

MTM 非晶硅反熔丝导通电阻

马金龙, 吴素贞

(中国电子科技集团公司 第五十八研究所, 江苏 无锡 214035)

摘 要: 分析了现场可编程门阵列(FPGA)和可编程存储器(PROM)中广泛使用的 MTM(metal-to-metal)反熔丝结构, 测量了决定 FPGA 和 PROM 传输延迟的反熔丝编程后导通电阻, 给出了编程电流对导通电阻的决定规律. 结合 MTM 非晶硅反熔丝的特征电压模型, 确定了 TiN/ α -Si/TiN 结构反熔丝的特征电压值. 对大量样品的实际测量结果, 并且对实验数据进行拟合, 实验结果表明, 实验特征电压值接近模型理论值, 可通过控制编程电流对编程后电阻的进行调控.

关键词: 电流编程; 导通电阻; MTM; 非晶硅; 反熔丝

中图分类号: TN406

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2016)09-0098-03

On-state Resistance of MTM Amorphous Silicon Antifuse

MA Jin-long, WU Su-zhen

(The 58th Research Institute, China Electronics Technology Group Corp., Wuxi 214035, China)

Abstract: The structure of MTM (metal-to-metal) amorphous silicon antifuse which has been extensively used in FPGA and PROM product is introduced. On-state resistances which determine the delay of FPGA and PROM have been measured, and the fact that the on-state resistance is inversely proportional to the programming current has been present. The electro thermal model used to predict programmed resistance of TiN/ α -Si/TiN MTM antifuse was derived, and the characteristic voltage of MTM antifuse was measured. The experimental results show that the experimental fitting value is in accordance with the theoretical value, and their on-state resistance can be controlled by choosing a programming current level.

Key words: current programming; on-state resistance; MTM; amorphous silicon; antifuse

1 引 言

反熔丝是一种非常重要的可编程互连单元. MTM(metal-to-metal)反熔丝已被广泛地应用于现场可编程门阵列(FPGA)和可编程存储器(PROM)中^[1-2]. 在具体集成电路中, 反熔丝单元位于顶层金属 N 层和 $N-1$ 层金属之间, 反熔丝在编程之前是处于关断状态的, 通过编程电流对反熔丝进行编程, 编程后反熔丝由关断状态转变为导通状态, 形成低电阻连接. 在电路应用中, 因为反熔丝编程后的导通电阻决定了 FPGA 的线路延迟和 PROM 的访问时间^[1-4], 反熔丝的编程后导通电阻是一个重要的参数, 分析反熔丝编程后导通电阻的影响因素以及预

测编程后导通电阻值非常重要. 国内 MTM 非晶硅反熔丝技术的研究还处于起步阶段, 关于 MTM 非晶硅反熔丝编程后的导通电阻大多数由经验得到.

为了提高反熔丝编程后的可靠性, 尤其是对编程后电阻的预测和调控, 反熔丝的编程方式和建模起到了关键性的作用. 对现场可编程门阵列(FPGA)和可编程存储器(PROM)中广泛使用的 MTM (metal-to-metal)反熔丝结构进行了详细的分析, 通过实验测量了反熔丝结构编程后导通电阻, 确定了编程电流对导通电阻的决定规律. 结合 MTM 非晶硅反熔丝的特征电压模型和对大量样品的实际测量结果, 确定了 TiN/ α -Si/TiN 结构反熔丝的特征电压值. 通过实验拟合得到的特征电压值接近模型理

论值,可通过编程电流达到对编程后电阻的调控,大大地提高了反熔丝编程后的可靠性.

2 MTM 非晶硅反熔丝结构

TiN 作为一种常见的阻挡层(防止上下层材料间原子扩散)和粘合层(增加膜层间粘附性)材料在集成电路中被广泛使用,在 0.18 μm 及以下的数字集成电路制造中是不可或缺的. TiN 是电和热的良导体,许多性质与金属相似,可用来制作金属陶瓷,因此可采用 TiN/ α -Si/TiN 结构反熔丝实现 MTM 反熔丝特性. 图 1 所示为一种典型的 MTM 反熔丝纵向结构(通孔下 TiN/ α -Si/TiN MTM 反熔丝). 反熔丝介质层为非晶硅(α -Si)结构,Oxide 侧墙为 F 掺杂的 SiO₂ 非晶结构,阻挡层成分为 TiN 多晶结构. 反熔丝单元直径大约 0.7 μm ,编程前关断状态时反熔丝单元电容大约 1 fF.

