

不同粒子辐射条件下 CC4013 器件辐射损伤研究*

李兴冀^{1)†} 刘超铭¹⁾ 孙中亮¹⁾ 兰慕杰²⁾ 肖立伊²⁾ 何世禹¹⁾

1) (哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

2) (哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150001)

(2012年8月19日收到; 2012年9月19日收到修改稿)

本文采用 60 MeV Br 离子、5 MeV 质子和 1 MeV 电子等三种辐射源, 针对 CC4013 型互补金属氧化物半导体器件 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 进行辐射损伤研究. 通过 Geant4 程序计算了该器件电离辐射吸收剂量与芯片厚度的关系, 经过计算, 在相同剂量下, 60 MeV Br 离子的电离吸收剂量最大, 1 MeV 电子产生的电离吸收剂量最小. 应用 Keithley4200-SCS 半导体特性分析仪在原位条件下研究了 CC4013 器件电性能参数随辐射吸收剂量的变化关系. 测试结果表明, 相同电离辐射吸收剂量下, 1 MeV 电子对 CC4013 器件的阈值电压参数影响最大, 5 MeV 质子其次, 60 MeV Br 离子的影响最弱.

关键词: CMOS 器件, 高能带电粒子, 电离辐射, 辐射损伤

PACS: 85.30.Tv, 95.85.Ry, 61.80.-x, 61.80.Az

DOI: 10.7498/aps.62.058502

1 引言

航天器在轨飞行过程中, 电子控制及信息系统承担着控制着航天器件的飞行和与地面保持信息与数据的传送的重要任务, 在这些系统中互补金属氧化物半导体器件 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 被广泛的使用其中, 由于航天器中各种电子元件会与空间各种高能带电粒子 (电子、质子及重离子) 发生交互作用, 产生各种类型的辐射损伤, 因此, 高能带电粒子对电子器件的性能有着强烈的影响^[1,2], 将导致电子元器件的性能退化、功能异常或失灵, 甚至会导致航天器发生灾难性的事故^[3-5].

为了确保航天器在轨长期可靠运行, 就需要减小或避免高能带电粒子辐射对电子器件的破坏性影响, 本文所研究的电子元件是 CMOS4000 系列中的 CC4013 型集成电路, 这种器件对电离辐射效应较为敏感^[6-9], 目前国内外对 CMOS 器件的辐照损伤研究, 多采用在单一辐照源的情况下, 而电子元件在空间环境下会受到各种高能带电粒子辐

照, 因此开展对 CMOS 器件在多种带电粒子辐照效应的研究就有着极其重要的工程意义和理论研究价值.

2 试验器件与试验方法

本实验选用的器件为 CC4013 集成电路, CC4013 为 CMOS4000 系列器件中的一种, 器件功能为双上升沿 D 触发器, 由 2 个具有置位和复位功能的 D 触发器组成. 通常用于数据锁存或控制电路中, 也是组成移位、计数和分频电路的基本逻辑单元.

本文选取不同种类的辐射源进行辐照试验, 辐射条件分别为: 能量为 60 MeV、辐照通量为 3.3×10^7 ions/(cm²·s) 的 Br 离子; 能量为 5 MeV、辐照通量为 3.2×10^{10} p/(cm²·s) 的质子; 能量为 1 MeV、辐照通量为 2.77×10^{11} e/(cm²·s) 的电子. 其中, 1 MeV 电子辐照试验在黑龙江近代物理研究所的高能电子加速器进行, 高能质子及重离子辐照试验在北京大学核物理与技术国家重点试验室的 EN 串列式加速器进行. 辐照束流均有专门装置进行监

* 中央高校基础研究基金 (批准编号: HIT.KLOF.2010003).

† 通讯作者. E-mail: lxj0218@hit.edu.cn

测, 保证束流的准确性和稳定性.

为了使实验所选用的粒子能够不损失能量地直接达到器件芯片, 辐射实验之前, 将受试器件的封装上盖去掉再进行辐照实验, 其电路芯片形貌如图 1 所示. 辐照实验在室温下进行, 辐照实验过程中, 受试器件的所有管脚全部接地. 本试验所有测试参数均采用原位测试, 测试仪器为 Keithley4200-SCS 半导体特性分析仪.

