

文章编号: 1007-4627(2015)03-0353-05

深亚微米SRAM质子单粒子翻转实验研究

古松^{1,2}, 刘杰¹, 刘天奇¹, 张战刚^{1,2}, 姚会军¹, 段敬来¹, 苏弘¹, 侯明东¹,
罗捷^{1,2}, 耿超^{1,2}, 刁凯^{1,2}, 叶兵^{1,2}, 王斌^{1,2}

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 宇航半导体器件运行在一个复杂的空间辐射环境中, 质子是空间辐射环境中粒子的重要组成部分, 因而质子在半导体器件中导致的辐射效应一直受到国内外的关注。利用兰州重离子加速器 (Heavy Ion Research Facility In Lanzhou) 加速出的 H₂ 分子打靶产生能量为 10 MeV 的质子, 研究了特征尺寸为 0.5/0.35/0.15 μm 体硅和绝缘体上硅 (SOI) 工艺静态随机存储器 (SRAM) 的质子单粒子翻转敏感性, 这也是首次在该装置上开展的质子单粒子翻转实验研究。实验结果表明特征尺寸为亚微米的 SOI 工艺 SRAM 器件对质子单粒子翻转不敏感, 但随着器件特征尺寸的减小和工作电压的降低, SOI 工艺 SRAM 器件对质子单粒子翻转越来越敏感; 特征尺寸为深亚微米的体硅工艺 SRAM 器件单粒子翻转截面随入射质子能量变化明显, 存在发生翻转的质子能量阈值, CRÈME-MC 模拟结果表明质子在深亚微米的体硅工艺 SRAM 器件中通过质子核反应导致单粒子翻转。

关键词: 质子; 单粒子翻转; 核反应; CRÈME-MC 模拟

中图分类号: O571.33 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.32.03.353

1 引言

质子是空间辐射环境中的主要成分, 其通量高, 能量分布范围广, 对质子辐射效应研究一直以来给予了极大地关注, 质子单粒子翻转研究近年来成为辐射效应研究的热点和重点^[1-5]。质子入射到材料中, 通过直接电离和非直接电离方式沉积能量, 最终导致材料中的原子电离产生电子-空穴对, 部分电荷在电场作用下被器件敏感结点所收集, 导致器件的逻辑状态发生变化, 这种现象被称为质子单粒子翻转^[6]。质子与半导体材料相互作用, 通过直接电离方式沉积能量的本领大小通常采用线性能量转移 (Linear Energy Transfer, LET)^[7]来表示, 图 1 给出的是质子 LET 随能量的变化关系, 随着质子能量的增大, 质子通过直接电离沉积能量的能力表现为先增大后减小, 质子在硅中的最大 LET 值为 0.5 MeV·cm²/mg, 对应质子的能量为 55 keV。对于特征尺寸较大的存储器, 器件的工作电压较高, 发生单粒子翻转所需的临界电荷值大, 需要入射离子具有足够大的 LET 值, 而质子的 LET 值较小, 因而不能通过直接

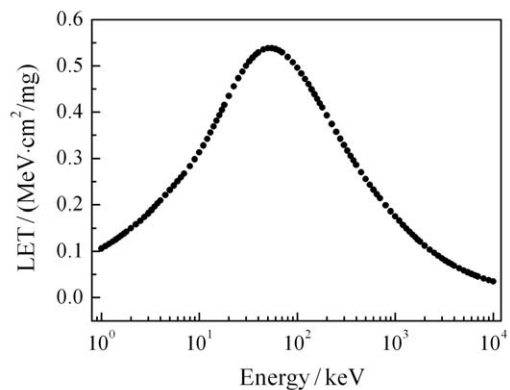


图 1 质子 LET 随能量变化

电离导致单粒子翻转, 因此对于大尺寸器件的质子单粒子翻转研究主要集中在质子通过非直接电离方式导致单粒子翻转, 如入射质子与器件材料中的原子核发生核反应, 产生大于器件 LET 阈值的次级离子, 次级离子再通过直接电离沉积能量导致单粒子翻转^[8], 国内外从辐射损伤机理、能量沉积、实验和理论模拟以及空间在轨预估等方面对质子单粒子翻转开展了大量研究^[9-11]。

收稿日期: 2015-01-15; 修改日期: 2015-03-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11179003, 10975164, 10805062, 11005134)

作者简介: 古松(1986-), 男, 陕西汉中人, 博士研究生, 从事单粒子效应研究; E-mail: gusong10@impcas.ac.cn

通信作者: 刘杰, E-mail: j.liu@impcas.ac.cn.

