

抗辐照相变存储器芯片温度适应性研究

段欣欣¹, 王敏琪¹, 潘乐乐¹, 邱源¹, 程志渊²

(1. 上海航天电子技术研究所, 上海 201100; 2. 浙江大学微电子学院, 杭州 310058)

摘要: 分析了相变存储器应用于航天器时应该考虑的高低温可靠性, 并设计实验研究镁光公司研发推出的低功耗相变存储芯片 LPDDR2-PCM MT66R7072, 以评估其空间应用的可行性; 实验结果显示: 在-40~80℃范围下, 相变存储芯片能够正常实现读写操作, 在25℃下, 待机功耗为9.792 mW, 最大工作功耗为36.474 mW, 相对现役空间存储器, 表现出明显的低成本、低功耗和高可靠性等优势。

关键词: 相变存储器; GST; 适应性; 抗辐照; 低功耗

Research on Temperature Adaptability of Phase Change Memory Chip

Duan Xinxin¹, Wang Minqi², Pan Lele², Qiu Yuan², Cheng Zhiyuan¹

(1. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201100, China;

2. School of Microelectronics, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: This paper analyzes the spatial radiation effects and wide temperature reliability that phase change memory should be considered in spacecraft, and a series of experiments are designed to evaluate its space application on LPDDR2-PCM MT66R7072, a low power phase change memory chip was developed by Micron 2012. The experimental results show that the phase change memory chip can realize the read and write operation normally in the range of -40~80℃. At 25℃, the standby power consumption is 9.792 mW and the maximum working power is 36.474 mW. Comparing to existing spatial memory, that phase change memory shows significant advantages of low cost, low power consumption and high reliability.

Keywords: phase change memory; GST; adaptability; anti-radiation; Low power

0 引言

半导体技术的进步与发展已成为现代高科技的基础和现代社会的主要推动力之一。从计算机、手机、互联网、云计算、数据中心、全球定位系统,再到数字媒体设备、家用电器、智能身份证、传感器、医疗设备、工业智能设备、卫星、航天飞机、致命的武器系统等多领域与应用场合,半导体芯片无所不在。自从20世纪中叶以来,半导体产业的飞速发展对人类进步做出的卓越的贡献,现代社会已经离不开半导体产品。在现代集成电路中,单个器件可以做到纳米级别的尺寸,可以将数十亿个晶体管集成到一个芯片中,可以处理和存储海量的信息。

从未来技术发展的角度来看,半导体芯片不仅需要工艺的更进一步缩小和更低的成本,还需要具有更高的性能、安全性、以及可靠性。然而,当半导体产业竞相寻找一个捷径去继续摩尔定律的时候,传统的半导体存储器面临着几个关键的挑战。DRAM, SRAM, 闪存(Flash)等几种传统的半导体存储器都是基于电荷来存储信息的。基于电荷存储的存储器所面临的一个很大的挑战就是电荷存储量(单个器件中存储的电子数目)随着工艺尺寸的缩减

变的太少,进而引发可靠性操作的问题。表1显示了一些预计半导体存储器技术走向。一般的共识是在未来几年DRAM和闪存随着半导体工艺尺寸的缩小将会变得越来越困难和昂贵,难以继续发展下去。同时DRAM和闪存都有致命的限制其应用的明显缺点:DRAM是易失型存储器,在没有电源的情况下无法存储信息。而闪存则速度很慢,比DRAM慢多个数量级。而对于空间应用来说,这些传统的基于电荷存储的存储器芯片还有一个更致命的缺点,所存储的电荷(代表1或0信息)非常容易受辐照的影响而导致失效。

表1 ITRS提出的半导体存储器技术路线

Half Pitch/nm	2011	2012	2013	2014	2015	2016
DRAM	36	32	28	25	23	20
NOR Flash	65	55	45	45	45	38
NAND Flash	22	20	18	17	15	14
PCM	45	38	32	28	24	21
Logic M1	38	32	27	24	21	19

