

一种星用高可靠性 MTM 反熔丝 PROM 存储单元

孙杰杰,徐海铭,胡小琴,于 跃,袁同伟,潘 滨,胡永强

(中国电子科技集团公司 第 58 研究所,江苏 无锡 214072)

摘 要: 提出了一种新型的,可用于卫星及其他航天器的高可靠性 MTM 反熔丝 PROM 存储单元,并围绕该存储单元,研究了其编程方式. 实验表明,在 PROM 电路中采用该存储单元,且按照所述的编程方式,可以在编程过程中对未选中反熔丝实施有效保护,进而提高 PROM 芯片整体的可靠性和使用寿命.

关键词: MTM 反熔丝;PROM;存储单元;编程

中图分类号: TN433

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2016)12—0089—04

A MTM Antifuse PROM Bitcell With a High Reliability for Satellite Use

SUN Jie-jie, XU Hai-ming, HU Xiao-qin, YU Yue, YUAN Tong-wei,

PAN Bin, HU Yong-qiang

(NO. 58 Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Wuxi 214072, China)

Abstract: In this paper, a novel MTM anti-fuse PROM bitcell with a high reliability is proposed, which can be used in stars and other spacecrafts. Based on this bitcell, programming and verification methods are studied. The use in PROM of the bitcell with the programming method described in this paper, can offer an effective protection to unselected anti-fuses in the programming process, therefore the reliability and working life of the PROM are improved.

Key words: MTM antifuse; PROM; bitcell; programming

1 引言

存储器是航天电子系统的重要组成部分,用于存储电子系统中的重要的程序和信息. 随着我国航天事业的发展,人们越来越认识到辐射对航天电子元器件的严重危害^[1],航天电子系统对于存储器的抗辐射性能和可靠性的要求也越来越高,而反熔丝 PROM(Programmable Read Only Memory)在我国武器、卫星及航空航天领域有着大量的需求,因此自主研发已经不可避免,且迫在眉睫.

我国对于反熔丝 PROM 的研制仍处于起步阶段,目前主流反熔丝技术主要有三种:ONO(Oxide-Nitride-Oxide)反熔丝、MTM(Metal-to-Metal)反熔丝和栅氧反熔丝. 这三种反熔丝各有优缺点^[2-4],任何一

种反熔丝 PROM 的研制成功都会打破国外技术垄断,但研制均需要大量的理论和实验研究,而且研制过程需要工艺线进行大量配合,这给研制单位带来了很大的困难. 而另一难点便是反熔丝存储单元电路的设计. 由于反熔丝 PROM 在国外也属于军用或航空航天用高端电子元器件,很多相关技术仍处于保密和封锁状态,因此基于 ONO 和 MTM 反熔丝的存储单元电路在国外几乎没有报道,基于栅氧反熔丝的存储单元电路虽然有少量报道^[5],但是由于三种反熔丝在击穿电压、击穿电流、击穿时间等击穿机制方面存在很大不同,因此基于这三种反熔丝的存储单元电路均是“量身定制”,互相之间难以借鉴;国内对于基于 MTM 反熔丝的存储单元电路已开展了研究^[6],但却存在可靠性低或集成度不高等问题. 因此本文提出了

一种可应用于复杂空间环境的具有较高可靠性,同时又有较高集成度的 MTM 反熔丝存储单元电路,并围绕这种电路设计了编程方式,最后通过一系列实验证明了这种结构的高可靠性.

2 新型 MTM 反熔丝存储单元结构

图 1 为新型反熔丝存储单元结构图,该存储单元由两个 N 型 MOS 管和一个反熔丝组成. N1 管为编程保护管, N2 管为编程选择管. BL 为位线, EN 为编程保护管 N1 的开关使能信号, WL 为字线. 表 1 所示为该结构工作模式, 编程时首先 VDD 从 5 V 提高到 6.5 V, 然后阵列中所有 EN 信号置高电平, WL 为低电平, N1 管打开, N2 管关闭, BL 电压 11 V, 所有反熔丝下端被充电, 由于 N1 管栅极电压为 VDD, 同时考虑到衬偏效应的影响, 反熔丝下端被充电至大约 5.5 V, 此时所有反熔丝上下极板之间的电压为 $11-5.5=5.5$ V. 充电完成后, 所有 N1 管关闭, 被选中存储单元的 N2 管打开, 反熔丝被击穿; 未被选中的单元 N2 管保持关闭, 此时反熔丝上下极板之间的电压为 $11-5.5=5.5$ V. 整个编程过程中未选中反熔丝两端电压最大 5.5 V, 距离反熔丝击穿电压 10 V 还有 4.5 V 的裕量.