但随着半导体技术和工艺的不断革新,器件的特征尺寸进一步减小到纳米量级,器件工作电压降低,发生单粒子翻转所需的临界电荷值减小,因而对于单粒子翻转 LET 阈值较低的器件,质子的直接电离就足以产生单粒子翻转,国内外对质子直接电离导致单粒子翻转的研究取得了一些研究成果^[12-14]。但对于特征尺寸在深亚微米的器件,直接电离和非直接电离中哪一种机制是导致单粒子翻转的主要方式,不同工艺器件之间质子单粒子翻转机理是否存在差异,对于这些问题还有待于进一步深入的研究。因而,基于上述研究背景以及结合现有实验条件,在兰州重离子研究装置(Heavy Ion Research Facility In Lanzhou, HIRFL)单粒子效应专用实验终端上,首次开展了特征尺寸从亚微米到深亚微米静态随机存储器的质子单粒子翻转实验研究。

2 实验

2.1 实验条件

质子辐照实验首次采用 HIRFL 加速出的 H₂ 分子打靶产生能量为 10 MeV 的质子,质子注量率维持在 1×10^8 ions/(cm²·s),采用二次电子探测器进行质子计数,其铝箔厚度为 30 μm,质子再经过 25 μm 钛窗引出到大气,全部实验在大气环境和室温下进行。实验所采用的器件包括特征尺寸为亚微米的绝缘体上硅(SOI)工艺静态随机存储器(SRAM),以及特征尺寸为深亚微米商用体硅(Bulk-Si)工艺静态随机存储器(SRAM),已通过其它多种重离子对器件进行单粒子翻转截面测试,获得了各器件单粒子翻转饱和截面和 LET 阈值,如表 1 所列。

表 1 不同工艺器件单粒子翻转饱和截面及 LET 阈值

器件编号	器件工艺	特征尺寸/μm	存储容量/bit	工作电压/V	LET 阈值/(MeV·cm ² /mg)	饱和截面/(cm ² /bit)
1#	SOI SRAM	0.50	1M	5.0	12.06	5.17×10^{-8}
2#	SOI SRAM	0.50	1M	5.0	9.21	5.07×10^{-8}
3#	SOI SRAM	0.35	1M	3.3	5.87	3.86×10^{-8}
4#	Bluk-Si SRAM	0.15	2M	3.3	1.51	2.86×10^{-8}

2.2 实验结果及分析

2.2.1 0.35/0.5 μm SOI SRAMs 单粒子翻转

对于特征尺寸为亚微米的 SOI 工艺 SRAM 器件,质子单粒子翻转实验数据见表 2。从实验数据表中可以看出,对于特征尺寸为 0.5 μm,工作电压为 5 V 的 1# 和 2# 器件,在质子总注量分别达到 8.01×10^{10} 和 1.09×10^{11} ions/cm² 时,实验上都未观测到单粒子翻转;而对于特征尺寸减小到 0.35 μm,工作电压减小

到 3.3 V 的 3# 器件,相同能量的质子辐照,在质子总注量达到 3.66×10^{11} ions/cm² 时,发生 6 次单粒子翻转,将表 2 中该器件的质子单粒子翻转截面与表 1 中该器件的单粒子翻转饱和截面进行对比,可以看出质子的单粒子翻转截面低于器件饱和截面 9 个数量级。实验结果表明 SOI 工艺 SRAM 器件对质子单粒子翻转不敏感,但随着器件特征尺寸的减小,工作电压的降低,SOI 工艺 SRAM 器件对质子单粒子翻转越来越敏感。

表 2 质子辐照不同特征尺寸器件单粒子翻转实验数据

器件编号	特征尺寸/μm	工作电压/V	质子能量/MeV	LET @Si /(MeV·cm ² /mg)	翻转数	注量 /(ions/cm ²)	翻转截面/(cm ² /bit)
1#	0.50	5.0	9.03	0.04	0	8.01×10^{10}	—
2#	0.50	5.0	9.03	0.04	0	1.09×10^{11}	—
3#	0.35	3.3	8.95	0.04	6	3.66×10^{11}	1.56×10^{-17}