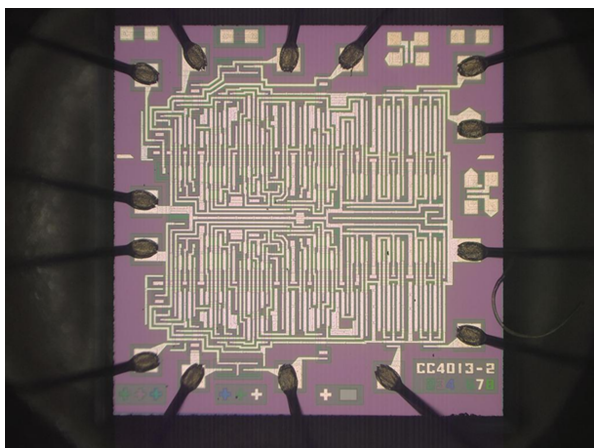


图 1 CC4013 电路芯片形貌

3 辐射吸收剂量计算

在空间辐射环境下工作的电子器件, 会遇到能量范围相当宽的高能带电粒子. 这些高能带电粒子以不同的方式与器件相互作用, 从而产生各种类型的损伤. 空间辐射效应包括电离辐射效应和位移辐射效应. 前者通过打破能带平衡产生电子-空穴对来造成器件损伤, 而后者则使一些靶材原子离开正常晶格位置产生空位或间隙原子造成损伤. CMOS 器件产生电离损伤的能量阈值一般比位移损伤能量阈值要小得多, 因此造成 CC4013 器件性能参数退化的主要形式为电离辐射效应.

为了进一步分析不同种粒子对 CC4013 器件的电离辐射损伤效应, 需要对 CC4013 器件的电离及位移吸收剂量进行计算. 根据文献 [8,9], 粒子辐射造成的电离吸收剂量 D_i 可以用以下的方程来进行计算:

$$D_i(t) = 1.6 \times 10^{-8} \times \text{LET}(t) \times \Phi, \quad (1)$$

其中, $D_i(t)$ 为电离吸收剂量与器件芯片的厚度有关, rad; t 为器件芯片厚度, μm ; 1.6×10^{-8} 为单位

转换系数, $\text{rad} \cdot \text{g}/\text{MeV}$; Φ 为入射粒子的辐射剂量, $\text{particles}/\text{cm}^2$; $\text{LET}(t)$ 为电离能量损失, 与器件芯片的厚度相关, 可以通过 Geant4 程序进行计算, $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{g}$. 图 2 为不同种粒子在 CC4013 器件芯片中产生的电离辐射吸收剂量与芯片厚度的关系曲线. 如图可见, 60 MeV Br 离子的电离吸收剂量都要比其他两种粒子高得多, 但入射深度比其他两种粒子小. 而 1 MeV 电子的吸收剂量在这几种粒子中最小, 但射程最大. 5 MeV 质子的吸收剂量与射程在三种粒子中都居中.

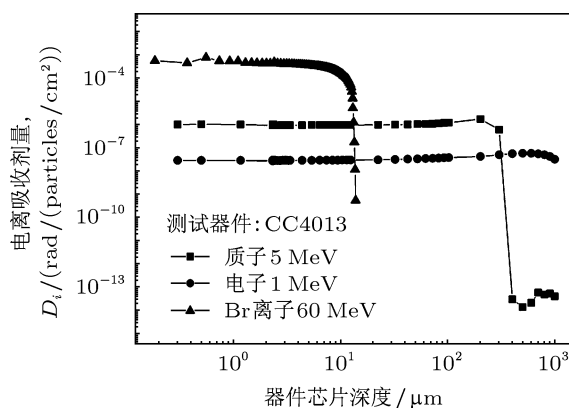


图 2 单个粒子产生的电离吸收剂量与器件芯片厚度的关系曲线

4 实验结果

CMOS 器件中最关键的参数是阈值电压, 通常可以用阈值电压来表征 CMOS 器件的辐射损伤. 图 3 为不同种类粒子辐照条件下, CC4013 器件的 p 沟道阈值电压 (V_{thp}) 与辐照剂量的关系曲线. 由图 3 可以看出, 随着辐照剂量的不断增加, CC4013 器件的 p 沟道阈值电压逐渐降低. 对于不同种粒子辐照条件, 其中在单位剂量下, 60 MeV Br 粒子所能造成的 p 沟道阈值电压的变化量较大, 其次为 5 MeV 质子, 1 MeV 电子所造成的损伤最小.

图 4 为不同种类粒子辐照条件下, CC4013 器件的 n 沟道阈值电压 (V_{thn}) 与辐照剂量的关系曲线. 如图可见, 随着辐照剂量的不断增加, CC4013 器件的 n 沟道阈值电压先逐渐降低, 当达到某一剂量时逐渐增加. 对于不同种粒子辐照条件, 其中在单位剂量下, 60 MeV Br 粒子所能造成的 n 沟道阈值电压的变化量较大, 其次为 5 MeV 质子, 1 MeV 电子所造成的损伤最小. 辐射效应及损伤机理分析将在下一节详细讨论.

