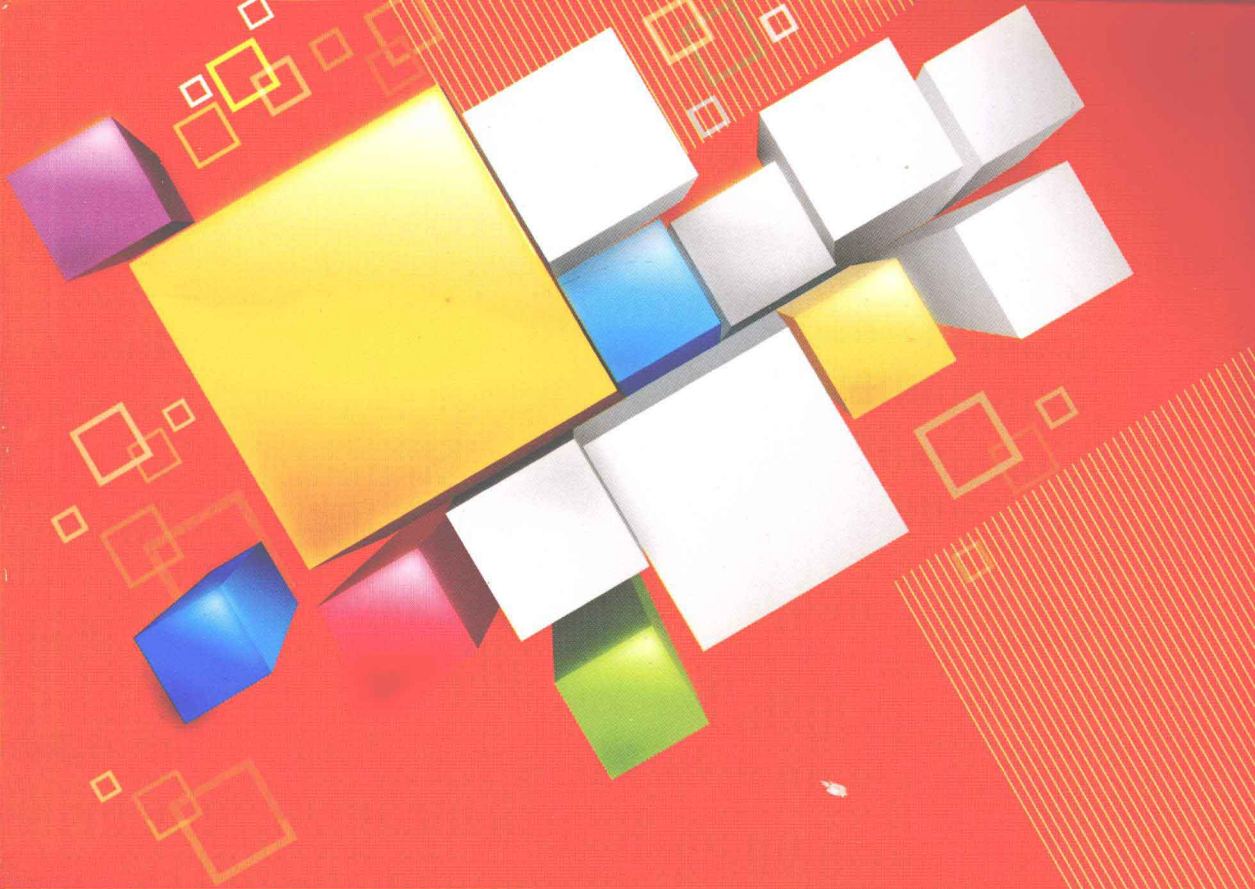




邓颖 编著

MSP430FRAM

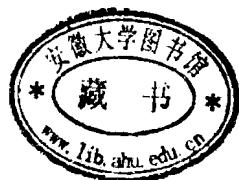
铁电单片机原理及 C程序设计



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

MSP430FRAM 铁电单片机 原理及 C 程序设计

邓 颖 编著



北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书详细介绍了 TI 公司的 MSP430FRAM 系列单片机的特性和优势, 主要内容包括 MSP430 FRAM 单片机的基础部分和实际应用设计部分。其中, 基础部分包括通用 FRAM 铁电概述、TI FRAM 铁电单片机产品功能特点、TI FRAM 开发工具和最新的软件库; 应用设计部分包括功能模块程序设计及常见问题解答、EMC 电磁兼容性设计因素考量、TI FRAM 产品应用。

