒温鼓风箱进行温度的控制。

钴源总剂量辐照装置典型剂量率范围及不均匀度采取PTW伽马标准电离室和剂量胶片进行测试

量。其中PTW伽马标准电离室作为在线实时测量工具对典型剂量率范围进行测量。剂量胶片对不均匀度进行测量,测量过程中将25 cm×25 cm辐照区域分割成4×4共16个方格,每个方格的中心放置剂量胶片进行离线测量,辐照完成后对剂量胶片的灰度进行校准得到每个区域的辐照剂量,不均匀度由公式(1)得到。

$$\sigma(R) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R 表示剂量分布的不均匀度; n 表示测量范围内的点数; x_i 表示某测量点的剂量; \bar{x} 表示 n 个测量点的剂量率平均值。

2 结果与讨论

2.1 器件静态功耗电流

图2所示分别为180 nm以及65 nm SRAM随着累积剂量和剂量率变化的静态功耗电流曲线。从图2(a)可以看到,随着累积剂量的不断上升,180 nm SRAM静态功耗电流呈现指数上升的趋势,当累

积剂量达到3 000 Gy时,器件的静态功耗电流是未辐照时电流的63倍,当钴源降下后,器件在短时间内出现较为明显的退火效应,然而静态功耗电流仍是未辐照时的5.7倍。当钴源从水池中升起后,改变辐照剂量率,器件静态功耗电流仍然呈现指数增长。指数拟合函数显示0.4 Gy/s剂量率下静态工作电流增长曲线幂指数为4.3,0.25 Gy/s下对应幂指数为4.98,没有出现显著差异,可知在该剂量率范围内的变化对器件的总剂量响应影响不大。图2(b)显示,65 nm SRAM随着累积剂量的增加显示出与180 nm SRAM不同的响应曲线。可以看到,当累积剂量增加到约1 000 Gy时,器件的静态功耗电流为未辐照前的1.85倍,器件的静态功耗电流此时从指数增长曲线转变为类直线曲线,累积剂量的增加对器件的静态功耗电流影响不大。当钴源降下后器件也未出现明显的退火效应,改变辐照剂量率后随着累积剂量的增加,器件的静态功耗电流也未出现显著增加,显示65 nm SRAM器件在1 000 Gy后出现饱和现象,出现该现象的主要原因可能是制造工艺出现偏差导致,更深层次原因值得在后续研究中采取综合手段剖析。

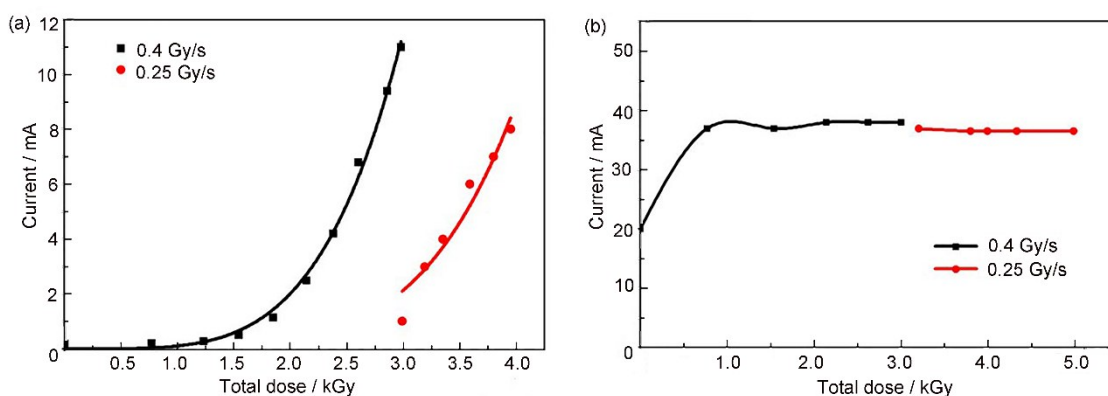


图2 不同累积剂量和剂量率下的SRAM静态功耗电流:(a)180 nm;(b)65 nm
Fig.2 Static power current of the SRAM under different total doses and dose rates: (a) 180 nm; (b) 65 nm

