

用于相变存储器的 W 亚微米管加热电极性能*

冯高明^{1,2,†} 刘 波¹ 吴良才¹ 宋志棠¹ 封松林¹ 陈宝明³

(1 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 纳米技术实验室, 上海 200050)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(3 美国硅存储技术公司, 加州 94086)

摘要: 为了降低 C-RAM 器件的操作电流, 利用 0.18 μm 标准 CMOS 工艺线制备出外径为 260nm 的 W 亚微米管加热电极, 并对其进行了电学性能表征. 使用 W 亚微米管加热电极制备出 C-RAM 器件, 并通过疲劳特性测试分析了器件失效的原因. 结果表明, W 亚微米管具有良好的电学稳定性和疲劳特性, 为降低 C-RAM 器件的操作电流提供了一种非常有效的途径.

关键词: 相变存储器; W 亚微米管加热电极; 电学性能; 疲劳特性

EEACC: 2550N

中图分类号: TN305

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)07-1134-05

1 引言

相变型半导体存储器是指硫系化合物随机存储器 (chalcogenide-random access memory, C-RAM), 又被称为奥弗辛斯基电效应统一存储器, 是基于 Ovshinsky 在 20 世纪 60 年代末提出的奥弗辛斯基电子效应的存储器^[1,2]. C-RAM 器件的工作原理是利用焦耳热使得硫系化合物发生相变, 产生电阻值的变化, 从而实现信息的存储. 施加一个弱而长的脉冲信号使硫系化合物从非晶态转化为晶态, 实现信息的写操作; 反之, 施加一个强而短的脉冲信号使硫系化合物返回到非晶态, 实现信息的擦操作. C-RAM 读写操作的速度很快, 与 DRAM 相当; 可操作次数高; 结构简单, 易于实现高密度存储; 与 CMOS 工艺兼容性好. 因此 C-RAM 被誉为最有潜力的下一代非挥发性存储器^[3~6].

目前, 半导体行业的一些大公司都致力于 C-RAM 器件的研究开发, 如 Intel 于 2001 年推出 4Mb 的 C-RAM 芯片^[7]; Samsung 于 2005 年成功制备出 256Mb 的 C-RAM 芯片^[8]等. 但是 C-RAM 的商品化还需要解决许多关键性的问题, 其中减小操作电流是一个倍受关注的研究课题. 降低 C-RAM 操作电流同时降低器件的功耗, 以达到与现有 CMOS 管功率匹配的目的, 其主要方法有: 减小电极与相变材料的接触面积; 通过掺杂来提高相变材

料的晶态电阻; 在电极与相变材料之间添加加热电阻层; 采用将相变材料限制的结构; 进一步探索新结构等^[9~15].

采用 W 亚微米管作为 C-RAM 器件的加热电极可以有效地降低操作电流^[16], 本文将针对 W 亚微米管加热电极的形貌和电学特性进行系统的研究.

2 实验与结果讨论

W 亚微米管的制备流程如下: 首先在硅衬底上先后淀积下电极 Al 和绝热材料 SiO₂; 然后利用 0.18 μm 标准工艺线的光刻技术在 SiO₂ 层干法刻蚀出直径为 260nm 的圆孔; 再用等离子增强化学气相沉积的方法在 SiO₂ 孔内填充 W 电极材料, 填充过程中控制填充的程度, 使孔内不被完全填满, 可得到管状 W 电极; 最后用化学机械抛光技术得到平整的表面. 为了便于测试管状 W 电极的电学性能, 又在 W 管上面制备引出上电极 W, 同时将下电极引出, 得到的样品即可用于电学性能测试实验. 样品的剖面结构图如图 1 所示, 剖面结构图是采用聚焦离子束 (FIB) 制备的, 设备型号是美国 FEI 公司的 DB235 型. 由图可知, 整个测试样品包括下电极 Al、绝热材料 SiO₂、管状加热电极 W 和上电极 W.

