

文章编号 : 1672-2892(2010)01-0087-04

## 抗辐射加固封装国产存储器的电子辐照试验

卫 宁<sup>1</sup>, 王剑峰<sup>1</sup>, 杜 婕<sup>1</sup>, 周聪莉<sup>1</sup>, 郭 旗<sup>2</sup>, 文 林<sup>2</sup>

(1. 航天时代电子公司 第 771 研究所, 陕西 西安 710075; 2. 中国科学院 新疆理化技术研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘 要:** 用特种复合屏蔽材料和缝焊封接工艺进行抗辐射封装, 在普通封装存储器 28C256 的基础上, 研制了抗辐射封装加固存储器 LS28C256R。设计专用试验测试电路板和测试软件, 以进行存储器器件加电工作条件下电子加速器辐照试验的动态测试。辐照对比试验结果表明, 加固存储器 LS28C256R 的抗电子源辐照能力比普通封装存储器 28C256 提高 1~2 个数量级, 为商用成品 (Commercial Off-The-Shelf, COTS) 器件在空间领域中的应用提供了技术支撑。

**关键词:** 抗辐射封装; 屏蔽; 存储器芯片; 电子辐照试验

中图分类号: TN43; TL75<sup>+</sup>2.2

文献标识码: A

## Electron irradiation test of anti-irradiation hardened package for home-made memory devices

WEI Ning<sup>1</sup>, WANG Jian-feng<sup>1</sup>, DU Jie<sup>1</sup>, ZHOU Chong-li<sup>1</sup>, GUO Qi<sup>2</sup>, WEN Lin<sup>2</sup>

(1. The 771th Institute, Aerospace Times Electronics Corporation, Xi'an Shaanxi 710075, China;

2. Xinjiang Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Urumchi Sinkiang 830011, China)

**Abstract:** Radiation hardened packages were prepared by using special composite shielding material and welding technique. Hardened package memory LS28C256R was fabricated based on general package memory 28C256. Special experimental testing circuit and testing software were designed to dynamically test memory devices using linear electron accelerator. The result of contrastive irradiation test indicated that the performance of the hardened package memory LS28C256 in anti-electron irradiation was 1~2 orders of magnitude higher than that of the general package memory. This hardened package method had provided technical support for the space application of Commercial Off-The-shelf(COTS) devices.

**Key words:** anti-irradiation hardened package; shielding; memory chip; electron irradiation test

空间辐射对互补金属氧化物半导体 (Complementary Metal-Oxide Semiconductor, CMOS) 器件产生电离辐射总剂量效应、单粒子效应等。空间辐射主要来自宇宙射线、太阳辐射和 Van Allen 辐射带。在低地轨道 (Low Earth Orbit, LEO)、太阳同步轨道 (Sun Synchronous Orbit, SSO) 和地球同步轨道 (Geostationary Earth Orbit, GEO) 的辐射环境中, LEO 和 SSO 总剂量主要由电子和质子贡献, GEO 总剂量主要由电子贡献。电子的能量在 4 keV 到 4 MeV 之间, 质子的能量在 30 MeV 到 100 MeV 之间。辐射剂量率分别达到 1 Gy/h 和数十 Gy/h。

电离辐射在 CMOS 器件的栅与衬底间的 SiO<sub>2</sub> 绝缘层中产生空穴-电子对, 当栅上加正偏压时, 迁移率较大的电子大部分逸出至栅, 有一部分电子与空穴复合, 大部分空穴在正电场作用下向 Si/SiO<sub>2</sub> 界面输运, 且有一部分空穴被界面处 SiO<sub>2</sub> 一侧的缺陷俘获, 被俘获空穴的份额取决于氧化物退火的条件。这些俘获空穴要经历一个漫长而复杂的与电子的复合过程, 复合的速度与时间的对数成线性关系。在界面附近形成的正电荷层改变了 Si/SiO<sub>2</sub> 界面势位, 必须在栅上加负电压才能抵消界面处正电荷层的影响。这就使 N 沟 MOS 晶体管的阈值电压向负方向漂移, 从而使 MOS 器件的所有电参数产生退化<sup>[1]</sup>, 造成 CMOS 器件的域值电压漂移和静态漏电流增大, 导致器件电参数退化, 甚至使航天电子系统功能失效。上世纪 80 年代初, 国外研究人员开始重视 CMOS 器件的抗辐射加固封装技术, 并进行了器件和多芯片模块 (Multi-Chip Module, MCM) 的抗辐射封装加固技术试验。试验证明, 封装加固技术对于屏蔽中子和伽玛射线较困难, 但对于屏蔽空间辐射环境的高能电子和质子相对有效, 尤其对 Van Allen 辐射带的电子和质子来说, 屏蔽效果明显。抗辐射封装加固技术的核心是将集成电路芯片与空间辐射环境