经过最近几十年的研发,目前已有几种新型的存储器技术可以克服闪存和DRAM的发展瓶颈,他们各具有不同的特点。其中,相变存储器(PCM)具有非常优越的性能,它具有非易失、速度快、高容量、低耗能、读写次数高及成本低等优势,被认为是一种既可以取代Flash又能够取代DRAM的通用存储器,同时也可以取代电脑硬盘。PCM同

收稿日期:2019-04-10; 修回日期:2019-05-07。

作者简介:段欣欣(1990-),女,江苏阜宁人,硕士研究生,工程师,主要从事车载固态存储技术方向的研究。

时克服了 Flash 和 DRAM 的缺点, 兼具两者优点, 既像 Flash 一样具有非易失性和低成本的优点, 同时具有接近于 DRAM 的读写速度。PCM 还具有 Flash 和 DRAM 都不具备的优点: 它可以进一步减少器件尺寸到纳米量级。更重要的一个优点是, 相变材料对辐照不敏感, 因为相变材料的阻值(代表 1 或 0 信息)由相变材料的晶态决定, 与电荷无关, 而辐照对晶态的影响十分轻微, 因此相变存储器对辐照有极强的抵抗力。基于这个特点, 相变存储器非常适合航天航空等应用领域, 可以在航天领域发挥巨大的作用, 如卫星、火箭、导弹等。当 PCM 芯片应用于卫星大容量固态存储时, 比较看重的特性为: 大容量、高速度、防抗辐射、高可靠性。但是从目前的技术水平上看, PCM 暂无 FLASH 大容量特性优势, 因此高速度和抗辐照特性是 PCM 的优势所在。然而 PCM 存储器也有一个不足之处, 其性能受温度的影响比 DRAM 和 Flash 更严重, 因为温度可以改变相变材料的晶态。本文旨在用实验方法取得商用 PCM 芯片抗辐照特性和高低温试验中的存储性能表现与功耗情况, 评估相变存储器空间应用的可行性。

1 原理

相变材料在 20 世纪 60 年代就被发现^[1], PCM 存储器技术的研究和发展也已经超过了 30 年, 而相变存储器的应用却在最近几年才开始, 这主要得益于一些新型相变材料的发现, 如 Ge₂Sb₂Te₅ (GST) 等, GST (Ge₂Sb₂Te₅), 属于硫系化合物。硫系化合物主要指的是 VI 族元素与 III-V 族元素组成的合金。这类合金具有可变的非晶态、多晶态等相态, 并能够在相态之间进行纳秒级转变 (10~30 ns)^[2]。在不同相态下, 其光学特性包括折射率与吸收系数具有相当大的差异, 其电学特性主要表现为电阻值也有相当大的差异^[3]。在近 30 年, 相变材料被广泛用于多媒体光学存储, 如 DVD 中^[4-5], 近 15 年间, 随着微电子技术的发展, 相变材料开始被应用于高速非易失性存储器中^[6-7], 并且有研究论证了相变存储器可以与传统的存储技术如闪存技术等竞争的可行性^[7]。

相变存储器集成到阵列当中时通常有 3 种形式, 如图 1 所示。

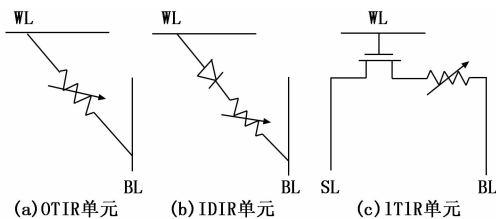


图 1 PCM 存储单元集成时采用的不同驱动电路

图 1 中 (a) 的存储单元只包含一个相变单元。相变存储器的上下两端分别与字线和位线相连, 这种结构最简单, 可以实现最小单元面积, 同时可以三维立体集成。2008 年 HP 实验室制作出半节距 30 nm 的 MIM 结构, 而当时 DRAM 的半节距是 59 nm, 在编程和读操作时, 通过行译

