

浮栅 ROM 器件的质子辐射效应实验研究

贺朝会 耿 斌 陈晓华 杨海亮

(西北核技术研究所 西安 710024)

摘 要

给出了浮栅 ROM 器件的质子辐射效应实验结果. 认为浮栅 ROM28C256 和 29C256 的质子辐射效应不是单粒子效应, 而是质子及其次级带电粒子产生的累积剂量造成的总剂量效应. 器件出现错误有个质子注量阈值. 对于 29C256, 高温加电退火容易消除质子产生的辐射损伤; 对于 28C256, 高温加电退火不易消除质子产生的辐射损伤. 动态监测和静态加电的器件都出现数据错误, 且不能用编程器重新写入数据. 然而不加电的器件在更高的质子注量辐照下未出现错误. 对于应用浮栅 ROM 器件的航天器电子系统, 冷备份是提高其可靠性的有效手段之一.

关键词 FLASH ROM — EEPROM — 质子 — 单粒子效应 — 总剂量效应

1 引言

新型浮栅 ROM 器件 (主要是 FLASH ROM 和 EEPROM) 在单一的工作电压下, 就可以完成读出、擦除和写入功能, 克服了原有只读存储器 (ROM) 的不足; 而且和静态随机存取存储器 (SRAM) 相比, 其存储的数据是非挥发性的, 即使掉电, 也不会丢失数据. 因此, 浮栅 ROM 器件已开始应用于航天器的电子系统中. 开展浮栅 ROM 器件的辐射效应研究具有重大的现实意义和应用价值.

空间辐射环境中存在着大量的高能质子, 可以引起半导体器件发生单粒子效应, 已严重影响卫星的可靠性和寿命^{[1],[2]}. 静态随机存取存储器 (SRAM) 的质子辐射效应是单粒子效应^[3], 而浮栅 ROM 器件的 14 MeV 中子辐射效应是中子产生的次级带电粒子的累积剂量造成的总剂量效应^{[4],[5]}. 那么, 浮栅 ROM 器件的质子辐射效应是什么效应? 国内外未见关于浮栅 ROM 器件质子辐射效应方面的报道.

2 浮栅 ROM 的结构及存储原理

浮栅 ROM 存储单元的基本结构如图 1 所示^[6], 不同于 SRAM. 它有两个栅: 一个控制栅和一个位于沟道和控制栅之间的浮栅. 沟道和浮栅之间的氧化层很薄, 电子可以通过 F-N 隧道效应或热电子注入机制在浮栅和源区或沟道之间传输. 根据浮栅的带电状态, 存储单元就成为耗尽型或增强型的晶体管. 对于控制栅上的一定电压, 晶体管就处于截止或导通状态, 对应于存储信息“0”或“1”. 一般情况下, 浮栅 ROM 写入信息前, 浮栅上无

2001-07-02 收到原稿, 2002-02-04 收到修定稿

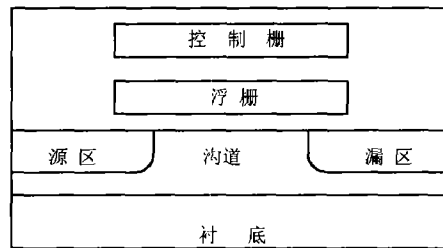


图1 浮栅 ROM 存储单元的基本结构示意图

Fig.1 Basic structure of the memory cell of floating gate ROM

电子, 晶体管导通, 表示存“1”。写入信息的过程就是使电子注入浮栅, 晶体管截止, 表示存“0”。

EEPROM 存储单元外围有锁存器、译码器、缓冲器、时钟、锁存控制和逻辑控制等控制电路, 实现电可擦除和在线编程^[7]。为了减少读写时间, FLASH ROM 中还有命令状态器 (command state machine) 和写状态器 (write state machine) 等控制单元^[8]。

3 实验方法

实验是在中国科学院高能物理研究所 35 MeV 质子直线加速器上进行的。该加速器提供的质子束流, 平均流强在 μA 量级, 大于半导体器件辐射效应所需束流强度 5—6 个量级。我们采用金箔散射法降低束流, 既可以成量级地减弱束流, 又能充分利用束流。

根据卢瑟福散射理论, 计算了不同流强的质子束入射在不同厚度的金靶上, 在不同散射角度下, 不同距离上的散射质子束强度。选取 150 mg/cm^2 厚的金箔做靶, 在 45° 散射角, 距靶 25 cm 处布置被辐照器件和测量散射质子流强的法拉第探测器。散射质子能量为 31.9 MeV。