进行适当的屏蔽和物理隔离。封装加固是一种扩展 CMOS 器件使用寿命的直接而有效的途径。

美国 SEi 公司的 RAD-PAK 和 RAD-COAT 等专利产品,其抗辐射总剂量的指标为 100 krad(Si),抗单粒子事件的能力也有所改善。其主要工艺方法是将 Ta,W,Al,Kovar 等材料和高分子材料设计到集成电路芯片或 MCM 模块的封装结构中。RAD-PAK 产品已销售到世界各主要工业国家,成为国际空间工业抗辐射电路的来源之一<sup>[2]</sup>。法国 3D-PLUS 公司也有抗辐射封装的器件和 MCM 模块等类似产品,应用于欧洲伽利略全球导航系统中<sup>[3]</sup>。法国 3D-PLUS 公司在《News from prospace》刊物上介绍的 Walopack 钨铝防护材料,采用高 Z 材料和低 Z 材料的组合结构,主要优点是能够有效地屏蔽韧致辐射,其抗电离辐射总剂量的指标达到 200 krad(Si)。

2000 年以来,针对 GEO,LEO 和 SSO 空间辐射环境对 CMOS 器件造成的总剂量效应,771 所开展了 CMOS 器件抗辐射封装加固技术研究。在抗辐射加固材料研究方面,使用金属材料和高分子材料研制了抗辐射复合材料和专用的中温固化胶粘剂等。在封装技术方面,与陶瓷外壳生产企业协作,研制了专用的异形陶瓷外壳。异形陶瓷外壳执行 GJB1420A-1999《半导体集成电路外壳总规范》,性能指标满足设计要求。异形陶瓷外壳比普通外壳高,其外形尺寸、引线尺寸与标准 DIP 封装器件兼容。存储器是各种半导体器件中抗电离辐射总剂量能力较差的品种之一,我们选用国产存储器芯片 28C256,该芯片是仿美国 ATMEL 公司的同类产品,按照集成电路单芯片封装和气密性封装的技术要求,采用复合屏蔽材料和缝焊封接工艺进行抗辐射封装加固,保证大腔体器件封装的密封性和高可靠性<sup>[4]</sup>,完成了国产抗辐射封装存储器(以下简称加固存储器)LS28C256R 的研制。为检验其加固性能,与普通封装存储器(以下简称普通存储器)28C256 一起进行辐照对比试验。

## 1 辐照试验方法

由于我国目前尚无在辐射条件下对 LS28C256R 器件进行全参数测试的设备和试验条件,故参照国军标 GJB-548A-96 和美军标 MIL-STD-883 相关标准,在电子加速器辐照条件下,对加固存储器 LS28C256R 和普通存储器 28C256 的实际应用功能进行对比试验。据悉,美国研究人员在空间辐射效应手册(SPACE RADIATION EFFECTS HANDBOOK)中对美军标 MIL-STD-883 的方法 1019.4 提出了改进建议,在评价其专利产品 RAD-PAK 特殊封装器件的电离辐射总剂量性能时,也是采用了单能电子和质子标准入射的试验数据来说明的,试验方法也是采用了专利产品 RAD-PAK 特殊封装器件与普通封装器件进行对比测试<sup>[5]</sup>。

按照 GJB548A-96《微电子器件试验方法和程序》中方法 5004A 筛选程序的有关规定,参照 B 级器件筛选测试的有关要求,确定了加固存储器 LS28C256R 的筛选测试项目的内容、方法、条件和说明。辐照试验样品在 771 所通过了筛选测试和老炼运行。加固存储器 LS28C256R 的外形图见图 1。普通存储器 28C256 的外形图见图 2。我们研制了专用测试电路板和辐射试验电路板,编制了相应的测试软件。专用测试电路板和辐射试验电路板的原理图见图 3。测试软件框图见图 4。