码和列译码选中一条字线和一条位线, 从而选中交叉点的单元, 但是这种 0T1R 单元阵列存在严重的干扰。为了避免非选中单元引起的干扰和泄漏路径, 应该在每个存储单元增加一个选择开关, 可以用二极管作开关器件, 这样就构成了 1D1R 存储单元, 即图中 (b) 所示结构。可以采用在硅衬底形成 PN 结开关二极管, 但是这种结构占用面积大。图中 (c) 是目前使用最广泛的结构, 用 MOSFET 作单元的选择开关构成 1T1R 单元, 采用 MOSFET 作控制开关可以有效抑制泄漏电流, 而且 MOSFET 也可以提供较大的编程电流, 加快编程速度。

在性能上, 未来相变存储器最有可能取代的是 DRAM 和 Flash 两种技术。在速度上, 相变存储器与 DRAM 相近。随着产业规模的扩大, 相变存储器的成本也在逐年降低, 根据市场数据, 未来将降到 DRAM 之下, 同时, 相变存储器是一种非易失性存储器, 随着成本的降低和工艺的进步, 未来也可以取代 Flash 作为大容量存储的介质。与 Flash 相比, 相变存储器的数据保持力更持久, 理论上, 在 85 摄氏度下, 相变存储器的数据可以保持 10 年之久, 而擦写次数更是达到 10 万次以上, 这是 Flash 无法比拟的, 同时读写速度都比 Flash 高几个数量级, 接近 DRAM 的速度。SRAM 作为一种高速存储器, 通常不会以独立存储器的形式出现在市场上。除上述优点以外, 相变材料还具有抗辐照的特点。由于辐照对三极管栅极界面电荷影响很大, 因此传统存储器抗辐照能力很差, 而相变存储器中, 相变材料的阻值变化对辐照并不敏感, 因此抗辐照性能优异。

鉴于相变存储器的特点, 包括简单的结构、优异的抗辐照性能、非易失性、高速等特点, 相变存储器有望取代现有的多种存储器技术。

2 实验环境搭建

LPDDR2-PCM MT66R7072 是镁光公司于 2012 年研发推出的低功耗相变存储芯片, 具有 512 Mb 和 1 Gb 两个容量版本, 采用 VFBGA 封装结构, 芯片尺寸为 8 mm×8 mm×0.8 mm。本实验旨在验证该相变存储芯片各项性能表现和抗辐照特性是否满足航空航天应用需求, 测试内容主要包括:

- 1) 常温下芯片根据时序 (250 M) 进行常规的读写擦操作、芯片功耗测试;
- 2) 常温下芯片根据时序进行最快速度的读写擦操作、芯片功耗测试;
- 3) 高低温环境下芯片根据时序 (250 M) 的常规读写擦操作、芯片功耗测试;
- 4) 高低温环境下芯片根据时序的最快读写擦操作、芯片功耗测试。

具体数据方面, 芯片运行时序及速度要求能达到数据表指明的数据范围, 温度范围为 -25~85 °C (需要将硬件环境放置于高低温箱进行测试)。

针对测试板的功能需求, 本实验采用 FPGA 作为主控

芯片的方案来实现整个测试板的功能。测试板系统如图 2 所示, 包括一块外围板, 一块核心板。

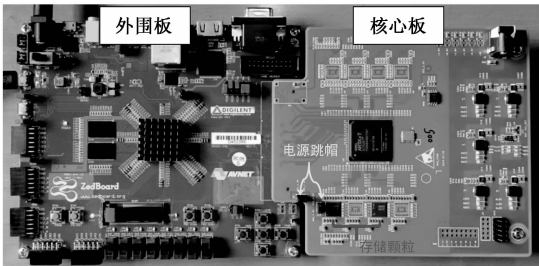


图 2 LPDDR2-PCM 芯片测试板系统 (包括一块外围板和一块核心板)

