

文章编号: 1007-4627(2002)04-0411-05

高能质子引起器件单粒子效应的研究方法*

刘 杰, 侯明东, 张庆祥, 甄红楼, 孙友梅, 刘昌龙, 王志光, 朱智勇, 金运范
(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 简略介绍了高能质子在半导体芯片中引起单粒子效应的实验测量和理论分析方法, 包括核反应分析方法、半经验方法, 介绍了质子和重离子翻转截面间的关系, 并用重离子实验数据预测器件在质子环境下的翻转率。

关键词: 单粒子效应; 质子; 半导体器件

中图分类号: P354.2 **文献标识码:** A

1 引言

在空间宇宙射线环境中, 质子是最多的粒子, 其次是原子序数小于 26 的各种重离子, 质子和重离子都能使卫星上的电子学器件和线路出现单粒子效应。在一次太阳耀斑事件中, 质子的强度要比来自银河宇宙射线的重离子高几个数量级。特别是对于要穿过南大西洋磁异常区的卫星, 质子的单粒子效应尤为显著, 是威胁卫星安全的重要因素。英国萨里大学研制的 UoSAT-2 卫星 (700 km, 98°) 于 1984—1989 年测量数据表明当卫星运行于南大西洋磁异常区域时, 芯片出现翻转的次数最多^[1], 推测是由于质子引起的单粒子翻转 (SEU) 所致, 并发现太阳耀斑质子事件能使翻转率显著增加。我国第一颗太阳同步轨道卫星“风云一号”在轨工作时多次出现姿态不正常, 与太阳质子事件和高纬度地区及南大西洋磁异常区的质子有关。空间质子流强和能量依赖于轨道和倾角, Stassinopoulos 等^[2]用 AP-8 程序计算了低地球轨道、太阳活动谷年, 以及不同屏蔽条件下质子流强随能量的分布, 质子能量范围从几 MeV 到 500 MeV, 可见仅用屏蔽层无法有效地减小质子流强。

对于带有超大规模集成线路并在高质子流强下运行的卫星, 必须考虑质子引起的单粒子效应 (SEE)。过去 20 年人们对于重离子引起的 SEE 进行了广泛和深入的研究, 对质子的研究相对较少。

芯片出现 SEE 的主要机制是, 当宇宙射线中的重离子穿过一个存储单元时在耗尽区或附近沉积能量, 产生足够数量的电子-空穴对, 在电场作用下, 当聚集在节点的电荷超过临界值时, 器件发生 SEU; 而高能质子是通过对核的非弹性相互作用, 即核反应产生的二次粒子沿路径沉积足够的电荷改变临近存储单元的状态, 出现 SEU, 翻转截面依赖于入射质子的能量。所以重离子和质子引起 SEU 都是由于重离子电离产生的电荷被收集而造成的, 两者的基本过程相似。在 4 μm 的硅器件中每 10^5 个质子中大约有一个质子发生核反应, 这个值似乎很小, 但在近地空间捕获带中质子流强很大, 产生的翻转远超过相同环境下宇宙射线重离子产生的翻转。研究质子引起 SEE 的方法包括实验测量和理论计算^[3]。

2 实验测量

地面模拟研究质子引起 SEE 的方法是用加速器加速的不同能量质子 (几 MeV—几百 MeV) 照射器件^[4-9]。国际上已有多台加速器用于此项研究 (见表 1)。实验中所选取的主要辐照参数除能量外, 还有剂量和剂量率, 剂量范围通常选取 10^9 — 10^{11} protons/cm²。选取剂量率的主要依据是, 既要节省照射时间, 还要防止器件内产生翻转堆积现象, 一

收稿日期: 2001-12-26; 修改日期: 2002-02-22

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10075064)

作者简介: 刘 杰 (1965—), 女 (汉族), 甘肃兰州人, 博士, 副研究员, 从事核技术应用研究。

般选取的剂量率范围是 10^6-10^8 protons/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$).