辐照试验前,首先将试验计算机、专用检测电路板、辐射试验电路板、直流电源、测试电缆等进行连接、调试,并采用编程器给样品器件写入数据“55H”。试验样品安装在辐射试验电路板上,每 2 只器件为一组,分组进行辐照。加固存储器 LS28C256R 与普通存储器 28C256 辐照对比试验在中科院新疆理化技术研究所电子加速器上进行。

确认整个测试系统调试通过后,将辐射试验电路板送入电子加速器辐射场内辐照,同时开始计时。采用单一电子能量(一般为 1.0 MeV)垂直入射方式辐射,辐射剂量从零开始,逐步增大。在加电运行条件下,在监控室内通过计算机动态监测样品器件的工作状态,同时监测直流电源的电压、电流变化情况。利用计算机对样品器件的运行状态进行全程实时的测试记录,获取样品器件的翻转情况和位错误数,包括翻转数据和翻转地址。

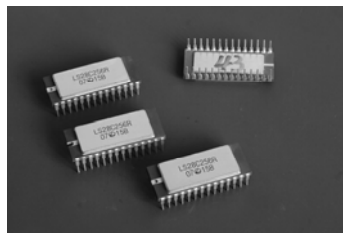


Fig.1 LS28C256R hardened package memory  
图 1 LS28C256R 抗辐射封装存储器

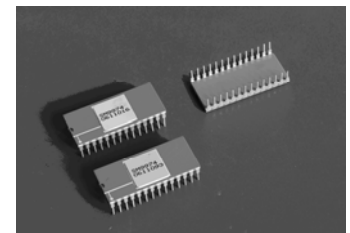


Fig.2 28C256 general package memory  
图 2 28C256 普通封装存储器

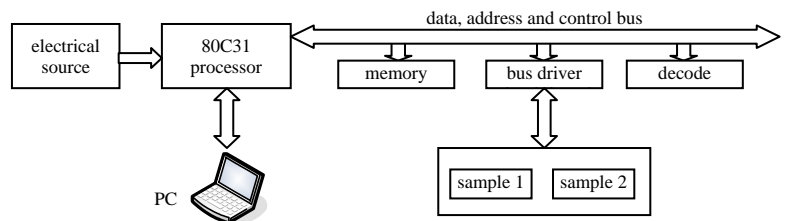


Fig.3 Block diagram of special experimental testing circuit  
图 3 专用测试电路板和辐射试验电路板的原理图

器件功能损坏的失效判据为：当样品器件发生一位数据翻转时，可以确定该样品器件的翻转阈值；当样品器件的数据翻转数量达到器件容量的 5% 时，认为该样品器件已发生雪崩翻转，器件功能彻底损坏。

如果在辐照总剂量达到 100 krad(Si) 时，样品器件未发生一位数据翻转，器件功能始终正常，则终止辐照试验。待室温退火 168 h 后，移位进行该批辐照总剂量达到 100 krad(Si) 的样品器件的参数测试。

对第 5 组加固存储器 LS28C256R 样品器件进行损伤阈值摸底试验。一开始也是选用 1.0 MeV 的电子能量进行辐照；当辐照总剂量达到 100 krad(Si) 时，如果样品器件未发生数据翻转，器件功能始终正常，则加大电子能量为 1.8 MeV，保持剂量率不变，一直辐照到该样品器件功能失效为止。其功能失效时的总剂量即为加固存储器 LS28C256R 的损伤阈值。

## 2 试验样品、试验条件和布局

### 2.1 试验样品

- a) 加固存储器 LS28C256R，6 只，编号为 01#,03#,08#,22#,37#,44#；
- b) 普通存储器 28C256，4 只，编号为 1#,2#,3#,4#。