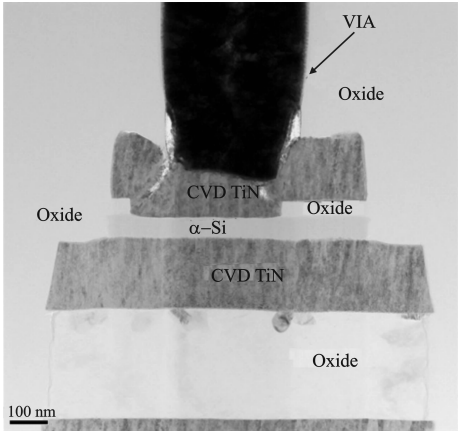


图 1 TiN/ α -Si/TiN MTM 反熔丝纵向截面图

图 2 给出了反熔丝在编程前后的 I-V 特性. 在反熔丝上下电极加载编程电压,编程电流流过反熔丝介质使反熔丝结构局部的小区域内具有相当高的电流密度,瞬间产生巨大的热功耗,将薄的绝缘介质层局部熔融形成永久性电连接,反熔丝由断开状态转变为导通状态,形成低电阻连接.

表 1 给出了反熔丝的电特性,反熔丝在编程前呈现小电容大电阻特性,编程前电容 1 fF,编程前关断电阻大于 200 M Ω ,编程后导通电阻小于 100 Ω .

表 1 反熔丝的关键电特性

单元直径	大约 0.7 μm
编程前电容	大约 1 fF
编程前关断电阻	大于 200 M Ω
编程电压	7 V
编程后导通电阻	$\leq 100 \Omega$

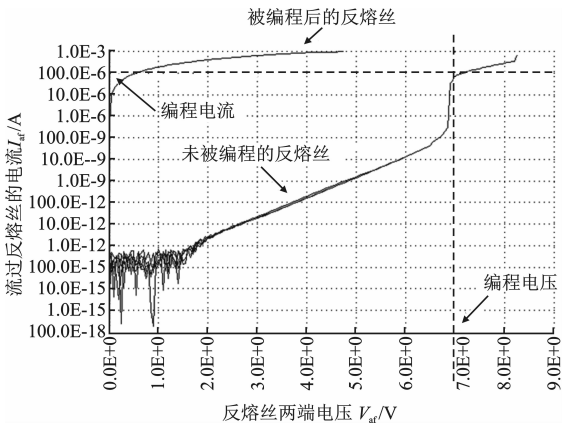


图 2 反熔丝编程前后的 I-V 特性

3 TiN/ α -Si/TiN MTM 反熔丝特征电压模型

3.1 TiN/ α -Si/TiN MTM 反熔丝编程后导通电阻的影响因素

在电路实际应用中,要求反熔丝编程后电阻具有稳定、可靠和线性的特点^[6]. 在不同的电压拉偏下测量了编程电流与反熔丝编程后导通电阻关系. 如图 3 所示,对于 TiN/ α -Si/TiN 非晶硅反熔丝来说,编程后导通电阻受编程电流影响显著,而仅微弱地受到编程电压的影响. 观察到的实验现象同其他文献^[3-5]中的介绍相同,说明了对于 TiN/ α -Si/TiN 非晶硅反熔丝来说,电流的作用在于 MTM 反熔丝单元编程过程中,足够的编程电流流过反熔丝介质层使反熔丝结构局部的小区域内具有相当高的电流密度,瞬间产生巨大的热功耗,使反熔丝介质层产生局部熔融,在熔融核的核心形成导电细丝形成永久性电连接实现编通.

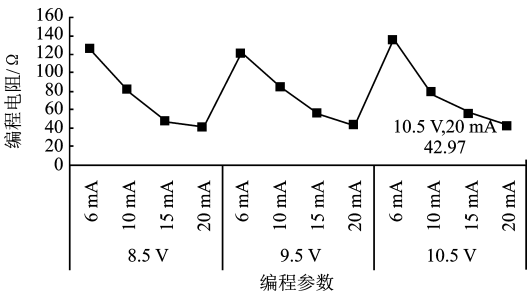


图 3 编程电流与反熔丝编程后导通电阻关系

3.2 TiN/ α -Si/TiN MTM 反熔丝的特征电压模型

根据 G. Zhang 等人的实验和分析,MTM 反熔丝编程后的导通电阻 R_{on} 与电极材料无关而与编程电流、反熔丝介质材料有关^[3-5]. 反熔丝编程后导通电阻与编程电流 I 关系如式(1):

$$R_{on} = V_f / I_p \tag{1}$$

其中将比例系数 V_f 定义为 MTM 反熔丝的特征电压, 如式(2):