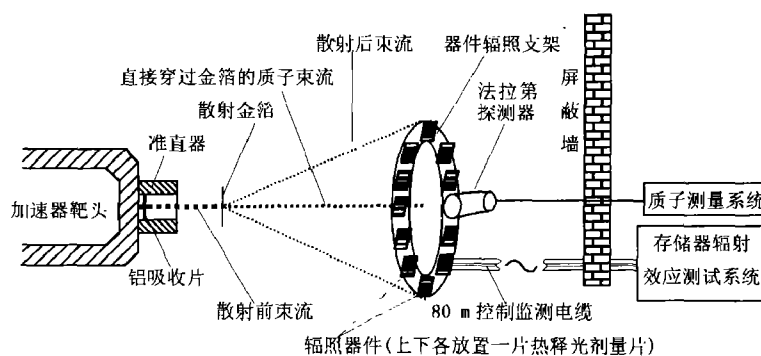


图2 31.9 MeV 质子辐射效应实验布局

Fig.2 Schematic map of proton irradiation experiment

由于用散射束进行辐照实验, 散射角度的误差对质子注量的计算影响很大, 因此, 设计加工了专用质子辐照支架, 可一次放置被辐照器件十几个, 充分利用了束流, 并保证每

个器件与散射质子束垂直 (即质子束垂直入射器件). 为了使束流集中, 减小理论计算的误差, 在散射靶前装有长 30 mm、直径 15 mm 的准直器. 实验布局如图 2 所示.

总的质子流强通过 3 种方法测量: 1) 根据电流脉冲宽度、幅度和重复频率, 理论计算平均流强; 2) 通过束流积分器实测束流强度; 3) 通过电流感应, 把电流信号转换成电压信号, 实时采样, 测量束流强度. 3 种方法的测量误差小于 5%.

研制了弱流质子束测量系统, 用来测量散射后的质子束流^[9]. 法拉第探测器放在与器件对称的位置上 (见图 2). 实验中测到了 pA 量级的质子流强, 平均质子注量率为 $9.5 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 对应的剂量率在 2.4—3.1 rad(Si)/s 之间. 通过对每一时刻的质子流强积分, 可以给出任一时间段内的质子注量和电离总剂量.

根据卢瑟福散射理论, 在距散射靶相同距离处, 同一散射角上, 相同立体角内, 被辐照器件的质子注量应当相等, 且等于弱流质子测量系统测得的质子注量. 但由于实验中存在的实际偏差, 有可能导致质子注量不同. 因此, 我们在每个器件和法拉第探测器上, 布置了热释光剂量片, 来测量质子注量的均匀性. 理论计算每个质子在热释光剂量片上的能量沉积, 根据热释光测量结果, 反过来推算质子注量. 由于热释光剂量片对 γ 射线灵敏, 质子辐照伴生的 γ 射线会给测量带来误差. 但由于 γ 场分布均匀, 通过热释光测量可以给出质子注量的相对值.

实验用器件为 28C256 和 29C256. 6 个动态监测 (其中 28 系列 3 个, 29 系列 3 个); 6 个静态加电 (28、29 系列各 3 个); 6 个静态不加电 (28、29 系列各 3 个). 辐照前每个字节写入数据 “55H”, 即: “0” 与 “1” 相互间隔. 实验状态分为 3 种: 不加电、静态加电和动态监测. 不加电就是器件管脚悬空, 贴在辐照板上; 静态加电就是把器件插入辐照板的插座上, 供给 5 V 电压, 但在辐照过程中, 不读取数据, 不对器件进行任何操作. 对于不加电和静态加电的器件, 辐照后读取数据, 与辐照前做比较. 动态监测就是辐照过程中循环读取器件中的数据, 与辐照前做比较, 记录出错单元, 统计出错类型和数量.

4 实验结果与分析

表 1、2 分别给出了 28C256 和 29C256 的实验结果.

表 1 28C256 的实验结果

状态	编号	质子注量 ($\times 10^{11}/\text{cm}^2$)	位错误数
动态监测	28-1	2.676	110 946
	28-2	2.737	105 392
	28-3	2.461	91 720
	28-4	2.750	90 505
静态加电	28-5	2.740	71 944
	28-6	2.903	62 936
	28-7	4.353	
静态不加电	28-8	7.159	未发现错误
	28-9	5.009	

28-7—28-9 和 29-7—29-9 在不加电状态下辐照, 质子注量大于 $3.228 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$. 辐照后测量, 未观察到错误.