针对上述 SOI 工艺 SRAM 器件质子单粒子翻转实验结果,下面将从器件结构以及单粒子翻转发生机理上进行定性的解释。SOI 工艺 SRAM 器件由于埋氧层的引入,导致衬底中电离产生的电荷对单粒子翻转没有贡献,因而使得器件翻转 LET 阈值相对较高。实验所采用的质子在 Si 中 LET 值仅为 0.04 MeV·cm²/mg,该 LET 值远远低于器件的 LET 阈值,说明质子直接电离沉积能量本领很弱,沉积的能量不足以导致存储单元的翻转。然而入射的质子可以通过与材料中的原子核发

生核反应,产生次级离子,部分次级离子的 LET 值大于该器件 LET 阈值,在灵敏区内再通过直接电离沉积足够的能量导致单粒子翻转。一方面 SOI 工艺 SRAM 器件具有较高的单粒子翻转 LET 阈值;另一方面由于核反应的发生存在一定的概率,核反应发生的位置和次级离子的出射方向相对于单粒子翻转敏感区域是随机的。因而只有那些大于器件 LET 阈值的次级重离子,而且完全入射到器件单粒子翻转敏感区域才会导致单粒子翻转,所以在该能量下的质子单粒子翻转截

面比该器件的饱和截面低 9 个数量级, 亚微米的 SOI 工艺 SRAM 器件对质子单粒子翻转不敏感。对于特征尺寸较大的 1# 和 2# 器件, 相同能量的质子辐照器件, 在实验上并没有观测到单粒子翻转, 这是由于特征尺寸增大, 工作电压增大, 存储单元发生翻转所需的临界电荷值增大, 导致器件发生翻转的 LET 阈值也增大, 表 1 中各器件 LET 阈值数据也说明了这一点, 因而只有足够高 LET 值的次级离子才有可能导致单粒子翻转的发生。所以对于 LET 阈值更高的 1# 和 2# 器件, 即使入射质子与材料中的原子核发生核反应, 产生次级离子的 LET 值仍小于该器件的 LET 阈值, 因而实验上没有观测到单粒子翻转。综上, 在特征尺寸为亚微米的 SOI 工艺 SRAM 器件中, 质子通过核反应产生次级离子导致单粒子翻转; 随着 SOI 工艺 SRAM 器件特征尺寸的减小和工作电压的降低, 器件对质子通过核反应导致的单粒子翻转越来越敏感。

2.2.2 0.15 μm Bulk-Si SRAM 单粒子翻转

随着器件的特征尺寸减小到纳米量级, 质子导致单粒子翻转的机制发生了变化, 质子通过直接电离就可以导致单粒子翻转的发生^[14]。而对于特征尺寸为深亚微米的 SRAM 器件, 直接电离和非直接电离机制对质子单粒子翻转的贡献需要进一步研究。因而此部分主要研究了特征尺寸仅为 150 nm 商用体硅工艺 SRAM 器件, 单粒子翻转敏感性随入射质子能量的变化关系, 实验结果如图 2 所示, 图中带向下箭头的数据点表示实验上并没有观测到单粒子翻转, 给出的是在该质子能量下, 质子单粒子翻转截面的上限。从图上可以看出, 质子能量在 0.5 ~ 1 MeV 区间, 单粒子翻转截面的上限远低于更高能量质子的单粒子翻转截面; 质子能量大于 2 MeV 时, 观测到了单粒子翻转事件, 并且随入射质子能量的增加, 单粒子翻转截面上升, 当入射质子能量在 5 ~ 10 MeV 时, 单粒子翻转截面保持不变, 将质子

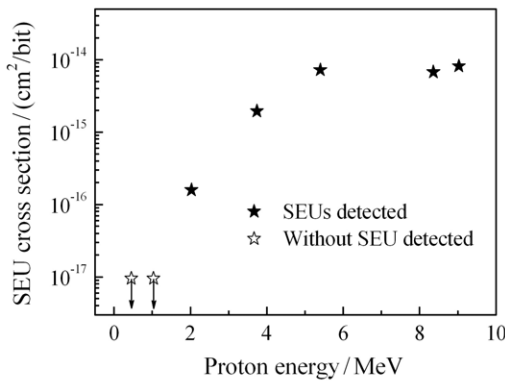


图 2 单粒子翻转截面随质子能量的变化关系

单粒子翻转截面与表 1 中器件单粒子翻转饱和截面相对比, 可以明显看出质子单粒子翻转截面小于该器件的饱和截面约 5 个数量级, 而且与入射质子的能量存在明显的相关性, 因而推测上述单粒子翻转是由质子通过核反应导致的单粒子翻转。