$$V_f = \sqrt{8T_{c0} \frac{\kappa}{\sigma}} \tag{2}$$

式中, σ 为电极材料电导率, κ 为电极材料热导率, T_{c0} 为熔融核的核心边界温度. MTM 反熔丝单元编程过程中, 理论认为反熔丝介质层产生局部熔融, 在熔融核的核心形成导电细丝实现编通. 在上述模型中, 核心的边界温度 T_{c0} 可认为是介质层的材料或是电极的材料的一些临界温度, 如介质层的熔点或介质与电极材料的反应温度. 为了简化模型, 忽略电极材料电导率 σ 和电极材料热导率 κ 的温度依赖关系, 而将其设定为与温度无关的常数.

根据 Wiedeman-Franz 定律^[7], 对于不同导体, 热导率与电导率的比值是与具体导电材料无关的常数. 热导率与电导率的关系可表示为式(3):

$$\frac{\kappa}{\sigma} = LT \tag{3}$$

式中, T 为熔融核的核心外区域平均温度, L 为洛伦兹常数, 其数值为 $2.45 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \Omega / ^\circ\text{C}$. TiN 的熔点为 2950°C , 非晶硅介质层熔点 1687°C , 熔融核的核心的边界温度 T_{c0} 约为 2500°C , 熔融核的核心外区域平均温度 T 等效为 $T_{c0}/2$, 则 TiN/ α -Si/TiN MTM 非晶硅反熔丝特征电压为

$$V_f \approx \sqrt{8T_{c0} \times L \cdot \frac{T_{c0}}{2}} = 2T_{c0} \sqrt{L} = 0.78 \text{ V} \tag{4}$$

3.3 特征电压的实验标定

为了有效地通过编程电流来达到对于编程后电阻的调控, 精确地确定 TiN/ α -Si/TiN 结构中反熔丝特征电压对于提高编程可靠性至关重要. 通过系统的实验, 测量了 600 个样品在不同编程电流后的电阻值. 结果如图 4 所示, 其中每个编程电流 I_p 下测得的编程后电阻 R_{on} 数值为 100 个样品的平均值.

通过使用式(1)拟合实验结果, 特征电压值为 0.80 V, 接近式(4)中推导出的理论值.

4 结束语

本文结合 TiN/ α -Si/TiN MTM 反熔丝纵向结构以及反熔丝的特性分析了影响反熔丝编程后导通电阻的影响因素. 编程电流主要决定了编程后电阻值. 两者的相互关系符合 G. Zhang 等人提出的热电模型. 通过理论推导给出了 TiN/ α -Si/TiN 结构

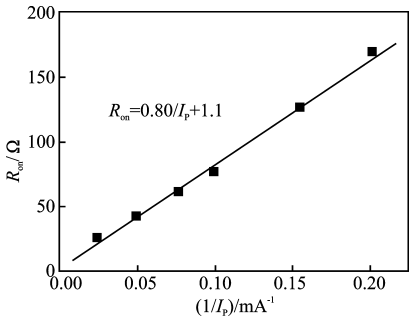


图 4 MTM 反熔丝编程电流与导通电阻关系

反熔丝编程后导通电阻的模型, 并且对大量 MTM 反熔丝单元样品 (TiN/ α -Si/TiN) 进行编程测试, 确定了反熔丝特征电压值为 0.80 V. 该特征值的确定保证了能够准确预测反熔丝编程后电阻值. 同时, 实验得到的特征电压非常接近理论值, 这进一步证明了 G. Zhang 等人提出的 MTM 非晶硅反熔丝的电特性与反熔丝电极材料无关的观点, 为后期研究反熔丝导通状态下的失效机理以及进一步分析反熔丝可靠性研究奠定了基础. 研究反熔丝可靠性还有很多工作要做, 还需要进一步验证 G. Zhang 等人提出的 MTM 反熔丝编程后的导通电阻与电极材料无关的观点; 另一方面, 为了确保反熔丝寿命达到 20 年, 需要通过大量实验分析反熔丝导通状态下的失效机理以及反熔丝导通状态可靠性与工作电流的关系.

参考文献:

[1] Cohen SS, Raffel JJ, Wyatt PW. A novel double-metal structure for voltage-programmable links [J]. IEEE Electron Device Letters, 1992, 13 (9): 488-490.

[2] Liu D, Chen K, Tigelaar H, et al. Scaled dielectric antifuse structure for field programmable gate array applications [J]. IEEE Electron Device Letters, 1991, 12(4): 151-153.