表 2 29C256 的实验结果

状态	编号	质子注量 (10^{11} cm^{-2})	位错误数
动态监测	29-1	2.845	105 424
	29-2	3.074	98 437
	29-3	3.506	100 070
	29-4	2.619	100 467
静态加电	29-5	2.944	101 300
	29-6	3.181	101 338
	29-7	3.228	
静态不加电	29-8	3.877	未发现错误
	29-9	4.025	

表 3 29-1 开始出错时的错误单元和数据

测量时间	错误单元和数据	错误数
000518	04A00: 05	2
000549	03E00: 05	2
000650	01200: 00	4
000703	06000: 00	4
000742	02600: 01 04C00: 00	7
000746	03D00: 05	2
000754	00C00: 00 03400: 00 05800: 00	12
000758	01200: 00	4
000802	04C00: 00	4
000806	02000: 00 04800: 00	8
000814	00800: 00	4
000818	01D00: 00 03600: 00 03D00: 05	10
000822	03A00: 05	2
000827	03200: 00 05400: 00	8
000831	00000: 00 00800: 00 00C00: 00 03E00: 00	16
000835	01200: 01	3
000843	01D00: 00 02600: 01 05200: 00	11
000847	01D00: 01	3
000851	00B81: D5 00C00: 00 02A00: 05 03200: 00	11
000856	03D00: 00 04400: 00	8
000900	00000: 00 00781: 75	5
000903	00000: 00 00A00: 05 01FA1: 75 02800: 00	11
000907	01583: 75 07800: 00	5
000911	00000: 00 003A2: FD 04000: 00	11
000916	00BA0: 7D 017A0: 75 01FA1: 75 02000: 00	8
000920	00B83: FD 01200: 01 02000: 00 02A00: 05 03500: 05 04D00: 00 05400: 00	22

28-4—28-6 和 29-4—29-6 在加电 (+5 V) 状态下辐照, 质子注量大于 $2.619 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, 与动态监测器件辐照的质子注量相当. 辐照后测量, 错误数与动态监测器件的错误数接近, 说明加电状态下读取数据与否对结果影响不大.

动态监测的所有器件都出现了很多错误, 错误出现不是随机的, 存在质子注量阈值. 图 3 为动态监测的 28C256 和 29C256 出错数随质子注量变化的关系曲线. 当质子注量达到 $9.275 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 时, 29-1 开始出现 2 位 “1”→“0” 错误 (即出错的起始注量); 质子注量达到 $9.513 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 时, 出现 “0”→“1” 错误. 刚开始出错时, 错误数及错误地址都是不确定的. 表 3 给出了 29-1 刚开始出错时的错误单元和数据. 错误数在某一时刻错误多, 而在下一时刻, 错误反而少了; 某一单元在这一时刻出错, 而在下一时刻却是正确的, 出现不确定错误.

其他器件的出错规律相同, 只是出错时的质子注量有所不同. 表 4 给出了各个器件

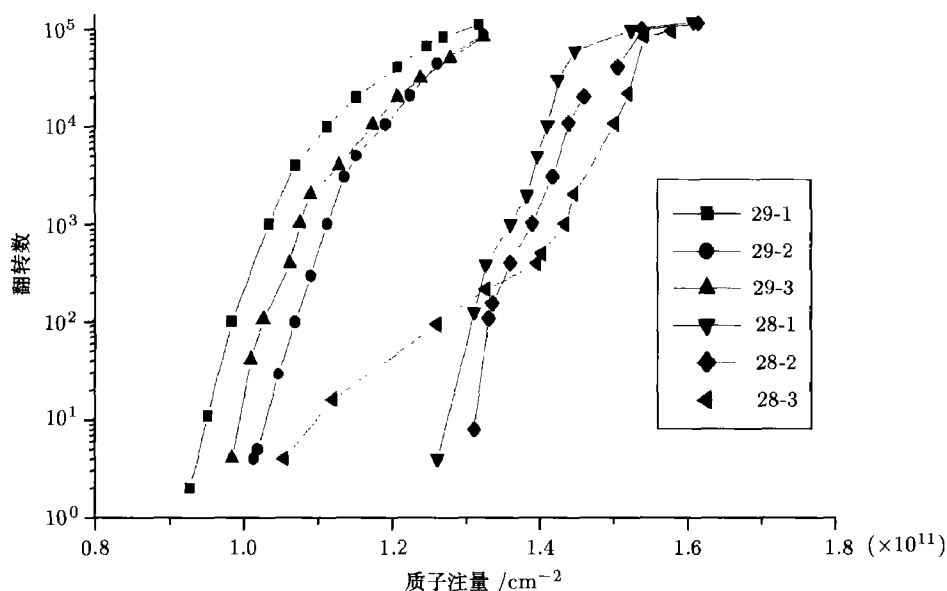


图 3 动态监测的 28C256 和 29C256 出错数随质子注量变化关系

Fig.3 Characteristic of errors versus proton flux for 28C256 and 29C256 that are measured during irradiation