3 CRÈME-MC模拟

针对特征尺寸为深亚微米的体硅工艺 SRAM 器件质子单粒子翻转实验结果, 进一步开展了质子单粒子翻转的模拟研究, 采用在线软件 CRÈME-MC 模拟在灵敏区中质子核反应对沉积能量的影响。该器件多层金属布线采用的是 Cu 材料, 为了逼真地模拟质子入射器件的环境, 模拟采用的器件结构和材料剖面图, 如图 3 所示, 整个结构的尺寸为 3 μm × 3 μm × 9.9 μm, 其中虚线区域为灵敏区, 尺寸为 1 μm × 1 μm × 1 μm。模拟采用 10⁶ 个特定能量的质子垂直入射到整个器件, 入射到灵敏区内的质子将在灵敏区内沉积能量, 得到每一个沉积能量值对应的质子数分布, 即沉积能量谱图。

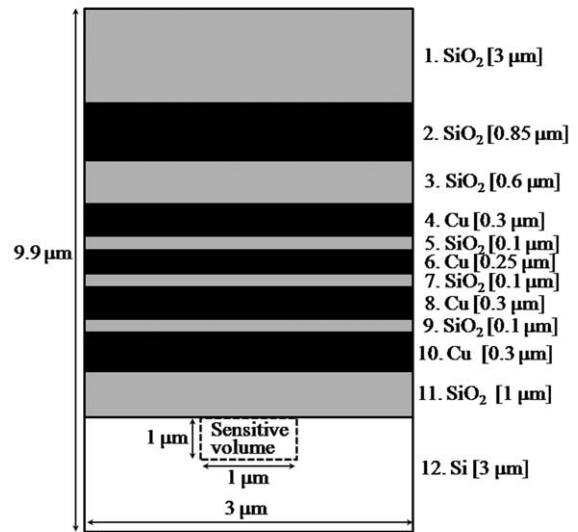


图 3 CRÈME-MC模拟所采用器件结构剖面示意图
图中虚线区域为灵敏区, 未按比例尺绘图。

首先模拟了 5.5 MeV 的质子分别在考虑核反应和不考虑核反应情况在灵敏区内的能量沉积, 模拟结果见图 4。从图中可以看出, 不管是否考虑质子核反应, 绝大多数质子在灵敏区内沉积的能量集中在一个很窄的能量范围内, 结合质子的 LET, 通过计算发现该能量值为质子直接电离沉积的能量值, 说明大部分质子通过直接电离沉积能量。在不考虑核反应时, 从能量沉积谱图可以看出大部分质子沉积的能量集中在一个很窄的能量范围内, 在高的沉积能量值区, 质子计数急剧下降; 而

在考虑核反应时，能量沉积谱图在高的沉积能量值区出现了一个明显的平台，该平台对应的质子计数相比于沉积能量峰值处的质子计数低5个数量级，而且该平台对应的沉积能量范围很宽。由于总的入射质子数是确定的，在高的沉积能量值区质子计数增加，因而在低的沉积能量值区质子的计数明显减少。对于在高的沉积能量值区，质子计数显著增加可能是部分入射质子通过与材料中的原子核发生核反应，产生具有更高LET的次级离子，这些次级离子再通过直接电离沉积更大的能量，所以在高的沉积能量值区出现较宽的平台。

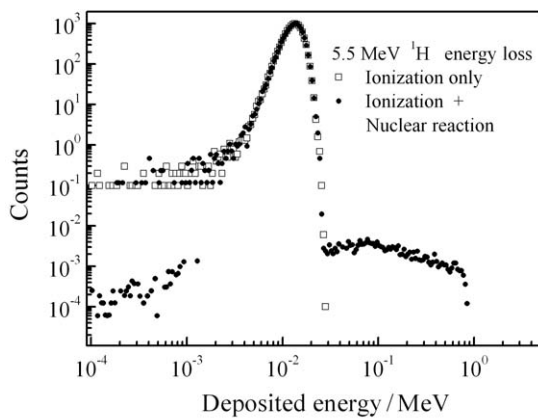


图 4 CRÈME-MC 模拟 5.5 MeV 质子在灵敏区内沉积能量谱图
图中空心方格数据点代表仅考虑直接电离作用的沉积能量；
实心圆数据点代表考虑直接电离和核反应共同作用下的沉积能量。