采用 0.18 μm 标准工艺线制备的加热电极为中空的结构, 其外径为 260nm 左右, 经 HF 漂洗,

* 国家重点基础研究发展规划 (批准号: 2006CB302700), 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2006AA03Z360), 中国科学院 (批准号: Y2005027) 和上海市科委 (批准号: 05JC14076, 0552nm043, AM0517, 06QA14060, 06XD14025, 0652nm003, 06DZ22017) 资助项目

† 通信作者. Email: gaomingfeng@mail.sim.ac.cn

2006-12-19 收到, 2007-02-08 定稿

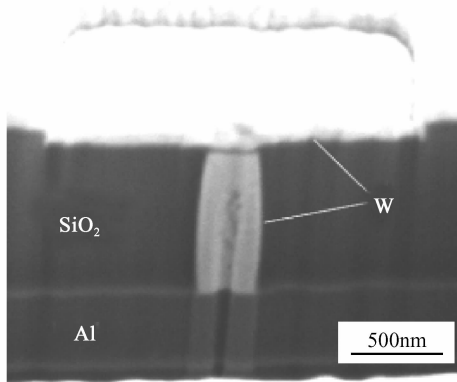


图 1 采用聚焦离子束制备的 W 亚微米管剖面结构

Fig. 1 Cross-section of W sub-micron tube fabricated by focused ion beam method

去除周围的 SiO_2 绝热材料后,加热电极的三维立体形貌采用扫描电子显微镜(Hitachi S-4700)表征,如图 2 所示.

采用自主搭建的 C-RAM 专用电学测试系统^[17]测试 W 亚微米管的电流-电压 (I - V) 特征曲线和脉冲电信号对其电阻的影响,所用测试系统包括探针台(RHM-06)、数字源表(Keithley 2400)、脉冲信号发生器(Agilent-81104A)和加热台等部分.图 3(a)给出了单个 W 亚微米管的典型 I - V 曲线,表明了引出电极与 W 亚微米管电极之间是欧姆接触,呈现出良好的金属特性,其电阻为 123Ω .为了更好地表征 W 亚微米管电极的电阻,本文测试了 64 个 (8×8 阵列) W 亚微米管电极的电阻,其电阻值分布情况如图 3(b)所示.从图中可见,W 亚微米管电极的电阻有 25% 在 $50 \sim 100\Omega$ 之间,70.3% 在 $100 \sim 150\Omega$ 之间,只有 4.6% 的电阻大于 150Ω .W 亚微米管电极的电阻基本上都在 $50 \sim 150\Omega$ 之间,电阻分布比较窄.

C-RAM 的读写擦操作主要是通过加热电极把脉冲电信号施加在存储单元上,为此需要研究脉冲电信号对加热电极性能的影响.首先,在固定电流强

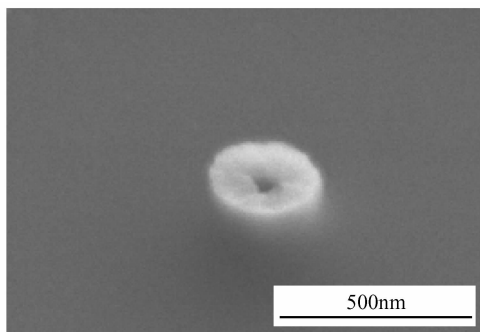


图 2 W 亚微米管的扫描电镜形貌图

Fig. 2 SEM images of W sub-micron tube

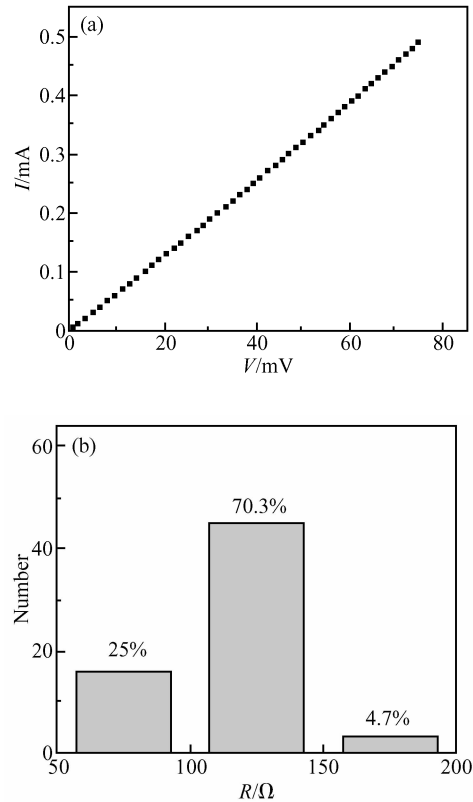


图 3 (a) W 亚微米管的典型 I - V 曲线;(b) W 亚微米管的电阻分布统计

Fig. 3 (a) Schematic of the current-voltage relationship for W sub-micron tube; (b) Resistance distribution of W sub-micron tube