本书程序采用结构化的 C 语言编写, 并编译调试通过, 均达到设计预期功能。

本书既可作为高等院校电子技术、通信、计算机及自动化类专业的本、专科学生和研究生的教学参考用书, 也可作为大学生参加电子设计竞赛和工程技术人员进行开发设计的技术辅导资料。

图书在版编目(CIP)数据

MSP430FRAM 铁电单片机原理及 C 程序设计 / 邓颖编著
— 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012. 8
ISBN 978-7-5124-0901-9

I. ①M… II. ①邓… III. ①单片微型计算机 IV.
①TP368.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 183446 号

版权所有, 侵权必究。

MSP430FRAM 铁电单片机原理及 C 程序设计

邓 颖 编 著

责任编辑 沈韶华

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: bhpess@263.net 邮购电话:(010)82316936

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本: 710×1 000 1/16 印张: 15 字数: 328 千字

2012 年 8 第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷 印数: 4 000 册

ISBN 978-7-5124-0901-9 定价: 32.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题, 请与本社发行部联系调换。联系电话: (010)82317024

前言

德州仪器(TI)的 MSP430 是业界知名的超低功耗微控制器(MCU),它不断地添加新的家族成员,以满足新的应用需求。与基于闪存和 EEPROM 的微控制器相比,该 FRAM 系列可确保 100 倍以上的数据写入速度和 250 倍的功耗降幅。此外,这种片上 FRAM 还可在所有的电源模式中提供数据保存功能、支持超过 100 万亿次的写入次数,并为开发人员提供了一个全新的灵活度(允许其通过软件变更来完成数据内存与程序内存的分区,实现真正的数据存储区和程序存储区的统一)。本书一大目的就是帮助用户尽快熟悉 TI MSP430FRAM 平台,更好地在国内推广这一极具优势的微控制器平台。

本书以 MSP430FRAM 为例,着重讲述 TI 公司的 MSP430FR57xx 系列单片机的特性和优势。

MSP430FR57xx FRAM 单片机的主要特性及优势如下:

- 当从 FRAM 中执行代码时,可将目前业界最佳功耗水平降低 50% 之多——工作流耗为 100 μ A/MHz(主动模式)和 3 μ A(实时时钟模式)。
- 超过 100 万亿次的可写入次数能支持连续数据录入,从而无需采用昂贵的外部 EEPROM 及依赖电池供电的 SRAM。
- 统一存储器允许开发人员利用软件来轻松改变程序、数据以及缓存之间的内存分配,从而简化了目录管理并降低了系统成本。
- 所有电源模式中的数据写入及数据保存保障可确保代码安全性,以简化开发流程、降低存储器测试成本及提升终端产品可靠性。
- 实现了可靠的远程软件升级——特别是可以实现空中升级——旨在为设备制造商提供更廉价、更便捷的软件升级途径。
- 密度高达 16 KB 的集成型 FRAM 以及模拟和连接外设选项,包括 10 位 ADC、32 位硬件乘法器、多达 5 个 16 位定时器和乘法增强型 SPI/I²C/UART 总线。
- 所有 MSP430 平台上的代码兼容性以及低成本、易用型工具、综合全面的文档资料、用户指南和代码示例可方便开发人员立即启动开发工作。
- 众多由 TI 提供的兼容型射频(RF)工具可简化系统开发工作。
- 可实现无电池的智能型 RF 连接解决方案。
- FR57xx MCU 基于 TI 先进的低功耗、130 nm 嵌入式 FRAM 工艺。