表 1 研究质子 SEE 加速器装置一览表

地点	加速器类型	质子能量/MeV
美国 Harvard 大学	回旋加速器	160
美国 California 大学 Davis 分校	76 英寸回旋加速器	56
美国海军研究实验室	回旋加速器	50
美国 Indiana 大学	回旋加速器(IUCF)	200
瑞士原子核研究所	回旋加速器(SIN)	590
英国 Harwell	变能回旋加速器(VEC)	60
瑞士 Paul Scherrer 研究所	回旋加速器(PSI)	300
法国 Saclay	同步加速器(SATURNE)	200
美国 Brookhaven 国家实验室	同步加速器	5 000

利用观测到的翻转数和总的辐照剂量计算翻转截面, 最终给出翻转截面随质子能量的变化. 实验结果显示, 当质子能量从 20 MeV 增加到 150 MeV 时, 质子翻转截面快速增加, 当能量继续增加时, 翻转截面缓慢递增^[10], 最终达到饱和, 见图 1.

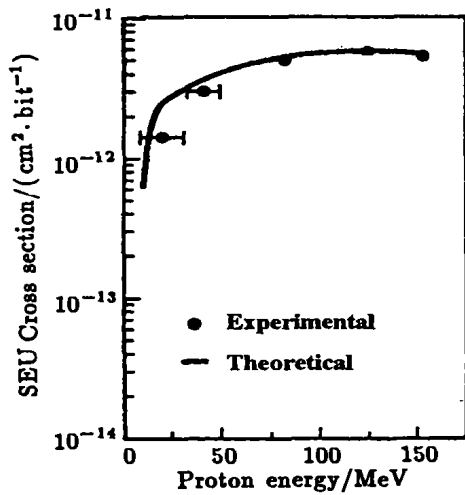


图 1 Intel 2164A DRAM SEU 翻转截面随质子能量的变化

3 理论分析

3.1 核反应分析方法

已有许多文章讨论质子在硅中产生翻转的核反应问题, 计算质子在各种半导体材料中的核反应截面^[11], 分析计算质子核反应的反冲能谱^[12]. Hamm 和其合作者^[13]首先用 Monte Carlo (MC) 方法, 基于核内级联模型及随后粒子蒸发计算给出了硅中质子核反应的反冲能量. 之后, McNulty 及合作者发

表了一系列文章, 给出了质子在器件有相同敏感体积厚度的 Si 探测器中能量沉积的测量结果^[14,15], 并与 MC 计算的谱进行了比较.

CUPID 程序已被扩展到计算质子引起的翻转截面^[16], 敏感体积大小和翻转阈能由重离子测量数据决定. Doucin 及合作者^[17]的计算结果表明用 HETC MC 程序低估了高能粒子的沉积, 可以用实验能量沉积谱来修正 HETC 计算的质子截面.

Miroshin 等^[18]把 MC 计算与实验结果结合起来, 发展了质子单粒子翻转模型, 方程是

$$\sigma = n \times V \times \sigma_{in} \times \epsilon(E_{thr}), \quad (1)$$

其中 σ 是翻转截面, n 是每 cm^3 中硅核数, V 是存储单元的敏感体积, σ_{in} 是质子与硅非弹性相互作用截面, $\epsilon(E_{thr})$ 是在体积 V 中沉积能量大于阈能 E_{thr} 的相互作用部分的函数表达式. 利用两个或多个能量测量截面, 并结合 MC 计算决定 V 和 E_{thr} 这两个未知参数, 由沉积能量的积分谱可以计算函数 $\epsilon(E_{thr})$.

当质子能量小于 100 MeV 时, MC 计算中不能用核内级联模型, Takami 等^[19]用激子模型和统计蒸发模型来分析核反应, 用光模型来决定总的截面, 对 Si 中能量低于 50 MeV 的质子反应做了计算, 结果与 93L422 RAM 测量截面符合.