图3(a)所示为28 nm SRAM器件在不同累积剂量和剂量率下的静态功耗电流变化,其增长曲线也基本符合指数增长规律。当累积剂量达到3 000 Gy时,器件的静态功耗电流为未辐照时的21.7倍。当源降下后仍然出现了较为明显的退火效应,静态功耗电流明显下降。改变辐照剂量率后,器件静态功耗电流仍然稳步上升。采取指数拟合曲线得到的4种不同颜色曲线的幂分别为2.00、2.08、1.89、2.10,基本没有出现大的差别,显示出在该剂量率范围内对

器件的总剂量效应没有影响。器件辐照过程中的静态功耗电流出现断点的主要原因在于,为方便将辐照的器件取出将钴源降下,该器件属于对辐照剂量率较为敏感的器件,静态功耗电流稍有下降,当钴源提升后,静态功耗电流迅速恢复到原始值。排除65 nm SRAM器件静态功耗电流出现饱和的影响,由图3(b)可以看出,在相同辐照剂量条件下,器件特征工艺尺寸越大受到总剂量效应的影响也越大,与国际上的研究结果相符^[12]。

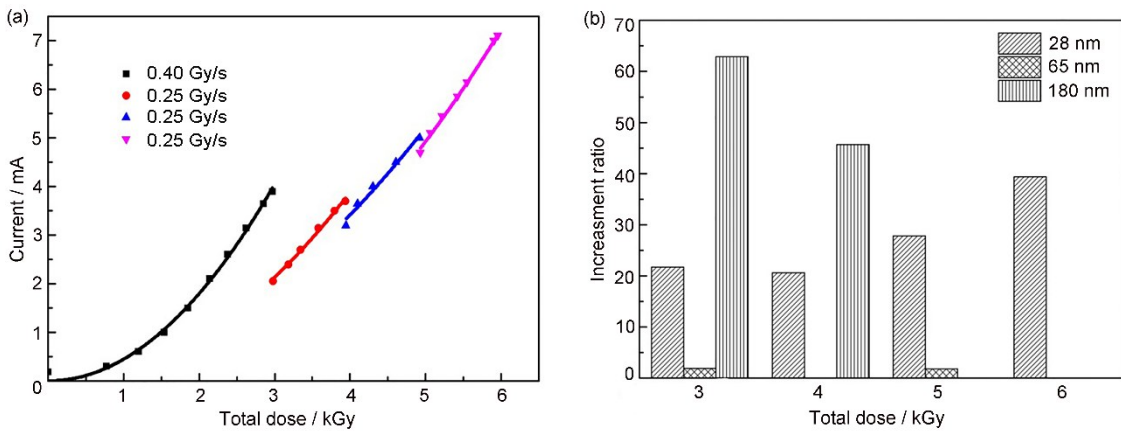


图3 (a)28 nm SRAM不同累积剂量和剂量率下的静态功耗电流;(b)不同器件在不同剂量下的静态功耗电流增长倍数
Fig.3 (a) Statical power current of the 28 nm SRAM under different total doses and dose rates; (b) increasment ratio of the device under different doses

2.2 器件动态功耗电流及温度影响

器件完成辐照及在线测试后,利用测试台测试器件的详细信息。图4所示为28 nm SRAM在不同辐照剂量下的动态功耗电流。从图4可以看到,该器件动态功耗电流随着辐照剂量的增加也呈现出与静态功耗电流类似的上升趋势。显示器件在辐照后无论出于静态还是动态工作状态,性能都出现了退化。此外测试信息还显示该器件在6 000 Gy辐照范围内各管脚及器件功能完全正常,没有出现功能性的错误。

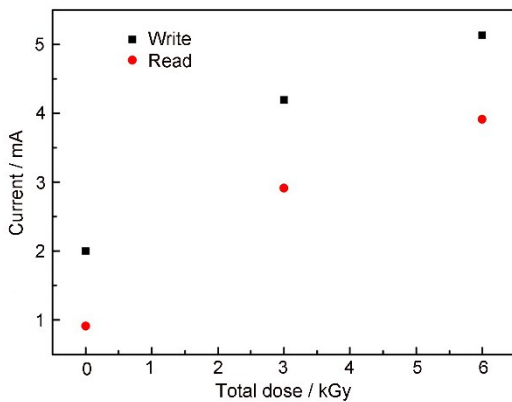


图4 28 nm SRAM辐照前后动态功耗电流
Fig.4 Dynamic current of the 28 nm SRAM with and without the radiation