表 4 器件出现不同错误的质子注量阈值

器件编号	质子注量 (10^{11} cm^{-2})	
	“0”→“1”	“1”→“0”
28-1	1.328	1.262
28-2	1.337	1.312
28-3	1.404	1.055
29-1	0.951	0.928
29-2	1.019	1.013
29-3	0.984	0.984

表 5 器件中断测量前后错误数的比较

器件编号	中断测量前		中断测量后	
	“0”→“1”	“1”→“0”	“0”→“1”	“1”→“0”
28-1	118 957	1786	66 300	14 685
28-2	113 879	2297	63 811	20 147
28-3	95 071	4334	58 094	14 658
29-1	81 870	108	19 030	74 981
29-2	87 926	487	21 285	71 798
29-3	83 776	428	20 076	75 017

出现“0”→“1”和“1”→“0”错误时的质子注量。“1”→“0”错误比“0”→“1”错误容易发生。但随着质子注量的增加,“0”→“1”错误增加很快,最后主要是“0”→“1”错误,见图4。实验中,分别中断测量28C256几分钟和中断测量29C256几十分钟后,重新测量,器件的错误数完全未按中断前的变化趋势发展,差别很大。表5为各个器件中断测量前后错误数的比较。中断测量后重新测量,“0”→“1”错误数减少,并随着时间的推移,减少到几十个、几个、甚至0;“1”→“0”错误数增加,并随着时间的推移越来越多。错误数变化与中断时间长短有关,中断时间越长,差别越大,出现量级差异。

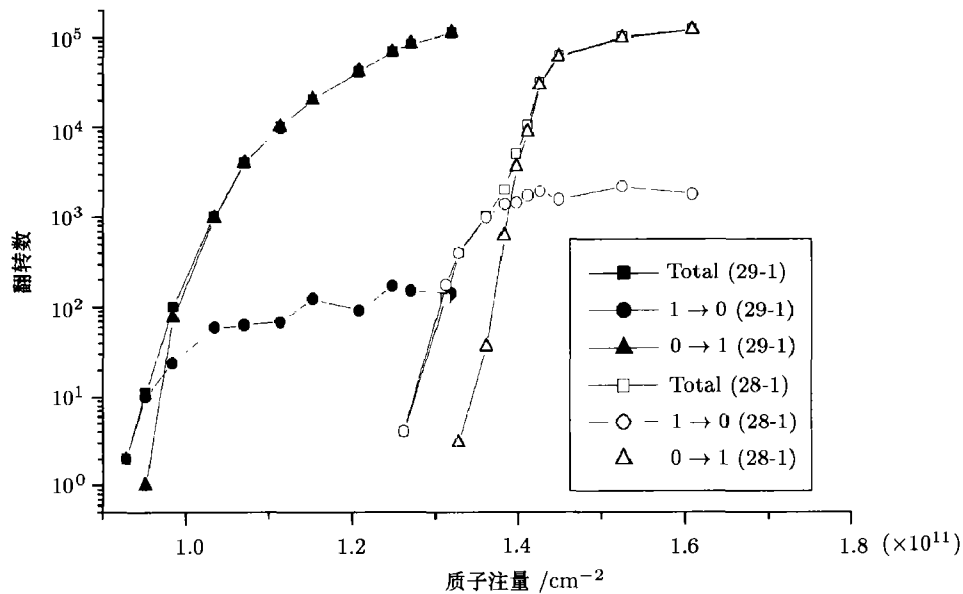


图4 “0”→“1”和“1”→“0”错误变化规律

Fig.4 Characteristic of errors of “0”→“1” and “1”→“0” versus proton flux for 28C256 and 29C256 that are measured during irradiation