同时也模拟了三种不同能量的质子在灵敏体积中的能量沉积，质子能量分别为 1, 5.5 和 10 MeV，也分别用 10^6 个质子垂直入射到器件，得到与图 4 相类似的每一个沉积能量值对应的质子数分布，即沉积能量谱图。再对沉积能量谱归一化得到每一个沉积能量值对应的概率，然后对大于某一沉积能量的概率进行积分，就得到对于某一沉积能量的积分截面，表示如下：

$$\sigma(E_i) = \int_{E_i}^{+\infty} P(E_i), \quad (1)$$

其中 $P(E_i)$ 为质子在灵敏体积内沉积能量为 E_i 的概率。图 5 给出了不同能量质子沉积能量的积分截面随沉积能量的变化曲线，曲线上的拐点代表在该能量值附近有大量的质子在灵敏体积内沉积了该能量值。

在模拟过程中如不考虑质子核反应，沉积能量的积分截面曲线上仅有上拐点，在高的沉积能量区域，积分截面急剧下降。图 5 给出的是在考虑质子核反应的情况下，三种能量的质子在灵敏区内沉积能量的积分截面，从模拟结果中可以看出，对于三种能量的质子，在积分

截面随沉积能量的变化曲线上都出现两个拐点，此处分为上拐点和下拐点。对于不同能量的质子，1 MeV 的质子上拐点处对应的沉积能量明显大于 5 和 10 MeV 质子上拐点对应的沉积能量，这与图 1 中 LET 值随入射质子能量变化趋势是吻合的，通过质子 LET 值计算在灵敏体积内的沉积能量，可以肯定上拐点处对应的沉积能量是质子通过直接电离沉积的能量。在图 5 中，上拐点处的积分截面大于下拐点的积分截面约 5 个数量级，同时结合图 4 可以看出下拐点是部分入射质子通过与材料中的原子核发生核反应，产生次级离子，次级离子在灵敏区内再直接电离沉积能量。而且从图 5 中也可以明显看出 1 MeV 的质子在 下拐点处的积分截面变化几乎可以忽略，说明发生核反应的概率非常小；而 5.5 和 10 MeV 的质子在 下拐点处非常明显，沉积能谱出现明显展宽，而且 1 MeV 的质子最大的沉积能量远小于 5.5 和 10 MeV 的质子最大的沉积能量，5.5 和 10 MeV 的质子在 下拐点处的积分截面很接近，因而上述计算模拟结果充分说明了实验现象：对于深亚微米的体硅工艺 SRAM 器件，在入射质子能量低于 2 MeV 时，并没有观测到单粒子翻转，而且对于 5.5 和 10 MeV 的质子单粒子翻转截面基本不变。

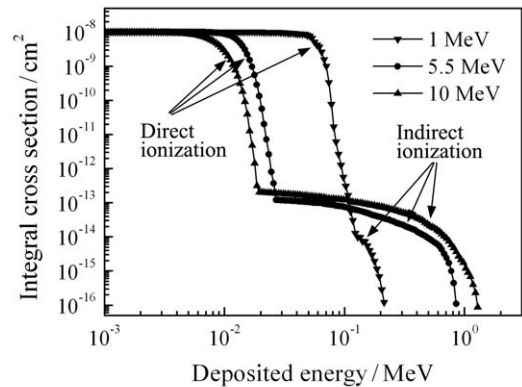


图 5 不同入射能量的质子在灵敏区内沉积能量的积分截面

4 总结

本文利用 HIRFL 提供的 10 MeV 质子首次开展了质子单粒子翻转研究，主要研究了不同工艺和不同特征尺寸静态随机存储器的质子单粒子翻转响应。质子实验结果表明，对于特征尺寸在亚微米和深亚微米的随机静态存储器，质子与半导体材料中的原子核发生核反应，产生次级离子、次级离子再通过直接电离产生单粒子翻转。对于特征尺寸为亚微米的 SOI 工艺 SRAM 器件，由于埋氧层的引入，使得器件对质子单粒子翻转不敏

感,随着器件特征尺寸的减小,工作电压的降低,SOI工艺SRAM器件对质子单粒子翻转越来越敏感,质子通过核反应越发容易导致单粒子翻转的发生;与SOI工艺相比,特征尺寸为深亚微米的体硅工艺SRAM器件对质子单粒子翻转更敏感,而且单粒子翻转截面随质子能量变化明显,存在发生翻转的质子能量阈值。同时采用CRÈME-MC模拟了不同能量的质子在灵敏区中质子核反应对沉积能量的影响,模拟结果显示质子核反应对1 MeV的质子在灵敏体积内沉积能量的影响可以忽略,而5.5和10 MeV的质子由于核反应导致质子沉积能量向高的沉积能区展宽,而且高的沉积能量对应的积分截面与实验观测到的质子单粒子翻转截面相一致,因而充分解释了实验现象:对于深亚微米的体硅工艺SRAM器件,在入射质子能量低于2 MeV时,并没有观测到单粒子翻转;对于5~10 MeV入射的质子,单粒子翻转截面基本不变。