针对器件功耗电流显著上升和显著下降的现象,由于SRAM器件的功耗电流主要来自于栅氧结构上的N沟道阈值电压负向漂移导致沟道截止产生漏电流以及N沟道边缘寄生晶体管导致的结构漏电。在辐照过程中,栅氧和场氧中的氧化物陷阱电荷大量累积,导致上述两种漏电流迅速增大,最终

表现在功耗电流的迅速增加。本实验中的180 nm和28 nm SRAM器件出现迅速退火效应的主要原因:可能这两款器件对于辐照非常敏感,退火条件下氧化物正电荷迅速消失,使得N沟道耗尽层反形快速恢复,同时寄生N沟道氧漏电流也迅速降低最终使得器件静态功耗电流迅速降低。

从图5可以看出,温度越高器件的静态功耗电流越低,对应着器件受到的影响越小。根据空穴理论,温度越高空穴由于热发射逃逸出陷阱的越多,使得固定电荷浓度降低,界面态浓度增加。对于MOS器件来说,固定电荷为正,界面态电荷为负,所以在STI场氧区的总正电荷浓度降低,使得漏电流降低。

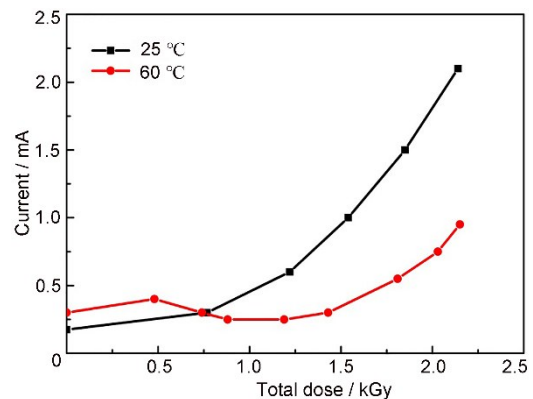


图5 温度对器件总剂量效应的影响
Fig.5 Influence of the temperature on the TID

2.3 总剂量辐照平台参数

γ 标准电离室测量距离源不同距离处的 γ 剂量率数据如图6所示。随着与源距离的增加, γ 剂量

率迅速下降。测量得到的典型数据显示, 在距离 0.36~5.38 m、测量面积为 25 cm×25 cm 范围内, 其剂量率从 935.0 Gy/h 降低到 28.64 Gy/h。同时可以看出, 距离源距离越近, 其剂量率分布不均匀度越高。在距离源半径 1.5 m 范围后不均匀度约为 3.2%, 小于宇航器件对钴源辐照不均匀度 10% 的要求, 验证了该钴源辐照试验装置具备开展总剂量辐照实验的能力。

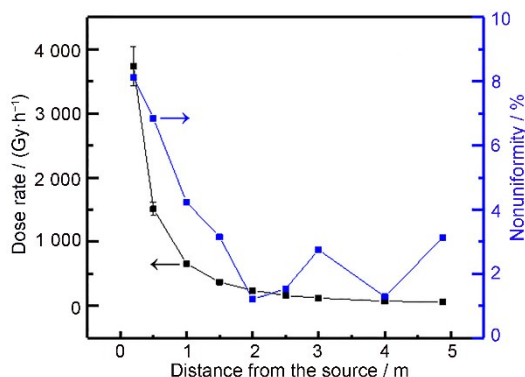


图6 钴源辐照装置典型剂量率分布及不均匀度 (彩色见网络版)

Fig.6 Typical dose rate and the nonuniformity of the source (color online)

3 结论

基于中国原子能科学研究院钴源开展的器件总剂量效应实验表明, 对于 SRAM 器件, 一定范围内的剂量率变化对器件的总剂量效应影响不大。器件受总剂量效应的影响随器件特征工艺尺寸的增加而增加。温度越高总剂量效应影响越弱。同时, 该实验还验证了基于该钴源装置建设的器件辐照实验效应平台具备开展器件辐照实验的能力。

作者贡献声明 张付强设计并开展了实验, 进行了实验数据分析并撰写和修改了文章; 陈启明参与设计了实验; 龚艺豪、肖舒颜、张崢、马旭、赵树勇参与了实验开展; 郑宏超、张健鹏提供了样品, 参与了数据测试; 郭刚指导了整体实验开展。全体作者均已阅读并同意该论文最终的文本。