度分别为 $0.5, 1, 2$ 和 3mA 的情况下,W 亚微米管的电阻随电流宽度的变化情况如图 4(a)所示.从图中可见,当电流强度为 0.5mA 时,W 亚微米管的电阻曲线基本保持水平,稳定在 123Ω ;随着电流强度增加到 $1, 2$ 和 3mA 时,W 亚微米管的电阻曲线都保持不变,说明了其承受电流的能力是非常强的.在固定电流宽度分别为 $20, 100, 500$ 和 1000ns 情况下,W 亚微米管的电阻随着电流强度的变化趋势如图 4(b)所示.从图中可见,当电流宽度为 20ns 时,W 亚微米管的电阻曲线基本保持水平,稳定在 123Ω ;随着电流宽度增加到 $100, 500$ 和 1000ns ,W 亚微米管的电阻曲线仍然保持不变.总之,对 W 亚微米管施加不同电流强度、不同电流宽度的脉冲信号,其电阻都没有明显的变化,说明 W 亚微米管具有良好的电学稳定性.

图 5 给出了使用 W 亚微米管作为加热电极的 C-RAM 器件的疲劳特性测试结果.该器件采用最典型的 C-RAM 器件结构:在 W 亚微米管上沉积 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$,再覆盖上一层 W 作为上电极.由图可知,对 C-RAM 器件施加 $3\text{mA}, 20\text{ns}$ 的 RESET 电流和 $1.5\text{mA}, 100\text{ns}$ 的 SET 电流进行疲劳特性测

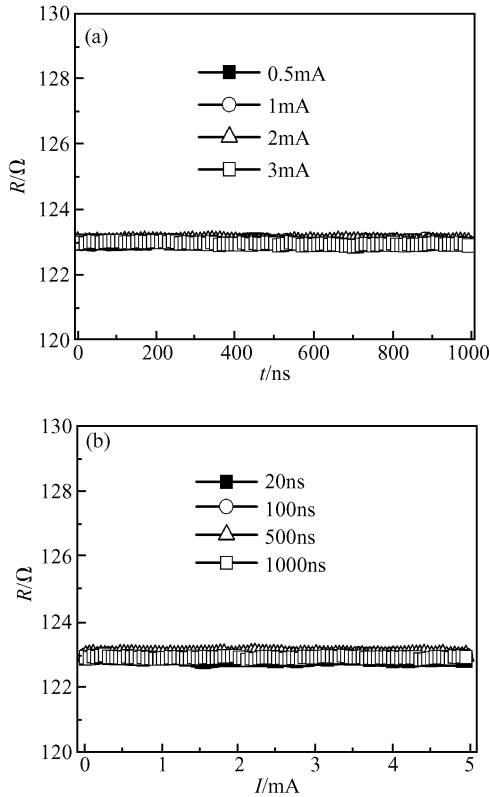


图 4 W 亚微米管的电阻与脉冲电流的变化曲线 (a) 在电流强度固定时随电流宽度的变化; (b) 在电流宽度固定时随电流强度的变化

Fig. 4 Relationship between the resistance of W sub-micron tube and current pulse (a) Current fixed; (b) Pulse width fixed

试,当循环次数达到 4×10^5 次后发生断路.影响 C-RAM 器件写擦循环次数的因素很多,包括加热电极与相变材料之间的界面接触情况变化、加热电极本身性能的变化和相变材料本身性能的变化等^[5].由于相变材料本身组分及晶粒等性能的变化只有在经过非常多的写擦循环次数之后才起到主要作用,因此,本文主要从加热电极本身性能和加热电极与相变材料界面情况两个方面进行研究.