核心板基于 Xilinx Artix 系列 XC7A35T 来设计, XC7A35 核心板可为各种嵌入式应用实现快捷跨越式启步, 其中包括从基于 Linux 的计算密集型系统到轻量级微控制器等各种应用。通过微控制器完成数据的搬移和对存储颗粒的读写操作。外围板采用标准的 ZedBoard 来实现, ZedBoard 是基于 Xilinx Zynq™7000 扩展式处理平台 (EPP) 的开发板。核心板与外围板通过硬件接口互联。核心板通过网口与 PC 机建立通信, PC 发送测试任务, 并监测测试板运行情况。

3 实验设计与实施

外围板和核心板通过扩展接口连接, 核心板以此获取外围板的供电电源。外围板通过 USB 与 PC 串口相连, 实现数据通信。

1) 芯片功能表征方法: 芯片功能, 即 PCM 进行擦、写、读的速度, 由 FPGA 记录擦、写、读指令发出的时刻和 PCM 完成擦、写、读的时刻, 通过这两个时刻做差来获得 PCM 进行擦、写、读所需的时间, 进而反映 PCM 进行擦、写、读的速度。这种方法只能间接获得 PCM 进行擦、写、读所需的时间, 这是由于本实验采用已封装好的 PCM 芯片, 无法打开封装对芯片内部器件直接测量, 同时 PCM 读写对数据传输载体具有极高的要求, 当前实验架构无法获取到更准确时间。

2) 芯片性能表征方法: 芯片性能表征主要指芯片的功耗测试。核心板 PCM 的供电接口有 1.2 V 和 1.8 V 两个, 前者负责数据 I/O 及存储, 后者负责逻辑功能。功耗测试就分为两部分, 两个电流测试点分别设置在这两个电压接口上, 在芯片工作时, 获取待机电流和操作电流, 进而计算功耗值。

3.1 温度适应性试验的测试步骤

1) 测试系统初始化: 外围板和核心板通过扩展接口连接, 外围板供电并使用 USB 连接线将串口与 PC 相连, 测试系统搭建完成。通电, 并在 PC 上打开 ttermpr 软件工具, 等待外围板上系统启动。

2) 变温测试: 变温测试范围为 -25~85 °C, 每隔 5 °C 进行一次写读擦操作并记录操作时间、误码率和电流值。

-40 ~ 85 °C 为该芯片厂家标定的工作温度范围。

进行写读擦操作使用的数据文件有:

- a) 全 0 文件, 1024 Kb: 内容为二进制的 0;
- b) 全 1 文件, 1024 Kb: 内容为二进制的 1;
- c) 55A 文件, 1024 Kb: 内容为 0101 排列。

d) 随机数文件, 1024 Kb: 内容为将一份文本文件转化得到二进制文本, 其中 0 和 1 的分布没有规律, 具备随机性。

写、擦操作由 FPGA 发出指令控制 PCM 将数据文件写入相应地址, FPGA 反馈指令发出时刻和完成时刻; 读操作由 FPGA 发出指令控制 PCM 将数据文件传输回 FPGA 并与相应的数据文件进行对比, 得出误码率。