根据前面计算得到的三种粒子在 CC4013 器件中造成的电离吸收剂量, 可以将图 3 与图 4 转换为图 5 与图 6 的形式. 图 5 为不同种类粒子辐照条件下, CC4013 器件的 p 沟道阈值电压 (V_{thP}) 与辐照吸收剂量之间的关系曲线. 图 6 为不同种类粒子辐照条件下, CC4013 器件的 n 沟道阈值电压 (V_{thN}) 与辐照吸收剂量之间的关系曲线. 如图所示, 在相同吸收剂量的情况下, 对于 CC4013 器件的 p 沟道和 n 沟道阈值电压 1 MeV 电子能够产生比其他两种粒子更大的辐射损伤, 5 MeV 质子其次, 60 MeV Br 离子最小.

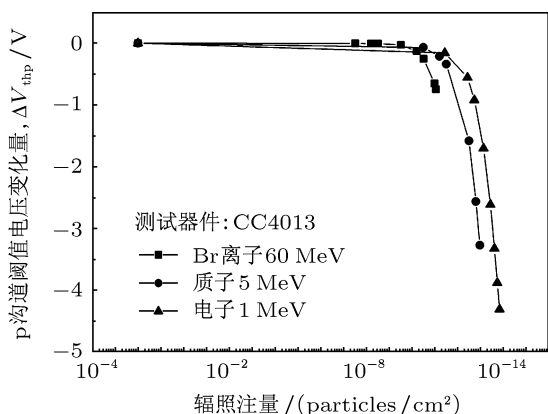


图 3 p 沟道阈值电压 (V_{thP}) 变化量与辐照剂量的关系曲线

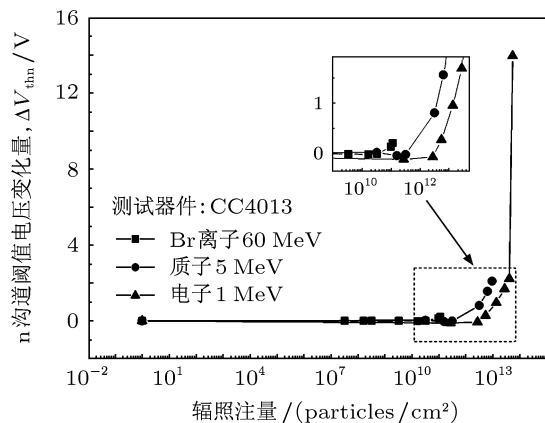


图 4 n 沟道阈值电压 (V_{thN}) 变化量与辐照剂量的关系曲线

5 讨论

电离辐射主要会对 CMOS 型器件的栅极氧化层造成损伤及在 SiO_2/Si 界面生成界面态, 从而影响 CMOS 型器件的电性能参数. CMOS 器件在栅与衬底间有一层 SiO_2 介质. 当带电粒子辐射器件时, 会在氧化层中产生电子-空穴对. 当栅上加正

偏置时, 迁移率较大的电子大部分逸出至栅极, 有一部分电子与空穴复合, 大部分空穴在正电场作用下向 SiO_2/Si 界面输运, 且有一部分被界面处 SiO_2 一侧的缺陷俘获, 形成俘获正电荷, 即氧化物陷阱电荷. 电离辐射还可在 SiO_2/Si 界面处产生随机分布的 3 价硅原子, 这就破坏了硅晶格势场的周期性, 将硅导带、价带中的部分能态扰动至禁带中, 在界面处引入界面态. 一般来说, 对于 p 沟道晶体管来说, 界面态显正电; 对于 n 沟道晶体管来说, 界面态显负电.