致谢 感谢中国科学院微电子研究所提供器件,及中国科学院近代物理研究所加速器部门在试验中给予的大力帮助。

参考文献:

[1] REED R, MARSHALL P, KIM H, *et al.* IEEE Trans Nucl

- Sci, 2002, **49**(6): 3038.
- [2] SCHWANK J, SHANEYFELT M, BAGGIO J, *et al.* IEEE Trans Nucl Sci, 2005, **52**(6): 2622.
- [3] LI Lei, ZHOU Wanting, LIU Huihua. Journal of Nuclear Science and Technology, 2012, **49**(4): 450.
- [4] REED R, MCNULTY P, BEAUVAIS W, *et al.* IEEE Trans Nucl Sci, 1994, **41**(6): 2389.
- [5] SCHWANK J, SHANEYFELT M, BAGGIO J, *et al.* IEEE Trans Nucl Sci, 2006, **53**(6): 3122.
- [6] LIU H, LIU M, HUGHES H. IEEE Trans Nucl Sci, 2006, **53**(6): 3502.
- [7] XAPSOS M. IEEE Trans Nucl Sci, 1992, **39**(6): 1613.
- [8] DUZELLIER S, ECOFFET R, FALGUERE D, *et al.* IEEE Trans Nucl Sci, 1997, **44**(6): 2306.
- [9] LIU Jie, HOU Mingdong, ZHANG Qinxiang, *et al.* Nuclear Physics Review, 2002, **19**: 411.
- [10] PETERSEN E. IEEE Trans Nucl Sci, 1998, **45**(6): 2550.
- [11] HE Chaohui, YANG Hailiang, GENG Bing, *et al.* Nuclear Electronics & Detection Technology, 2000, **4**: 253.
- [12] RODBELL K, HEIDEL D, TANG H, *et al.* IEEE Trans Nucl Sci, 2007, **54**(6): 2474.
- [13] GUO Hongxia, WANG Wei, LUO Yinong, *et al.* NUCLEAR TECHNIQUES, 2010, **33**(7): 538.
- [14] HEIDEL D, MARSHALL P, LABEL K, *et al.* IEEE Trans Nucl Sci, 2008, **55**(6): 3394.

Proton Induced Single Event Upset in Submicron and Deep-submicron SRAMs

GU Song^{1,2}, LIU Jie¹, LIU Tianqi¹, ZHANG Zhangang^{1,2}, YAO Huijun¹, DUAN Jinglai¹, SU Hong¹, HOU Mingdong¹, LUO Jie^{1,2}, GENG Chao^{1,2}, XI Kai^{1,2}, YE Bing^{1,2}, WANG Bin^{1,2}

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Microelectronic devices are used in a harsh radiation environment for space missions. Among all the reliability issues concerned, proton induced single event upset (SEU) is becoming more and more noticeable for semiconductor components exposed on space. In this work, an experimental research of SEU induced by 10 MeV proton for static random access memory (SRAM) of 0.5, 0.35 and 0.15 μm feature size is carried out on Heavy Ion Research Facility in Lanzhou for the first time. The experimental results show that proton induced SEUs in submicron and deep-submicron (SRAMs) are dominated by secondary ions generated by proton nuclear reaction events. The silicon-on-insulator SRAMs characters natural radiation-hardened SEU by proton. For the deep-submicron bulk-silicon technology SRAM, the proton SEU cross section is closely related to the proton energy and there is a threshold energy for the SEU occurrence by proton indirect ionization. CRÈME-MC simulation indicates that the SEU events in deep-submicron SRAM are induced by the proton nuclear reaction.

Key words: proton; single event upset; nuclear reaction; CRÈME-MC simulation

Received date: 15 Jan. 2015; Revised date: 25 Mar. 2015

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11179003, 10975164, 10805062, 11005134)

Corresponding author: LIU Jie, E-mail: j.liu@impcas.ac.cn.

<http://www.npr.ac.cn>