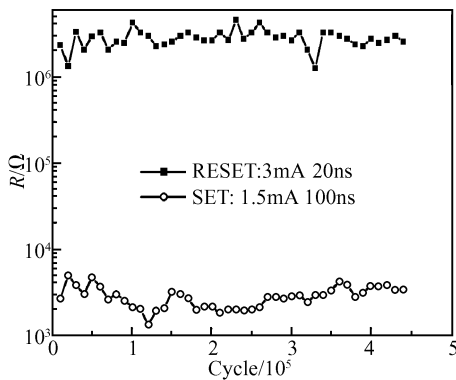


图 5 W 亚微米管的疲劳特性

Fig. 5 Fatigue behaviour of C-RAM device

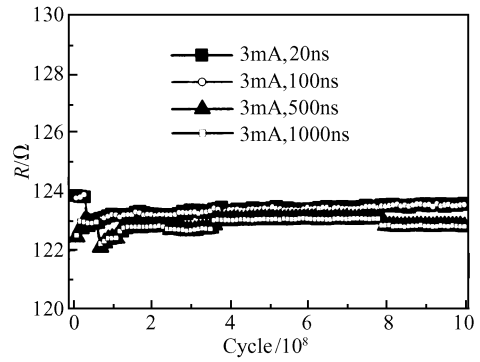


图 6 W 亚微米管的疲劳特性

Fig. 6 Fatigue behaviour of W sub-micron tube

首先,为了考察加热电极的稳定性,需要研究反复施加脉冲电信号对加热电极电阻性能的影响,图 6 给出了 W 亚微米管的疲劳特性测试结果.由图可知,对 W 亚微米管不断施加分别为 3mA、20ns, 3mA、100ns, 3mA、500ns, 3mA、1000ns 的电流脉冲信号后,当循环次数达到 10^9 次时,其电阻仍然保持稳定的状态,基本在 $122 \sim 124 \Omega$ 范围内变化,说明 W 亚微米管本身的稳定性和电阻稳定性都非常好,完全可以满足 C-RAM 器件单元的需要,因此基本可以排除器件失效的原因是由加热电极本身性能的变化引起的.

然后,为了考察器件单元的失效原因,本文采用 FIB 对失效的器件单元进行了剖面结构分析,图 7 给出了疲劳特性测试后失效 C-RAM 器件单元的 FIB 剖面图,从图 7 中可以清楚地看出 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 与电极之间的接触面断开,形成断路,导致了器件的失效,这也是器件单元失效的最常见原因之一.发生器件单元断路的原因之一可能是由于加热电极 W 是空心管状结构,这会导致相变材料在熔化过程中部分进入 W 管内部,从而使相变材料与上电极之间发生脱离;另外,由于相变材料从非晶态向多晶态转

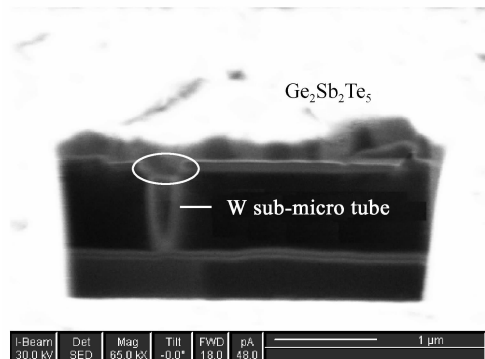


图 7 疲劳特性测试后 C-RAM 器件的 FIB 剖面图

Fig. 7 Cross-section of C-RAM device fabricated by focused ion beam method after fatigue behaviour

变时,薄膜厚度将缩小6.5%^[18],相变材料体积缩小,在多次循环后,导致了电极与 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 的脱离,造成器件单元的失效.

3 结论

本文主要研究了用于C-RAM器件加热电极的W亚微米管的电学性能,利用 $0.18\mu\text{m}$ 标准CMOS工艺线制备的加热电极为中空的W亚微米管,其外径为 260nm 左右. 8×8 阵列的W亚微米管加热电极电阻测试结果表明,W亚微米管具有很窄的电阻分布.通过对使用W亚微米管作为加热电极的C-RAM器件单元的疲劳特性测试发现,器件单元在经过 4×10^5 次的写擦循环之后失效.研究表明,W亚微米管本身具有很好的电学疲劳性能,循环工作 10^9 次后仍然保持非常稳定的电学性能,完全满足C-RAM器件的需要;器件单元失效的主要原因在于电极与相变材料之间的界面发生脱离,这可能是由于相变材料在熔化过程中部分进入W管内部以及其自身体积的缩小导致了电极与 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 的脱离,造成器件单元的失效.