试验样品器件分组插在辐射试验电路板上接受电子辐照。

### 2.2 试验条件

- a) 辐射源：中科院新疆理化技术研究所 ELV-8 型 2 MeV 电子加速器；
- b) 电子能量：1.0 MeV, 1.8 MeV；
- c) 电子通量： $6.25 \times 10^9 \text{ e}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ， $1.25 \times 10^{10} \text{ e}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ；
- d) 剂量率：1.5 Gy·s<sup>-1</sup>；
- e) 环境温度：25 ；

f) 测试设备：法拉第筒、束流积分器、771 所自制的辐射试验电路板(实物见图 5)、专用测试电路板(实物见图 6)、专用测试软件、PC 机以及直流电源、测试电缆和万用表等。

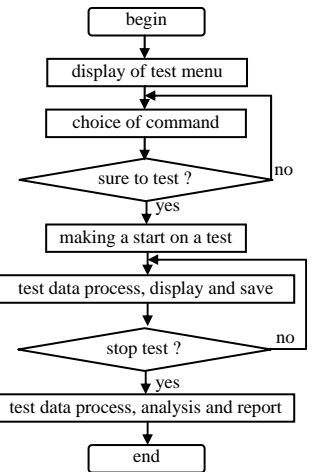


Fig.4 Diagram of testing software  
图 4 测试软件框图

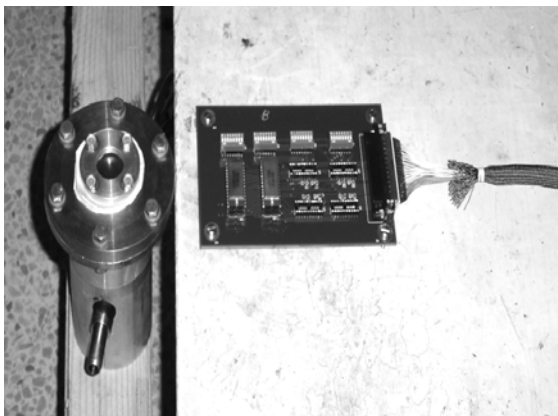


Fig.5 Radiation experimental circuit  
图 5 辐射试验电路板

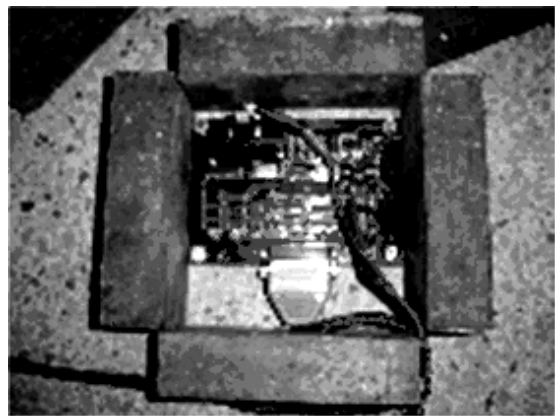


Fig.6 Special testing circuit  
图 6 专用测试电路板

### 2.3 试验设备布置

试验设备的布置如图 7 所示。辐射试验电路板放置在电子加速器引出窗正下方的吸热靶上，剂量测试仪的收集传感器也靠近辐射试验电路板放置。因专用测试电路板与辐射试验电路板的连接电缆线长度有限，故采用铅砖垒成一个小的隔墙以屏蔽辐射。电源、计算机、剂量测试仪等均放置在测试间内。

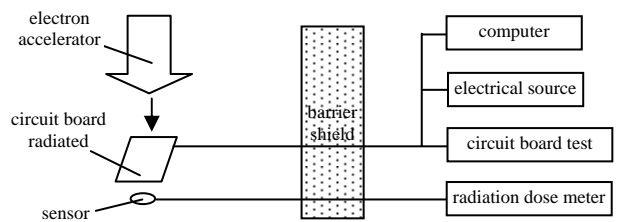


Fig.7 Diagram of the layout of test equipment  
图 7 试验设备的试验布置示意图

### 3 试验结果

根据 LS28C256R 样品器件在不同辐射剂量下发生的功能失效情况,对功能始终正常的样品器件,待室温退火 168 h 后,移位进行该批样品器件的参数测试。表 1 给出试验样品器件的失效数据和剂量耐量。

表 1 加固存储器与普通存储器辐照试验数据表(器件 L 地址为 0000-7FFF,器件 H 地址为 8000-FFFF)