[3] Zhang G, Hu C, Yu PY, et al. Characteristic voltage of programmed metal-to-metal antifuses [J]. IEEE Electron Device Letters, 1994, 15(5): 166-168

[4] Zhang G, Hu C, Yu PY, et al. An electro-thermal model for metal-oxide-metal antifuses [J]. Electron Devices IEEE Transactions on, 1995, 42 (8): 1548-1558.

[5] Zhang G, King Y, Elfouky S, et al. On-state reliability of amorphous silicon antifuses [C]// IEDM: International Electron Devices Meeting. Washington, DC: IEEE, 1995: 551-554.

表 2 不同干扰类型及干信比下跟踪情况

数据类型	干信比/ dB	载噪比/ dB-Hz	信噪比损 失/dB	多普勒标 准差/Hz	多普勒标 准差增量 /Hz
原始数据	—	48.03	—	1.86	—
无干扰	—	47.84	0.19	1.87	0.01
单音 干扰	50	47.59	0.44	1.87	0.01
	60	47.59	0.44	1.87	0.01
	70	47.58	0.45	1.87	0.01
	80	47.56	0.47	1.87	0.01
	90	47.42	0.61	1.88	0.02
多音 干扰	50	47.26	0.77	1.88	0.02
	60	47.17	0.86	1.89	0.03
	70	46.41	1.62	1.92	0.06
	80	45.77	2.26	1.94	0.08
	90	44.27	3.76	2.03	0.17
扫频 干扰	50	47.55	0.48	1.88	0.02
	60	47.17	0.86	1.89	0.03
	70	46.28	1.75	1.92	0.06
	80	45.27	2.76	1.97	0.11
	90	43.34	4.69	2.09	0.23

大,信噪比损失和多普勒标准差逐渐增大,导航接收机跟踪性能下降.当干信比一定时,从信噪比损失及多普勒标准差增量来看,与之前所分析的捕获结果一致,该算法对单音干扰抑制能力最好,当干信比为 90 dB 时信噪比损失仍然较小,多音干扰和扫频干扰次之.当干信比为 60 dB 时,三种干扰情况下的信噪比损失均在 1 dB 以内,满足接收机一般需求.

5 结束语

本文研究并分析了基于重叠加窗的频域窄带抗

干扰算法对卫星导航接收机中捕获及跟踪性能的影响,为窄带抗干扰算法在实际接收机中的应用提供了很好的参考价值.仿真结果表明,当不存在干扰时,通过该算法处理后,导航接收机的捕获及跟踪模块均能正常工作,其信噪比损失为 0.2 dB 左右,几乎无影响.当存在干扰时,该算法能够在一定范围内很好的抑制不同的窄带干扰,同时会造成一定的信噪比损失.随着干信比的不断增加,接收机捕获和跟踪的性能也会随之降低,直至无法正常工作.

参考文献:

[1] 张伟,周力. 一种改进的 DSSS 系统自适应干扰抑制技术[J]. 微电子学与计算机, 2009,26(12):75-77.

[2] Milstein L B,Itlis R A. Signal processing for interference rejection in spread spectrum communications[J]. IEEE Assp Magazine, 1986, 3(2):18-31.

[3] 孟博,龚文飞,孙昕. 基于反加窗和重叠选择的窄带干扰抑制方法[J]. 导航定位学报, 2014, 2(2):93-96.

[4] 穆立波,霍志勇. 频域抗干扰中的门限检测和处理[J]. 计算机与网络, 2010, 36(10):46-48.

[5] 欧松林,李金海,袁建国,等. GNSS 系统中检测与判决的研究[J], 计算机工程与设计, 2014, 35(3): 741-745.

作者简介:

肖进杰 男,(1993-),硕士研究生.研究方向为卫星导航抗干扰及基带算法. E-mail:xiaojinjie@ime.ac.cn.

李金海 男,(1978-),博士,副研究员,研究生导师.研究方向为高端卫星导航定位与应用.

欧松林 男,(1987-),硕士,助理研究员.研究方向为 GNSS 卫星导航定位.

作者简介:

马金龙 男,(1982 -),工程师.研究方向为数字集成电路设计和测试. E-mail:njumlma@126.com

吴素贞 女,(1987 -),博士研究生,工程师.研究方向为半导体集成电路工艺开发.

(上接第 100 页)

[6] Wong R, Gordon K. Reliability mechanism of the un-programmed amorphous silicon antifuse [C]// Proceedings of the 32nd Annual IEEE International Reliability Physics Symposium, San Jose, CA, USA: IEEE, 1994: 378-382.

[7] Kittel Z. Introduction to solid state physics [M]. New York: Wiley, 1986.