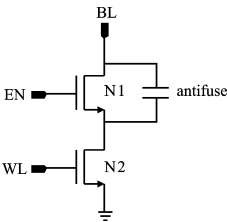


图 1 新型反熔丝存储单元

表 1 MTM 反熔丝存储单元基本工作模式

	编程		读出	
	选中	未选中	选中	未选中
BL	11 V	0 V	0.7/4 V	0 V
EN	VDD→0 V	VDD→0 V	0 V	0 V
WL	0 V→VDD	0 V→0 V	VDD	0 V

注:表中“0.7/4 V”是指典型情况下“反熔丝击穿后 BL 端电压/反熔丝未被击穿时 BL 端电压”.

因此,该新型存储单元结构通过对反熔丝下极板进行预充电的方式来避免未选中反熔丝下极板的电位浮空,从而对未选中反熔丝实施了有效保护,从根本上消除了编程高压对反熔丝的损伤,大大提高了反熔丝的可靠性,提升了 PROM 芯片的使用寿命. 由于该管只是用作预充电,流过的电荷量很少,因此相比于 N2 管只需要很小的尺寸,该管的增加引起的芯片

总面积增加不到 10%,保持了较高的集成度.

该反熔丝存储单元对器件的要求:由于 BL 端需要施加编程高压,因此 N1 和 N2 均需为高压管. 其中对 N1 管驱动能力要求很小,因此该管可以做的很小,其关态和开态耐压需要大于编程时 BL 端电压;反熔丝击穿后 N2 管需承受较高的开态耐压,当对同一根 BL 线上其他反熔丝编程编程时, N2 管由于其上的反熔丝已经被编通,因此还需承受 BL 高压,因此也需要有较高的关态耐压. 至于 N2 管的驱动能力需要根据反熔丝的编程电流和工艺情况来设置.

3 实验

采用 0.6 μm CMOS 工艺(根据反熔丝特性对 0.6 μm 标准的 CMOS 工艺进行了微调)制作了容量为 32 k $\times$ 8 bit 的 MTM 反熔丝 PROM. 该 PROM 采用了文中讲述的存储单元结构,下面通过实验来证明这种结构的高可靠性. 实验流程按照“编程→三温测试→稳态寿命实验”的步骤依次进行.

3.1 编程实验

编程实验是指,在室温下对芯片的所有地址进行编程,芯片编程数据采用“55h/AAh 交替”的方式,即每颗芯片编程反熔丝的数目为所有反熔丝数目的一半. 编程时若某个地址没有编好,则编程器会对该地址再次施加编程脉冲,直到编通为止,但最多施加 20 次. 芯片编程完成后会在常温下连续读取 3 次,若 3 次读取结果均与编程数据相符,则编程成功,否则编程失败,编程失败的芯片表明有质量问题,会被淘汰掉.

表 2 记录了 10 颗样品 PROM 电路的详细编程情况,每颗 PROM 样品电路容量均为 32 k $\times$ 8 bit,即 32768 个字节. 该表详细记录了每颗芯片有多少个地址只需要 1 次编程脉冲就能编通,有多少个地址需要多次编程脉冲才能编通.

表 2 编程结果(n 代表施加的编程脉冲次数)

次数 编号						合计 地址数	编程 结果
	1	2	3	$4\leq n\leq 19$	20		
A1104	32 766	0	0	0	2	32 768	失败
A1106	32 752	0	0	0	16	32 768	失败
A1204	32 726	38	4	0	0	32 768	成功
B0702	32 768	0	0	0	0	32 768	成功
C0605	32 768	0	0	0	0	32 768	成功
C1002	32 768	0	0	0	0	32 768	成功
C1004	32 707	23	14	24	0	32 768	成功
D0301	32 768	0	0	0	0	32 768	成功
D0302	32 757	11	0	0	0	32 768	成功
D0902	32 768	0	0	0	0	32 768	成功

从表 2 可以看出,芯片 A1104 和 A1106 分别有 2 个和 16 个地址编程了 20 次仍然没有编通,这种编不通是因为改地址所译码到的反熔丝本身存在质量问题,无法被击穿,因此这两颗芯片只能被淘汰;而其他 8 颗芯片虽然有的地址需要施加多次编程脉冲,但全部通过了编程测试.这 8 颗通过的芯片并没有出现未选中反熔丝被损伤,从而读出‘1’的情况,初步证明了新型 MTM 反熔丝存储单元对未选中反熔丝的有效保护和高可靠性.但这还不够,因为受损轻微的未选中反熔丝并不能通过常温下 3 次的读取操作检验出来,因此仍需进一步的实验.