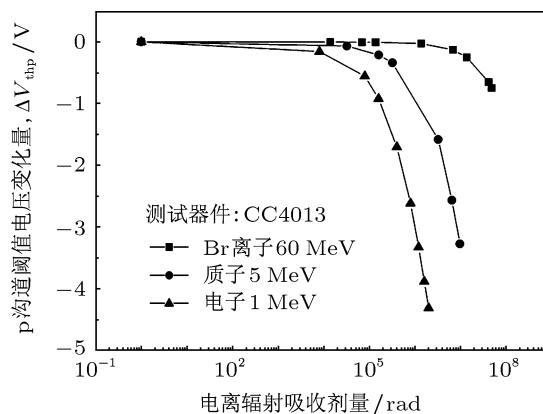


图 5 p 沟道阈值电压 (V_{thP}) 变化量与电离辐射吸收剂量的关系曲线

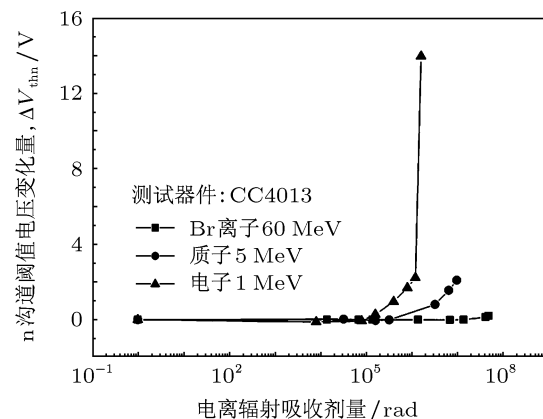


图 6 n 沟道阈值电压 (V_{thN}) 变化量与电离辐射吸收剂量的关系曲线

对于 CMOS 型器件, 阈值电压的漂移是栅极氧化层内俘获电荷造成的阈值电压漂移与界面态造成阈值电压漂移之和. 总的阈值电压漂移可以表示为

$$\Delta V_{th} = \Delta V_{ot} + \Delta V_{it}, \quad (2)$$

式中, ΔV_{ot} 和 ΔV_{it} 分别为由于栅氧俘获电荷和界面态而造成的阈值电压漂移. ΔV_{ot} 和 ΔV_{it} 的表达式为

$$\Delta V_{ot,it} = \frac{-1}{C_{ox}t_{ox}} \int_0^{t_{ox}} \rho_{ot,it}(x) \cdot x dx, \quad (3)$$

式中, t_{ox} 为栅氧化物层厚度; C_{ox} 为栅氧化层的单位面积电容; $\rho_{ot,it}(x)$ 为由氧化物俘获空穴及界面态导致的栅氧内电荷分布. 由方程 (3) 可知, 对于正电荷分布, 阈值电压向负方向漂移; 对于负电荷分布, 阈值电压向正方向漂移.

CC4013 器件在粒子辐照过程中, 由于这两种因素的交互作用使得其 p 沟道阈值电压向负的方向漂移. 而对于 n 沟道阈值电压, CC4013 器件在粒子辐照初期, 栅极氧化层内俘获电荷的大量增多造成 n 沟道阈值电压向负的方向漂移, 而这时界面态还没有足够的时间建立, 所以 n 沟道阈值电压在辐照初期向负的方向漂移. 随着辐照时间的增长, 界面态大量的增加使得界面态对 n 沟道阈值电压的作用占主导地位, 这就促使 n 沟道阈值电压向正的方向漂移.

针对实验所采用的三种辐照源 (电子、质子及 Br 离子) 单位时间造成的电离吸收剂量随 CC4013 器件芯片深度分布, 所得结果如图 7 所示. 如图所示, 在 CC4013 器件芯片深度 $10\mu\text{m}$ 以内, 三种辐照源单位时间内所产生的总电离辐射吸收剂量相差不大, 其中质子较大, 电子最小. 而这 3 种条件下的辐照源对 CC4013 器件阈值电压造成损伤程度明显不同. 其中, 电子辐照对 CC4013 器件阈值电压的影响最大. 即使在电子辐照每秒钟所造成的电离吸收剂量远远小于其他辐照源时, 相同电离辐射吸收剂量下, 仍是电子辐射对 CC4013 器件阈值电压造成的损伤最大.

这是因为电离能力比较强的入射粒子 (如 Br 离子) 将会在其路径上产生高密度柱状电荷, 而此时复合率也相对较高, 所剩余的空间电荷数较少, 所以造成的电离损伤也就较小; 电离能力比较弱的

入射粒子 (电子、质子) 将会产生相对独立分布的电子-空穴对, 此时的复合率就比较低, 会产生大量的剩余电荷, 这样造成的电离损伤也就较大.

因此, 辐照源的种类是影响 CC4013 器件电离辐射效应的重要因素, 并可对器件电性能参数产生不同影响. 高能电子辐照源对 CC4013 器件的阈值电压影响较大, 而重离子源对 CC4013 器件的阈值电压则影响较小.