4 实验结果

按照第二部分的试验步骤, 搭建试验环境。外围板和核心板连接成功之后, 电流测试节点通过引线引出高低温箱, 利用电流计对节点的电流做测试, 并记录数值。

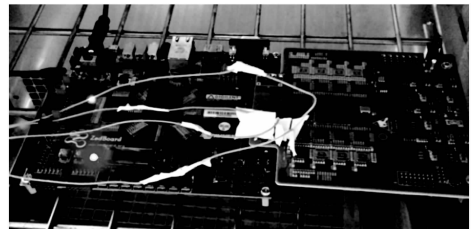


图 3 高低温实验环境现场

试验过程共测得 -40~85 °C 一共 26 个测试点的试验数据。图 4 对各个数据结果做分析讨论。

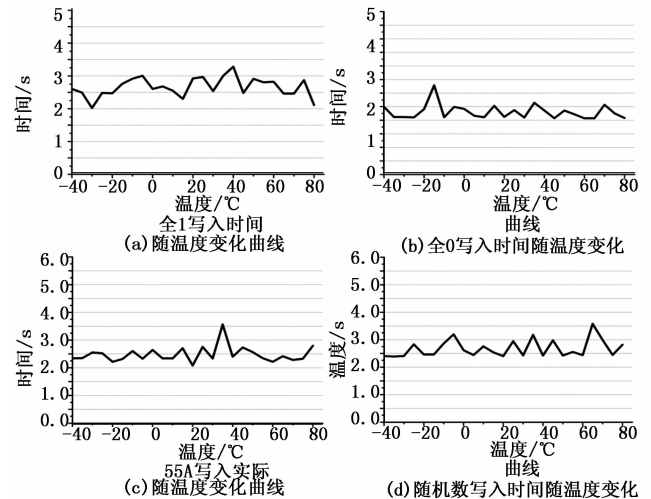


图 4 数据结果分析

4.1 写入时间与温度变化趋势

从 PC 端的端口页面, 查看打印的报文, 从中读出写入开始时间与结束时间, 对其两者作差, 可以得出写入时间与温度的变化曲线。全 1 写、全 0 写、55A、随机数的写入时间在 2~3.5 s 之间随机波动, 可以看出写入时间受温度影响较小。

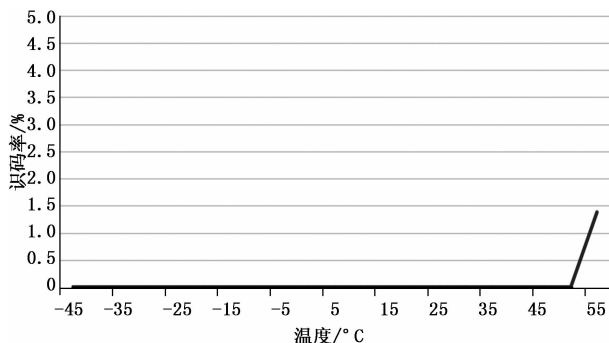


图 5 写入随机数误码率随温度变化曲线

4.2 误码率与温度变化趋势

在试验温度 $-40 \sim 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内, 芯片进行全 1 写、全 0 写、55A 写操作的误码率均为 0, $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时约为 1.3871% 。

由于外围板和核心板硬件上的限制, 当温度高于 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 本实验环境无法测量出有效的误码率数据。

待机功耗随温度变化曲线

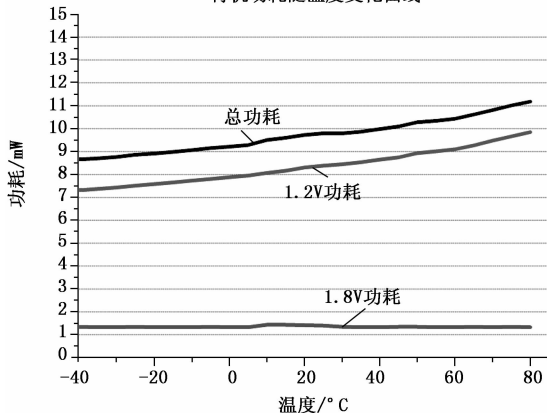


图 6 待机功耗随温度变化曲线

4.3 功耗消耗与温度变化趋势

在图 2 所示的电源跳帽处接入导线, 用电流夹具测得电流值大小, 然后乘以对应的电压值, 得到功耗试验数据, 整理出如下图所示的待机状态芯片功耗与温度的变化曲线:

常温 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下, 待机功耗大概为 9.792 mW ; 在试验的最低温度 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 情况下, 总功耗为 8.658 mW ; 在试验最高温 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 情况下, 总功耗为 11.184 mW 。