3.2 三温测试

三温测试是指,对表 2 中编程成功的 8 颗电路在三种温度(−55℃、25℃、125℃)下进行各种电学测试,包括芯片所有的 DC 参数、AC 参数及读出功能.测试仪器采用通用的数字电路测试机:J750 测试机.测试结果的最低目标是芯片的性能达到国外著名 PROM 产品 UT28F256QL^[7-8]的标准,因此所有电学测试结果会均与他们的产品手册进行比较,若达到了他们手册规定的规范值,则表 3 中测试结果一列会标注“合格”.

表 3 三温测试结果		
芯片编号	测试结果	失效原因
A1204	功能失效、AC 参数不能测出	常温下功能失效,1 个 bit 数据出错,‘1’读出为‘0’
B0702	合格	/
C0605	合格	/
C1002	功能失效、AC 参数不能测出	常温下功能失效,1 个 bit 数据出错,‘1’读出为‘0’
C1004	合格	/
D0301	合格	/
D0302	合格	/
D0902	合格	/

注:1. 在 J750 测试机上若功能发生错误,则会导致 AC 参数不能测出. 2. 芯片 A1204 和 C1002 在常温下功能失效,电路已经被淘汰,因此没有经过高低温测试.

通过表 3 可以看出,在三温测试中有 2 颗电路失效,失效原因皆为电路中有 1 个 bit 数据出现错误,应该读出‘1’的反熔丝读出了‘0’.这属于反熔丝质量原因,即对于个别已经编通的反熔丝,其电阻会有增大现象.

表 4 统计了 8 个编程后反熔丝电阻随时间发生变化的情况.4 次测试历时 11 个月,第 2 和第 3 次测试是在这 11 个月中随机挑选的 2 个时间点,第 4

次测试是在第 11 个月的月末.在这 11 个月期间除对反熔丝进行电阻测量外未进行任何其他操作,储存均在常温下.从表 4 中可以看出,4 号和 7 号反熔丝电阻变化波动很大,这种波动会引起电路对这种反熔丝的读取结果的不同.这种反熔丝说明其本身的质量不够过关,虽然这种不稳定反熔丝所占比例极小,但对于容量为 256k 的 PROM 来讲其风险仍然存在.

表 4 编程后反熔丝电阻				Ω
反熔丝编号	第 1 次测试	第 2 次测试	第 3 次测试	第 4 次测试
1	64.97	66.17	65.42	65.88
2	81.57	83.12	82.23	84.2
3	71.09	71	70.61	71.79
4	961.7	6720	315	613.89
5	90.13	95.63	98.3	100.85
6	127.18	132.87	139.14	141.23
7	10000	1190	594	721.99
8	66.75	65.86	68.37	66.11

注:1. 研究中测试过大量反熔丝,这里只列出了很少的一部分.

三温实验测试结果表明:虽然有 2 颗芯片在三种温度下发生功能失效,但其原因是反熔丝本身的质量引起.无论是 2 颗失效电路还是 6 颗合格电路,均没有出现未选中反熔丝被损伤,从而在高低温的恶劣环境下读出 1 的情况,再次证明了新型 MTM 反熔丝存储单元对未选中反熔丝的有效保护和高可靠性.但这还不够,因为需要模拟用户的反复读取操作对未选中反熔丝施加上亿次读取电压后是否仍然能够保持其高阻特性.因此仍需进一步的实验.

3.3 稳态寿命测试

将三温测试后 6 颗合格电路进行稳态寿命实验,实验方法严格按照美军标 MIL STD 883 方法 1005 的规定^[9],实验温度:125℃,时间:1 000 h.实验完成后对 6 颗芯片再次进行三温测试.

实验结果:6 颗芯片 DC、AC、功能测试全部通过.由于实验数据太多,表 5 仅列出了最重要的 3 项参数:DC 参数中的静态电流和工作电流、AC 参数中 PROM 电路读出周期 t_{AVQL} .其中静态电流和工作电流均是在 $V_{DD}=5.5\text{ V}$,三种温度下测出的最恶劣值; t_{AVQL} 是在 $V_{DD}=4.5\text{ V}$,温度 125℃下的最恶劣值.规范值与 Aeroflex 公司同类产品 UT28F256QL 完全一致.