动态监测和静态加电的所有器件都出现了数据错误,而不加电的器件在质子注量大于前者注量的情况下,仍未出错。

实验后用编程器进行重新编程,发现不加电的器件可重新编程,静态加电和动态测量的器件都不能重新编程。更进一步表明,加电与否对器件应用影响很大。

表6 不同时刻器件错误数比较

器件编号	测量时间 (0232)			测量时间 (0933)		
	“0”→“1”	“1”→“0”	Total	“0”→“1”	“1”→“0”	Total
28-1	0	127 741	127 741	108 063	2289	110 352
28-2	2	127 775	127 777	103 020	1974	104 994
28-3	23	126 879	126 902	89 950	1714	91 664
29-1	0	126 989	126 989	11 769	90 077	101 846
29-2	11	127 335	127 346	26 677	66 875	93 552
29-3	2	127 491	127 493	25 677	71 058	96 735

对于动态监测的器件, 实验观察到有一定的退火效应, 见表 6. 2:32 左右停止辐照, 关掉计算机, 停止测量. 9:33 左右重新测量, “1”→“0”和“0”→“1”错误出现量级差异. 与表 5 的变化趋势刚好相反. “0”→“1”错误成量级地增加; 对于 28C256, “1”→“0”错误成量级地减小. 总的错误数都有不同程度的减小, 似乎存在退火效应. 因此, 对于静态加电和动态测量的器件, 在室温下加电退火 112 h 30 min 后, 仍然不能重新编程; 在 100°C 下加电退火 44 h 20 min 后, 29C256 全部可以编程; 28C256 全部可以写入数据 “55H”, 但全部不能写入数据 “AAH”. 这与辐照时存储单元的状态有关, 辐照时存储单元的数据为 “55H”. 28C256 继续在 100°C 下加电退火 194 h 50 min, 累积退火 239 h 10 min 后, 28-6 可以编程写入数据 “AAH”, 其他器件仍然不行. 28-1—5 继续在 100°C 下加电退火 255 h 10 min, 累积退火 494 h 20 min 后, 28-2 和 28-4 可以编程写入数据 “AAH”, 其他器件仍然不行. 可见, 对于 FLASH ROM 29C256, 高温加电退火容易消除质子产生的辐射损伤; 对于 EEPROM 28C256, 高温加电退火不易消除质子产生的辐射损伤.

31.9 MeV 质子辐射下, 浮栅 ROM 器件的出错规律与 14 MeV 中子辐照下完全一致 [4],[5]. 浮栅 ROM 器件的 31.9 MeV 质子辐射效应可能是质子及其次级带电粒子产生的累积剂量造成的总剂量效应. 为此, 我们计算了器件处的电离总剂量. 器件出现数据错误时的累积剂量在 2×10^4 — 3×10^4 rad (Si) 左右, 见表 7.

表 7 器件出现不同错误时的累积剂量

器件编号	累积剂量 (10^4 rad (Si))	
	“0”→“1”	“1”→“0”
28-1	3.063	2.911
28-2	3.084	3.026
28-3	3.239	2.434
29-1	2.194	2.141
29-2	2.351	2.337
29-3	2.270	2.270

应用总剂量效应机理可以解释大部分实验现象: (1) 质子及其次级带电粒子在浮栅和周围的绝缘层内电离产生电子空穴对. 电子空穴在电场的作用下漂移, 在界面处形成界面陷阱电荷, 使晶体管的阈值电压向负方向漂移. 当界面陷阱电荷积累到一定程度, 使原来截止的晶体管导通, 存储单元的状态发生变化, 出现数据错误. 由于界面陷阱电荷的积累需要一定的剂量积累, 因此, 错误发生存在质子注量阈值. 随着质子注量的增加, 阈值电压漂移的晶体管数目增加, 错误数增加. (2) 阈值电压漂移量不大时, 晶体管处于截止和导通的临界状态, 没有使存储单元由一种状态彻底变为相反状态. 因此, 在存储单元状态彻底改变之前的一段时间内, 其状态是不确定的. 所以, 器件刚开始出错时, 错误数及错误地址都是不确定的. (3) 质子及其次级带电粒子产生的电子空穴对在电场下, 其漂移有方向性, 且迁移率大, 容易在界面处形成界面态; 无电场时, 迁移率小, 复合率大, 很难在界面处形成界面态. 因此, 器件在加电状态下出现错误, 而在不加电状态下不出现错误.