核心板 PCM 的供电接口有 1.2 V 和 1.8 V 两个, 前者负责数据 I/O 及存储, 后者负责逻辑功能。根据测试结果分析, 负责逻辑功能的模块功耗受温度影响较小, 负责数据 I/O 及存储模块的功耗随着温度的升高有增长的趋势, 但是趋势很缓慢, 最终总功耗从最低温到最高温功耗仅增加 2.526 mW 。

根据测得的试验数据, 整理出芯片全写 1 时功耗与温度的变化曲线如图 7 所示。

常温 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 情况下, 全写 1 的读写功耗为 36.474 mW ;

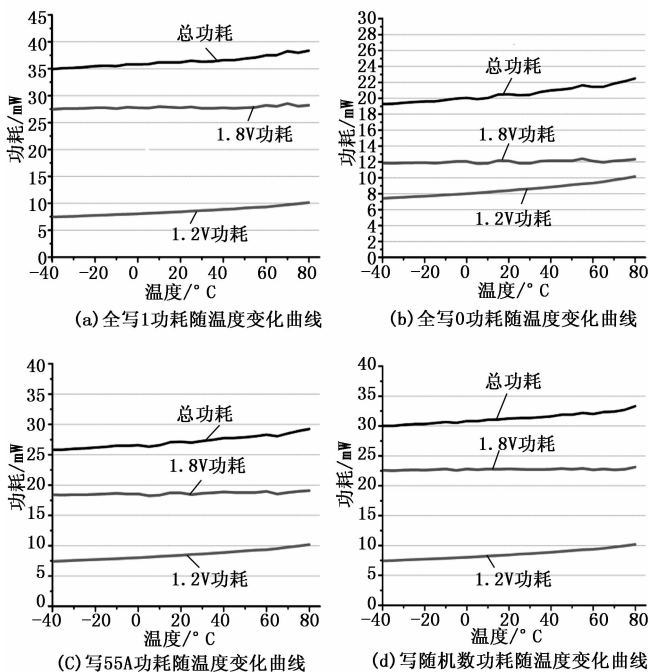


图 7 功耗与温度变化曲线图

在试验的最低温度 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 情况下, 功耗为 34.92 mW ; 在试验最高温 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 情况下, 功耗为 38.352 mW 。可以看出待机功耗随着温度的升高有增长的趋势, 但是趋势很缓慢, 从最低温到最高温功耗增加 3.432 mW 。全写 0 的擦除功耗为 20.388 mW ; 在试验的最低温度 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 情况下, 功耗为 19.278 mW ; 在试验最高温 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 情况下, 功耗为 22.482 mW 。可以看出待机功耗随着温度的升高有增长的趋势, 但是趋势很缓慢, 从最低温到最高温功耗增加 3.204 mW 。写入 55A 文件的功耗为 27.000 mW ; 在试验的最低温度 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 情况下, 功耗为 25.812 mW ; 在试验最高温 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 情况下, 功耗为 29.256 mW 。可以看出待机功耗随着温度的升高有增长的趋势, 但是趋势很缓慢, 从最低温到最高温功耗增加 3.444 mW 。写随机数文件的功耗为 31.320 mW ; 在试验的最低温度 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 情况下, 功耗为 30.018 mW ; 在试验最高温 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 情况下, 功耗为 33.318 mW 。可以看出待机功耗随着温度的升高有增长的趋势, 但是趋势很缓慢, 从最低温到最高温功耗增加了 3.3 mW 。

5 结束语

本实验选择镁光公司 2012 年推出的低功耗相变存储芯 LPDDR2-PCM MT66R7072, 进行温度适应性测试。从实验结果可见: 在常温下待机功耗为 9.792 mW , 最大工作功耗为 36.474 mW , 满足低功耗设计标准。关于耐温特性, 在低温 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 芯片均能正常读写, 且误码率为零。在高温段, 最高试验温度是 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 读写速度受温度影响较小, 理论上在正常工作温度范围内, 均能快速完成读写工作。尤其是在低温 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 情况下, 芯片性能表现良好。

(下转第 222 页)