表 5 稳态寿命后三温测试结果(部分)

芯片编号	静态电流/ μ A	工作电流/mA	tAVQV/ns
B0702	714	76	31.2
C0605	716	75.9	32.2
C1004	545	76.6	26.9
D0301	721	76.4	27.1
D0302	702	76	27.6
D0902	616	74	31.6
规范值	1 500	80	45

这 6 颗芯片顺利通过了 1 000 小时的高温寿命实验,说明了总数为 157 万的反熔丝在严苛的环境下没有发生一例失效.按照每个地址读取周期 45 ns 来计算,反熔丝 PROM 可以在严苛的环境下被全片读取 24.4 亿次而不发生失效,即每个编程后反熔丝或者未编程反熔丝均可经受 24.4 亿次读取电压的冲击而不发生失效.因此,该实验最终证明了新型反熔丝存储单元电路在编程过程中对未选中反熔丝的保护是非常有效的,证明了这种结构具有非常高的可靠性.

4 结束语

本文提出了一种新型星用高可靠性 MTM 反熔丝存储单元,并以此为基础研究了这种存储单元的编程方式.一系列的实验表明:在 256 K PROM 电路中采用本文所述新型存储单元,并按照本文所述编程方式对反熔丝进行编程,可以对未选中反熔丝实施有效保护,降低甚至彻底消除编程过程中对反熔丝造成的潜在损伤,提高了反熔丝的使用寿命,进而增加了 PROM 芯片整体的可靠性和使用寿命.

参考文献:

[1] 王长河. 航天电子系统中的电子元器件辐射效应分析及抗辐射对策[J]. 电子元器件应用, 2001,7(7):4-6.

(上接第 88 页)

[4] 谭林. 具有快速负载瞬态响应 LDO 设计[D]. 成都:电子科技大学,2013:27-53.

[5] 王帅. 无片外电容 CMOS 低压差稳压器的设计[D]. 长春:吉林大学, 2006:14-16

[6] 王常,吴震,邓朝勇. 一种无片外电容 LDO 的瞬态增强电路设计[J]. 电子设计工程,2013;21(4):14—18.

[7] Zared K, Qjidaa H, Zouak M. Full on-chip CMOS low dropout voltage regulator using MOS capacitor compensation [J]. Multimedia Computing and Systems (ICMCS), 2012,22(1):103-112.

[8] 杨洁,曾云. 一种快速瞬态响应的无片外电容 LDO 的设计[J]. 微电子学与计算机,2012,29(8):123—126.

[2] Zhang G, King Y, Elfoukhy S, et al. On-state reliability of amorphous silicon antifuses [C]// Electron Devices Meeting 1988. IEDM '88. Technical Digest, International. San Franciso,CA,1996;551-554.

[3] Nicollian P E, Hunter W R. Model for the leakage instability in unprogrammed amorphous silicon antifuse devices [C]//Reliability Physics Symposium, 1995. 33rd Annual Proceeding, IEEE International. IEEE, 1995: 42-47.

[4] Shih C C, Lambertson R, Hawley F, et al. Characterization and modeling of a highly reliable metal-to-metal antifuse for high-performance and high-density field-programmable gate arrays [C]// Reliability Physics Symposium, 1997. 35th Annual Proceedings. , IEEE International,Denver; IEEE, 1997;25-33.

[5] Kim J, Lee K. Three-transistor one-time programmable (OTP) ROM cell array using standard CMOS gate oxide antifuse [J]. Electron Device Letters, IEEE, 2003, 24(9): 589-591.

[6] 周霁, 孙武山. 256K PROM 电路技术研究[C]// 第十届全国抗辐射电子学与电磁脉冲学术年会论文集. 北京,2009.

[7] Data Sheet. UT28F256QL Radiation-Hardened 32K×8 PROM, Jnue 2005 [EB/OL]. [2016-01-09]. www.areoflex.com/radhard.

[8] 焦俊陶. 反熔丝型存储器设计技术研究[D]. 西安:电子科技大学, 2011.

[9] MIL-STD-883J. Test method standard microcircuits. USA;DEPARTMENT OF DEFENSE,2015.

作者简介:

孙杰杰 男,(1989-),硕士. 研究方向为抗辐照集成电路设计. E-mail:sunjiejie1989@126.com.

[9] Suresh A,Sreehari R P,Debasish D. Fully on chip area efficient LDO voltage regulator [C]// IEEE Conference Publications. India;IEEE,2014;1-5.

[10] 胡玉松,冯全源. 一种高增益快速响应且无片外电容型 LDO 设计[J]. 电子器件,2015,38(2) : 259 -263.

作者简介:

陈忠学 男,(1989-),硕士研究生. 研究方向为模拟集成电路设计. E-mail:czxue1015@qq.com.

唐 杰 男,(1991-),硕士研究生. 研究方向为模拟集成电路设计.

章国豪 男,(1964-),教授. 研究方向为射频、微波及毫米波单片电路及组件.