参考文献

- [1] Ovshinsky S R. Reversible electrical switching phenomena in disordered structures. *Phys Rev Lett*, 1968, 21: 1450
- [2] Pirovano A, Lacaíta A L, Benvenuti A, et al. Electronic switching in phase-change memories. *IEEE Trans Electron Devices*, 2004, 51: 452
- [3] Kim S S, Jeong S M, Lee K H, et al. Simulation for reset operation of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ phase-change random access memory. *Jpn J Appl Phys*, 2005, 44(8): 5943
- [4] Takaura N, Terao M, Kurotsuchi K, et al. A GeSbTe phase-change memory cell featuring a tungsten heater electrode for low-power, highly stable, and short-read-cycle operations. *International Electron Device Meeting*, 2003: 1269423
- [5] Liu Bo, Song Zhitang, Feng Songlin. Phase-change semiconductor memories. *Physics*, 2005, 34(4): 279 (in Chinese) [刘波, 宋志棠, 封松林. 相变型半导体存储器研究进展. *物理*, 2005, 34(4): 279]
- [6] Feng Songlin, Song Zhitang, Liu Bo, et al. A review and recent process on C-RAM. *Microelectronic Technology*, 2004, 41(4): 1 (in Chinese) [封松林, 宋志棠, 刘波, 等. 硫系化合物随机存储器研究进展. *微纳电子技术*, 2004, 41(4): 1]
- [7] Cho W Y, Cho B H, Choi B G, et al. A $0.18\mu\text{m}$ 3.0V 64Mb non-volatile phase-transition random-access memory. *IEEE International Solid-State Circuits Conference*, 2004: 40
- [8] Cho S L, Yi J H, Ha Y H, et al. Cyclic plasma-enhanced chemical vapour deposition of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ films using metal-organic sources for phase change RAM. *Symposium on VLSI Technology Digest of Technical Papers*, 2005, 6B-1: 96
- [9] Ha Y H, Yi J H, Horii H, et al. An edge contact type cell for phase change ram featuring very low power. *Symposium on VLSI technology Digest of Technical Papers*, 2003: 175
- [10] Liu B, Zhang T, Xia J L, et al. Nitrogen-implanted $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ film used as multilevel storage media for phase change random access memory. *Semicond Sci Technol*, 2004, 19(6): L61
- [11] Liu B, Song Z T, Zhang T, et al. Effect of O-implantation on the structure and resistance of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ film. *Appl Surf Sci*, 2005, 242(1/2): 62
- [12] Kim D H, Merget F, Laurenzis M, et al. Electrical percolation characteristics of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ and $\text{SnGe}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ doped thin films during the amorphous to crystalline phase transition. *J Appl Phys*, 2005, 97: 083538
- [13] Chong T C, Shi L P, Zhao R, et al. Phase change random access memory cell with superlattice-like structure. *Appl Phys Lett*, 2006, 88: 122114
- [14] Liu B, Song Z, Feng S, et al. Characteristics of chalcogenide nonvolatile memory nano-cell-element based on Sb_2Te_3 material. *Microelectronic Engineering*, 2005, 82(2): 168
- [15] Liu B, Song Z, Feng S, et al. Reversible phase change for C-RAM nano-cell-element fabricated by focused ion beam method. *Chin Phys Lett*, 2005, 22(3): 758
- [16] Liu B, Feng G, Wu L, et al. Chalcogenide random access memory cell with structure of W sub-microtube heater electrode. *Chin Phys Lett*, 2007, 24(1): 262
- [17] Liang Shuang, Song Zhitang, Liu Bo, et al. Device unit test system on phase change memory. *Semiconductor Technology*, 2006, 31(8): 614 (in Chinese) [梁爽, 宋志棠, 刘波, 等. 相变存储器器件单元测试系统. *半导体技术*, 2006, 31(8): 614]
- [18] Yin Y, Sone H, Hosaka S. Dependences of electrical properties of thin GeSbTe and AgInSbTe films on annealing. *Jpn J Appl Phys*, 2005, 44(8): 6208

Properties of W Sub-Microtube Heater Electrode Used for Phase Change Memory^{*}

Feng Gaoming^{1,2,†}, Liu Bo¹, Wu Liangcai¹, Song Zhitang¹,
Feng Songlin¹, and Chen Bomy³

(1 *Laboratory of Nanotechnology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*)

(2 *Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(3 *Silicon Storage Technology Inc., Sunnyvale, CA 94086, USA*)

Abstract: In order to reduce the reset current of C-RAM devices, a W sub-micron tube heating electrode with external diameter of 260nm was fabricated in standard 0.18 μ m CMOS, and its electrical performance was characterized. A typical C-RAM device was manufactured using a W sub-micron tube heating electrode, and the causes of invalidation were analyzed through fatigue behaviour testing. The results indicate that a W sub-micron tube heating electrode with favourable electrical stability and fatigue behaviour, as well as thermal stability, provides an efficient path for reducing the reset current of a C-RAM device.

Key words: phase change memory; W sub-micron tube; electrical performance; fatigue behaviour

EEACC: 2550N

Article ID: 0253-4177(2007)07-1134-05

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2006CB302700), the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2006AA03Z360), Chinese Academy of Science (No. Y2005027), and the Science and Technology Commission of Shanghai (Nos. 05JC14076, 0552nm043, AM0517, 06QA14060, 06XD14025, 0652nm003, 06DZ22017)

[†] Corresponding author. Email: gaomingfeng@mail.sim.ac.cn

Received 19 December 2006, revised manuscript received 8 February 2007

©2007 Chinese Institute of Electronics