随后, 利用 ^{60}Co γ 源对浮栅 ROM 28C256 和 29C256 进行了总剂量效应实验. 其

效应现象与 31.9 MeV 质子辐射效应完全一致^[10], 说明浮栅 ROM 28C256 和 29C256 的 31.9 MeV 质子辐射效应是总剂量效应。

另外, 在相同的实验条件下, 测量了静态随机存取存储器 (SRAM) 的 31.9 MeV 质子辐射效应^[3]。其效应表现为单粒子效应: 数据出错无质子注量阈值; 错误数的增加率是一定的; “1”→“0”和“0”→“1”错误出现的概率相当。而浮栅 ROM 28C256 和 29C256 的 31.9 MeV 质子辐射效应与 SRAM 迥然不同。这是由于二者存储单元的结构不同的缘故。

根据以上分析可以认为, 浮栅 ROM 28C256 和 29C256 的 31.9 MeV 质子辐射效应不是单粒子效应, 而是质子及其次级带电粒子产生的累积剂量造成的总剂量效应。

5 结论

浮栅 ROM 28C256 和 29C256 的 31.9 MeV 质子辐射效应不是单粒子效应, 而是质子及其次级带电粒子产生的累积剂量造成的总剂量效应。器件出现数据错误有个质子注量阈值, 当质子注量小于某一个值时, 无数据错误。当质子注量达到一定值时, 开始出现数据错误。随着质子注量的增加, 错误数增加。器件刚开始出错时, 错误数及错误地址都是不确定的。对于 FLASH ROM 29C256, 高温加电退火容易消除质子产生的辐射损伤; 对于 EEPROM 28C256, 高温加电退火不易消除质子产生的辐射损伤。动态监测和静态加电的器件都出现数据错误, 且不能用编程器重新写入数据。然而不加电的器件在更高的质子注量辐照下未出现错误, 并且可以用编程器重新写入数据。因此, 对于应用浮栅 ROM 器件的航天器电子系统, 冷备份是提高其可靠性的有效手段之一。

参 考 文 献

- [1] 蒲剑, 叶宗海. 空间粒子辐射对卫星中集成芯片的影响. 空间科学学报, 1993, **13**(4):292—298
- [2] 古士芬等. 美国儿架航天飞机所发生的 SEU 研究. 空间科学学报, 1998, **18**(3):253—260
- [3] 贺朝会等. 静态随机存取存储器质子单粒子效应实验研究. 核电子学与探测技术, 2000, **20**(4):253—257
- [4] 贺朝会等. EEPROM 28C64 和 28C256 的 14 MeV 中子辐照特性. 微电子学, 1999, **29**(4):262—266
- [5] 贺朝会等. FLASH ROM 28F256 和 29C256 的 14 MeV 中子辐照实验研究. 核电子学与探测技术, 2000, **20**(2):115—119
- [6] 刘寅, 朱钧. 一种 FLASH 存储单元的结构及功能分析. 微电子学, 1998, **28**(1):32—35
- [7] Wrobel T F. Radiation Characterization of a 28C256 EEPROM. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1989, **36**(6):2241—2251
- [8] Schwartz H R, Nichols D K, Johnston A H. Single-event upset in flash memories. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1997, **44**(6):2315—2324
- [9] 贺朝会等. pA 量级质子束流测量系统. 核电子学与探测技术, 2000, **20**(1):40—42
- [10] 贺朝会等. 浮栅 ROM 器件 γ 辐射效应实验研究. 核电子学与探测技术, 2002, **22**(4):261—266

EXPERIMENTAL STUDY ON PROTON IRRADIATION EFFECTS OF FLOATING GATE ROMS

HE Chaohui GENG Bin CHEN Xiaohua YANG Hailiang

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xian 710024)

Abstract

Experimental results of proton irradiation effects are given for Floating gate ROMs. The proton irradiation effects in FLASH ROM and EEPROM are the total dose effects rather than the Single Event Effects. These are attributed to the accumulative dose of both original and secondary protons. There is a proton fluence threshold. Errors occur when proton fluence is above the threshold. It is easy to eliminate the damage produced by proton irradiation for 29C256 by annealing in power on under 100°C, however, it is difficult for 28C256. Data errors occur in devices that are measured during irradiation and irradiated in power on, moreover, new data cannot be written in these devices with programmer. However, under more proton fluence, there is no error in devices in power off mode and new data can be written in these devices with programmer. It is an effective method to backup some devices in power off mode to improve the reliability of spacecrafts in which FLASH ROMs and EEPROMs are used.

Key words FLASH ROM, EEPROM, Proton, Single event effects, Total dose effect