在低入射能量的情况下, 反应产物射程较短, 方程(1)中的 V 应该与器件的体积相近, 而在高能情况下, Bradford^[20]认为敏感体积以外的核反应也会有很大的贡献, 尤其对非常小的器件. 于是质子翻转截面方程写成:

$$\sigma = n \times V(E) \times \sigma_{in}(E) \times \epsilon(E, E_{thr}), \quad (2)$$

其中 E 是入射质子能量。

3.2 半经验方法

Bendel 等^[5]以核物理研究为基础,用半经验方程形式给出计算质子翻转截面对能量依赖关系的方法,其中的常数通过拟合实验数据来获得,它是目前计算质子翻转率最常用的方法。基本的 Bendel 单一参数方程形式是:

$$\sigma = \left(\frac{24}{A}\right)^{14} [1 - \exp(-0.18Y^{0.5})]^4 \cdot (10^{-12} \text{ upsets}/(\text{protons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{bit})), \quad (3)$$

$$Y = \left(\frac{18}{A}\right)^{0.5} (E - A), \quad (4)$$

E 和 A 的单位是 MeV, A 相应于翻转的能量阈值,是衡量器件翻转敏感性的重要参数, σ 是翻转截面。

Shimano 等^[21]对 Bendel 单一参数和双参数模型进行了验证,认为双参数模型能够更好地拟合实验结果,特别对于特征体积小的器件。所用的双参数方程形式是:

$$\sigma = \left(\frac{B}{A}\right)^{14} [1 - \exp(-0.18Y^{0.5})]^4, \quad (5)$$

其中 $(B/A)^{14}$ 是质子在非常高能量时的饱和截面。

3.3 质子和重离子翻转关系

因为不同的能量沉积机理,重离子和质子翻转率之间没有简单的关系。McNulty 和其合作者通过把质子反应模型与重离子或质子翻转测量结合起来,这个方法在这个领域取得很大发展。Bisgrove 等^[10]比较了重离子和质子所引起的翻转,发现在一定的条件下,可以用重离子实验数据计算质子翻

转。Rollins^[22]提出重离子引起翻转与质子翻转有许多共同特点,如有相同的临界电荷、敏感体积和翻转阈能等问题,首次给出了质子翻转截面和重离子测量截面间的关系。Petersen^[23]建立了从重离子翻转阈值获得质子翻转阈值的方法,从而将一个环境下的翻转数据用于另一个环境下,并指出对于线性能量转移(LET)阈值 $L_{0.1} > 10 \text{ MeV}/(\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2})$ 的器件在质子辐射带有相对高的质子翻转率。方程表达式是:

$$A_b = L_{0.1} + 15, \quad (6)$$

其中 A_b 是 Bendel A 参数, $L_{0.1}$ 是重离子饱和截面 10% 处的 LET 值。

4 翻转率预测

预测航天器内质子翻转率的基本步骤是:(1)在一个或多个能量点获得实验质子翻转截面值,将结果与上述方程比较决定翻转敏感性参数 A ,最好用能量高于 55 MeV 的截面来决定 A 。或者通过重离子 SEE 实验数据,得到质子翻转的 A 参数。(2)由特殊轨道的平均质子谱及航天器内器件的屏蔽分布,获得器件质子谱。(3)将翻转截面与质子谱结合预测器件在特定空间轨道环境下的翻转率。

利用兰州重离子加速器实验装置(HIRFL)提供的能量 30 MeV 到 1.6 GeV 范围的 Ne, O 和 Ar 束,测量芯片 Intel 8086 和 Intel MD80C86 微处理器,以及 IDT 6116, IDT 7164 和 IDT 71256 SRAM 翻转截面随入射离子线性能量转移(LET)的关系^[24, 25],实验数据经 Weibull 函数拟合得到器件 SEE 特征参数(表 2),其中 L_0 是器件开始出现翻转时的 LET 值, $L_{0.1}$ 是 10% 饱和截面处的 LET, L_0 与 $L_{0.1}$ 之间有时变化很大,取决于 Weibull 曲线