参考文献

- 1 陈伟, 杨海亮, 郭晓强, 等. 空间辐射物理及应用研究现状与挑战[J]. 科学通报, 2017, **62**(10): 978-989. CHEN Wei, YANG Hailiang, GUO Xiaoqiang, *et al.* The research status and challenge of space radiation physics and application[J]. Chinese Science Bulletin, 2017, **62**

- (10): 978-989.
- 2 李茂顺, 余学峰, 郭旗, 等. CMOS SRAM 总剂量辐射及退火效应研究[J]. 核电子学与探测技术, 2010, **30**(8): 1087-1091. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2010.08.020. LI Maoshun, YU Xuefeng, GUO Qi, *et al.* Research on the total dose irradiation and annealing effects of CMOS SRAM[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2010, **30**(8): 1087-1091. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2010.08.020.
- 3 Sharp R, Decréton M. Radiation tolerance of components and materials in nuclear robot applications[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1996, **53**(3): 291-299. DOI: 10.1016/S0951-8320(96)00054-3.
- 4 Boden A, Kruger W, Muller T. Investigation and improvement of the radiation tolerance of a teleoperated manipulator-equipped vehicle to be used in radioactive environments[C]//RADECS 97. Fourth European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems (Cat. No. 97TH8294). Cannes, France: IEEE, 2002: 319-322. DOI: 10.1109/RADECS.1997.698916.
- 5 Tsitsimpelis I, Talor C J, Lennox B, *et al.* A review of ground-based robotic systems for the characterization of nuclear environments [J]. Progress in Nuclear Energy, 2019, **111**: 109-124. DOI: 10.1016/j.pnucene.2018.10.023.
- 6 董艺, 沈鸣杰, 刘岐. 浮栅器件和普通 NMOS 器件总剂量效应对比研究[J]. 航天器环境工程, 2018, **35**(5): 468-472. DOI: 10.12126/sec.2018.05.011. DONG Yi, SHEN Mingjie, LIU Qi. Comparison of total ionizing dose effect between floating gate device and NMOS device[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2018, **35**(5): 468-472. DOI: 10.12126/sec.2018.05.011.
- 7 殷亚楠, 刘杰, 姬庆刚, 等. 总剂量和重离子协同作用下浮栅单元错误的退火特性研究[J]. 核技术, 2019, **42**(1): 010502. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.010502. YIN Yanan, LIU Jie, JI Qinggang, *et al.* Annealing behavior study on floating gate errors induced by γ followed by heavy ion irradiation[J]. Nuclear Techniques, 2019, **42**(1): 010502. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.010502.
- 8 郭红霞, 王伟, 张凤祁, 等. 新型微电子技术电离辐射总剂量效应面临的挑战[J]. 核电子学与探测技术, 2011, **31**(1): 115-119. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2011.01.028. GUO Hongxia, WANG Wei, ZHANG Fengqi, *et al.*

- Future challenges in total ionizing dose for advanced CMOS technologies[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2011, **31**(1): 115-119. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2011.01.028.
- 9 薛玉雄, 曹洲, 郭祖佑, 等. 星用功率MOSFET器件总剂量效应试验研究[J]. *核电子学与探测技术*, 2008, **28**(3): 538-542. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2008.03.022.
- XUE Yuxiong, CAO Zhou, GUO Zuyou, *et al.* Study of total ionization dose test of power MOSFET for satellite applications[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2008, **28**(3): 538-542. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2008.03.022.
- 10 李明, 余学峰, 许发月, 等. 静态随机存储器总剂量辐射及退火效应研究[J]. *原子能科学技术*, 2012, **46**(4): 507-512.
- LI Ming, YU Xuefeng, XU Fayue, *et al.* Research on total dose irradiation and annealing effect of static random access memory[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2012, **46**(4): 507-512.
- 11 国家军用标准-总装备部. 半导体器件辐射加固试验方法 γ 总剂量辐照试验: GJB 762.2—1989[S]. 北京: 国防科工委, 1989.
- National Military Standards-General Armament Department. Semiconductor device radiation hardening test method γ total dose irradiation test: GJB 762.2—1989 [S]. Beijing: National Defense Science and Technology Commission, 1989.
- 12 Dodd P E, Shaneyfelt M R, Schwank J R, *et al.* Current and future challenges in radiation effects on CMOS electronics[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2010, **57**(4): 1747-1763. DOI: 10.1109/TNS. 2010. 2042613.