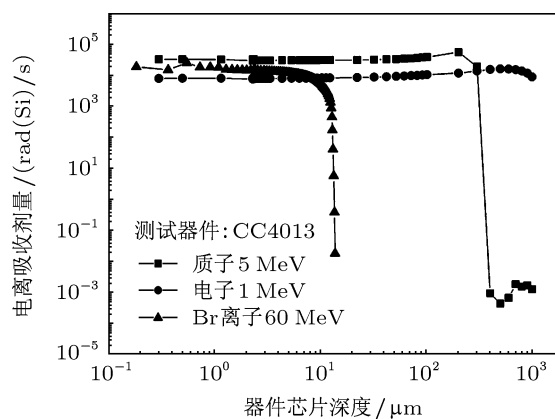


图 7 不同粒子每秒钟在器件中产生的电离吸收剂量与芯片深度之间的关系曲线

6 结论

通过对本次试验的理论计算和测试结果分析, 得到以下结论:

1. Geant4 程序计算结果表明, 60 MeV Br 离子的电离吸收剂量最多, 入射深度比其他两种粒子小; 1 MeV 电子的吸收剂量在这几种粒子中最小, 但射程最大. 5 MeV 质子的吸收剂量与射程都居中.
2. 相同电离辐射吸收剂量下, 1 MeV 电子对 CC4013 器件的阈值电压参数影响最大, 5 MeV 质子其次, 60 MeV Br 离子的影响最弱.

- [1] Liu Z X 2005 *Space Physics* (Harbin: Harbin Institute of Technology Press) p95 (in Chinese) [刘振兴 2005 太空物理学 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社) 第 95 页]
- [2] Velazco R, Fouillat P, Reis R 2007 *Radiation Effects on Embedded Systems* (Berlin: Springer) p1
- [3] Archubi C D, Eckardt J C, Lantschner G H, Arista N R 2006 *Physical Review A* **73** 1
- [4] Ma T P, Dressendorfer P V 1991 *Ionizing Radiation Effects in MOS*

Devices and Circuits (New York: John Wiley and Sons) p91

- [5] Chen P X 2005 *Radiation effects of semiconductor devices and integrated circuits* (Beijing: National Defence Industry Press) p28 (in Chinese) [陈盘训 2005 半导体器件和集成电路的辐射效应 (北京: 国防工业出版社) 第 28 页]
- [6] Li X J, Geng H B, Liu C M, Zhao Z M, Lan M J, Yang D Z, He S Y 2010 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **57** 831
- [7] Li X J, Geng H B, Lan M J, Yang D Z, He S Y, Liu C M 2010 *Chin.*

Phys. B 19 066103

[8] Chen W H, Du L, Zhuang Y Q, Bao J L, He L, Zhang T F, Zhang X
2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4090 (in Chinese) [陈伟华, 杜磊, 庄奕琪, 包

军林, 何亮, 张天福, 张雪 2009 物理学报 **58** 4090]

[9] He B P, Yao Z B 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1985 (in Chinese) [何宝平,
姚志斌 2010 物理学报 **59** 1985]

Radiation damage induced by various particles on CC4013 devices*

Li Xing-Ji^{1)†} Liu Chao-Ming¹⁾ Sun Zhong-Liang¹⁾ Lan Mu-Jie²⁾
Xiao Li-Yi²⁾ He Shi-Yu¹⁾

1) (*School of Material Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

2) (*School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

(Received 19 August 2012; revised manuscript received 9 September 2012)

Abstract

During serving in orbit, spacecraft will be affected by the radiation environment of the space high-energy charged particles, leading to the performance degradation or even malfunctions of electronic components. The complementary metal oxide semiconductor (CMOS) devices are sensitive to ionization damage. Therefore, it is valuable to research the mechanism of radiation effects on CMOS devices, and is significant to engineering and theory. The CC4013 CMOS integrated circuits are irradiated with 60 MeV Br ions, 5 MeV protons and 1 MeV electrons. Based on the data calculated by Geant4 code, the ionizing absorbed dose induced by 60 MeV Br ions is greatest, and the ionizing absorbed dose induced by 1 MeV electrons is lowest. The degradation of CC4013 device during the irradiation test is in-situ measured with Keithley 4200-SCS semiconductor characteristic system. From the experimental results, the threshold voltage degradation in CC4013 under an exposure of 1 MeV electrons is greatest at the same dose, a little lower under 5 MeV protons, and lowest under 60 MeV Br ions.

Keywords: CMOS device, high-energy charged particle, ionizing radiation, radiation damage

PACS: 85.30.Tv, 95.85.Ry, 61.80.-x, 61.80.Az

DOI: 10.7498/aps.62.058502

* Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. HIT.KLOF2010003).

† Corresponding author. E-mail: lxj0218@hit.edu.cn