表 2 几种芯片重离子 SEU 测量结果的 Weibull 参数、质子 Bendel A 参数及空间 SEU 率预测

器件	技术	$L_0/(\text{MeV} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{cm}^2)$	$L_{0.1}/(\text{MeV} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{cm}^2)$	$\sigma_L(A) / \text{cm}^2$	A_b / MeV	SEU 率 $/(\text{upsets} \cdot \text{bit}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$
Intel 8086	NMOS	5.2	5	1.1×10^{-2}	20	4×10^{-4}
Intel MD80C86	CMOS	5.3	14	8.9×10^{-3}	29	8×10^{-7}
IDT 6116	CMOS/NMOS	5.3	26	6.2×10^{-2}	41	4×10^{-8}
IDT 7164	CMOS/NMOS	4.1	27	0.25	42	4×10^{-8}
IDT 71256	CMOS/NMOS	2.8	18	0.20	33	4×10^{-7}

的宽度; σ_L 是器件的饱和截面. 利用方程(6)得到质子翻转的 A 参数, 然后由方程(3)和(4)获得质子翻转截面与能量的关系. 如果这些器件被放置在运行于低地轨道(700 km, 97°), 厚度 20 g/cm² Al 屏蔽的航天器中^[26], 器件在轨运行由于质子引起的翻转率预测结果见表 2.

5 结束语

我国近年来也开展了质子的 SEE 研究, 曾利用中国科学院高能物理研究所的质子直线加速器, 它可能提供的质子最高能量为 35 MeV, 该能量对

于模拟空间环境中直到几百 MeV 能量的质子相距甚远, 有很大的局限性. 目前, HIRFL 上的放射性次级束流线装置, 通过入射束与靶核作用产生高能质子, 但由于次级产物截面小, 次级束流流强通常在 10⁵ ions/(cm² · s)量级, 用于 SEE 研究尚需做某些探索性工作; 有幸的是 HIRFL 上正在建造一个能量为 10 MeV 的质子注入机, 通过 HIRFL 中的 SSC 加速后, 能量可以达到 120 MeV, 预计年内能够提供质子束流用于 SEE 研究; 另外, HIRFL 上已有 SEE 研究的专用装置, 在重离子和质子引起的 SEE 研究中正发挥重要作用.

参 考 文 献:

- [1] Harboe-Sorensen R, Daly E J, Underwood C I, *et al.* The Behaviour of Measured SEU at Low Altitude during Periods of High Solar Activity[J]. IEEE Tran Nucl Sci, 1990, 37(6): 1 938.
- [2] Stassinopoulos E G, Barth J M. NASA-Goddard Space Flight Center[R]. Report X-601-82-9, 1982.
- [3] Petersen E L. Approaches to Proton Single-event Rate Calculations[J]. IEEE Tran Nucl Sci, 1996, 43(2): 496.
- [4] Stassinopoulos E G, Jim Borowick. Correlation of Proton and Heavy-ion Test Results on CMOS Bulk Memories Used for Space Applications[J]. IEEE Tran Nucl Sci, 1992, 39: 450.
- [5] Bendel W L, Petersen E L. Proton Upsets in Orbit[J]. IEEE Tran Nucl Sci, 1983, 30(6): 4 481.
- [6] Wyatt R C, McNulty P J, Toumbas P, *et al.* Soft Errors Induced by Energetic Protons[J]. IEEE Tran Nucl Sci, 1979, 26(6): 4 905.
- [7] Campbell A B, Stapor W J, Koga R, *et al.* Correlated Proton and Heavy Ion Upset Measurements on IDT Static RAMs[J]. IEEE Tran Nucl Sci, 1985, 32(6): 4 150.
- [8] Koga R, Kolasinski W A, Osborn J V, *et al.* SEU Test Techniques for 256k Static RAMs and Comparisons of Upsets Induced by Heavy Ions and Protons[J]. IEEE Tran Nucl Sci, 1988, 35(6): 1 638.
- [9] Philippe C, Pierre L, Catherin B, *et al.* Space Radiation Evaluation of 16 Mbit DRAMs for Mass Memory Application[J]. IEEE Tran Nucl Sci, 1994, 41(6): 2 267.
- [10] Bisgrove J M, Lynch J E, McNulty P J, *et al.* Comparison of Soft Errors Induced by Heavy Ions and Protons[J]. IEEE Tran Nucl Sci, 1986, 33(6): 1 571.
- [11] Petersen E L. Nuclear Reactions in Semiconductors[J]. IEEE Tran Nucl Sci, 1980, 27(6): 1 494.
- [12] Langworthy J B. NRL Memorandum Rep. 1982, 4731.
- [13] Hamm R N, Rustgi M L, Wright H A, *et al.* Energy Spectra of Heavy Fragments from the Interaction of Proton with Communications Materials[J]. IEEE Tran, Nucl Sci, 1981, 28(6): 4 004.
- [14] McNulty P J, Farrell G E, Tucker W P. Proton-induced Nuclear Reactions in Silicon[J]. IEEE Tran Nucl Sci, 1981, 28(6): 4 007.
- [15] Teatey S E, Farrell G E, McNulty P J. Charge-deposition Spectra in Thin Slabs of Silicon Induced by Energetic Protons [J]. IEEE Tran Nucl Sci, 1983, 30(6): 4 394.
- [16] McNulty P J, Abdel-Kader W G, Bisgrove J M. Methods for Calculating SEU Rates for Bipolar and NMOS Circuits[J]. IEEE Tran Nucl Sci, 1985, 32(6): 4 180.
- [17] Doucin B, Patin Y, Lochard J P, *et al.* Characterization of Proton Interactions in Electronics Components [J]. IEEE Tran Nucl Sci, 1994, 41(6): 592.
- [18] Miroshkin V V, Tverskoy M G. Two Parameter Model for Predicting SEU Rate[J]. IEEE Tran Nucl Sci, 1994, 41(6): 2 085.
- [19] Takami Y, Shiraishi F, Goka T, *et al.* Investigation of Single Event Upset Subject to Protons of Intermediate Energy Range[J]. IEEE Tran Nucl Sci, 1990, 37(6): 1 953.
- [20] Bradford J N. Microvolume Energy Deposition from High Energy Proton Silicon Reactions [J]. IEEE Tran Nucl Sci, 1982, 29(6): 2 085.
- [21] Shimano Y, Goka T, Kuboyama S, *et al.* The Measurement and Prediction of Proton Upset[J]. IEEE Tran Nucl Sci, 1989, 36(6): 2 344.
- [22] Rollins J G. Estimation of Proton Upset Rates from Heavy Ion Test Data[J]. IEEE Tran Nucl Sci, 1990, 37(6): 1 961.
- [23] Petersen E L. The Relationship of Proton and Heavy Ion Upset Thresholds[J]. IEEE Tran Nucl Sci, 1992, 39(6):

- 1 600.
- [24] Liu J, Ma F, Hou M D, *et al*, Heavy Ion Induced Single Event Effects in Semiconductor Devices[J]. Nucl Instr and Meth, 1998, **B135**: 239.
- [25] Liu J, Hou M D, Li B Q, *et al*. Experimental Studies of Single-event Effects Induced by Heavy Ions[J]. Nucl Instr and Meth, 2000, **B164-165**: 973.
- [26] Bion T, Bourrieau J. A Model for Proton-induced SEU[J]. IEEE Tran Nucl Sci, 1989, **36**(6): 2 281.

Approaches to Study Single Event Effects Induced by High Energy Protons in Devices *

LIU Jie, HOU Ming-dong, ZHANG Qin-xiang, ZENG Hong-lou, SUN You-mei, LIU Chang-long,
WANG Zhi-guang, ZHU Zhi-yong, JIN Yun-fan
(*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: This article introduces briefly the experimental and theoretical methods that have been used to study high-energy proton-induced single event effect in semiconductor devices. The theoretical methods including nuclear reaction analysis method and semi-empirical method are presented. The relationship of upset cross section between proton and heavy ions is described. Finally, on-orbit proton upset rates are predicted by using the heavy-ion test data.

Key words: single event effect; proton; semiconductor device

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10075064)