Table 1 Experimental data of hardened and general memories (L for component of address 0000-7FFF, H for component of address 8000-FFFF)

group ID	name and code of sample	flip-flop transition time /s	radiation time /s	flip-flop dose /krad(Si)	damage dose /krad(Si)	electron energy /MeV	remark
1	LS28C256R 44#	/	660	/	/	1.0	L
	LS28C256R 37#	/	660	/	/	1.0	H
2	28C256 1#	208	355	31.2	53.25	1.0	L
	28C256 2#	208	355	31.2	53.25	1.0	H
3	LS28C256R 08#	/	660	/	/	1.0	L
	LS28C256R 22#	/	660	/	/	1.0	H
4	28C256 3#	37	142	5.55	21.3	1.8	L
	28C256 4#	37	142	5.55	21.3	1.8	H
5	LS28C256R 01#	/	3 572	/	/	1.8	L
	LS28C256R 03#	1 881	3 332	282.15	499.8	1.8	H

从表 1 的数据可以看出:

- 在 1.0 MeV 电子能量辐照条件下,普通存储器 28C256 的抗电离辐射能力有较大差异。其中 1#,2#和 3#,4#器件分别辐照到 208 s 和 37 s 时出现了翻转,其翻转阈值分别为 31.2 krad(Si)和 5.55 krad(Si);继续辐照分别到 355 s 和 142 s,总剂量分别为 53.25 krad(Si)和 21.3 krad(Si)时器件损坏。
- 在 1.0 MeV 电子能量辐照条件下,1,3 两组加固存储器 LS28C256R 的 08#,22#和 37#,44#器件,辐照 660 s,辐照剂量达到了 100 krad(Si)。此后停止了辐照。这两组样品器件都没有达到翻转阈值,器件功能始终正常,经室温退火 168 h 后移位测试,参数测试结果均正常。
- 第 5 组器件进行破坏性辐照。加固存储器 LS28C256R 的 03#器件在 1.0 MeV 电子能量下辐照到 100 krad(Si),再在 1.8 MeV 电子能量下继续辐照,到 1 881 s 时才出现翻转,其翻转阈值为 282.15 krad(Si);辐照到 3 332 s 时器件损坏,损坏阈值为 499.8 krad(Si)。
- 第 5 组的 01#加固器件在 1.0 MeV 和 1.8 MeV 电子能量下共辐照了 3 572 s,总剂量达到 535.8 krad(Si)时,还没有出现翻转,功能始终正常。此后停止辐照。室温退火 168 h 后,移位进行 01#器件的参数测试,参数测试结果正常。
- 从第 5 组性能较差的 03#加固存储器与第 4 组普通存储器的对比可以看出,加固存储器的抗辐射能力提高了 50 倍以上;与第 2 组普通存储器相比,也有近一个量级的提高。而性能好的 01#加固存储器的抗辐射能力与第 4 组普通存储器相比估计高 2 个量级以上,与第 2 组普通存储器相比,也至少有一个多量级的提高。

### 4 结论

辐照试验结果表明,利用特种复合屏蔽材料对空间电离辐射的阻止和吸收作用,在普通封装存储器 28C256 基础上,采用缝焊封接工艺研制的抗辐射封装加固存储器 LS28C256R,不仅满足了封装的密封性和高可靠性要求,而且其抗电子源辐照的能力提高了 1~2 个数量级。该技术的运用对运行于 Van Allen 辐射带的航天器内部的电子器件抗空间辐射非常有效,也为以后 COTS 器件在空间环境的开拓使用提供了技术支撑。

参考文献:

- [1] 陈盘训. 半导体器件和集成电路的辐射效应[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.
- [2] Adams L. Space Radiation Effects in Electronic Components[R]. London: Brunel University, 2003.
- [3] 3D Plus. Walopack[EB/OL]. (2007-10-02)[2009-08-12]. [http://telecom.esa.int/telecom/www/category/index.cfm?fcategoryid=42&completed\\_projs=1](http://telecom.esa.int/telecom/www/category/index.cfm?fcategoryid=42&completed_projs=1).
- [4] 田民波. 电子封装工程[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.
- [5] Adams L, Nickson R. A dosimetric evaluation of the radpak using mono-energetic electrons and protons[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996, 43(3): 1014-1017.

作者简介:

卫 宁(1951-), 男, 陕西华阴人, 研究员, 长期从事航天计算机的工艺管理和防护工艺技术研究。