本书讲述内容包括 MSP430 FRAM 单片机的基础部分和实际应用设计部分。其中基础部分包括通用 FRAM 铁电概述, TI FRAM 铁电单片机产品功能特点, TI FRAM 开发工具。应用设计部分包括功能模块程序设计及常见问题解答, EMC 电磁抗干扰设计, TI FRAM 产品应用。本书由浅入深, 内容翔实。首先讲述 MSP430 FRAM 单片机的特点和选型, 然后介绍其开发环境平台, 接着针对 MSP430 FRAM 系列所有功能模块详细阐述, 并给出相应的 C 语言应用例子程序, 同时结合作者多年经验讲述 MSP430 FRAM 单片机常见问题的解答, 最后结合 MSP430 FRAM 自身特点进行具体的应用系统设计, 并给出具体的应用案例。本书所有程序均采用 C 语言编写, 并编译调试通过, 均达到设计预期功能。书中内容全面, 涵盖全系列 MSP430 FRAM 单片机, 通过阅读本书, 读者在开发过程中很容易选择适合自己的单片机型号, 并学会使用它。本书弥补市场上急缺的 MSP430 FRAM 铁电单片机的 C 语言实例以及工程应用案例, 加快了工程设计人员的研发进程。书中融入了作者对于 MSP430FRAM 系列的实际开发经验以及技巧总结。

书中提供了调试验证过的程序代码和完整的硬件电路图, 代码部分注释详细, 便于阅读和理解。本书既可作为高等院校电子技术、通信、计算机及自动化专业的本、专科学生和研究生的教学参考用书, 也可作为大学生参加电子设计竞赛和工程技术人员进行开发设计的技术辅导资料。

关于书中的相关问题和疑问, 读者可以来信咨询, 联系邮箱: ti. mcu @ hotmail. com。

邓 颖
2012 年 4 月

目 录

第一篇 基础部分

第 1 章	FRAM 铁电概述	3
1.1	FRAM 介绍	3
1.2	FRAM 的基础知识	6
1.2.1	FRAM 物理效应	6
1.2.2	FRAM 优势	12
第 2 章	TI FRAM 铁电单片机产品功能特点	14
2.1	MSP430FRAM 功能概述	14
2.2	MSP430FRAM 的选型表	23
2.3	MSP430FRAM 产品与 Flash 芯片实际对比测试	25
2.3.1	最大的写入速度和写入功耗测试	25
2.3.2	FRAM 优化数据保存	25
2.3.3	最大化 FRAM 的写入速度	27
2.4	MSP430FRAM 工具	32
2.4.1	MSP - EXP430FR5739 实验板	32
2.4.2	MSP - FET430U40A 工具	33
2.5	MSP430FR57xx 与其他 FRAM 单片机的比较	34
2.5.1	与 Ramtron 公司的 VRS51L3174 比较	34
2.5.2	与 FUJITSU 公司的 FRAM 比较	34
2.6	从 TI MSP430 到 TI MSP430FRAM	34
2.6.1	系统级功能移植的考虑	34
2.6.2	外设功能的移植	39
2.7	MSP430FRAM 系统设计部分	45
2.7.1	电源供电	45
2.7.2	复位电路的可靠性设计	51
2.7.3	MSP430FRAM 系列单片机外部晶振电路的设计	55
2.7.4	低功耗设计	59
2.7.5	与 5 V 控制系统的接口设计	60

第 3 章 TI FRAM 常用开发工具	62
3.1 TI FRAM 硬件调试工具	62
3.1.1 TI MSP430 调试工具	62
3.1.2 TI MSP430 编程软件	64
3.2 TI FRAM 软件调试开发环境	64
3.2.1 MSP-EXP430FR5739 FRAM 实验板介绍	64
3.2.2 MSP-EXP430FR5739 在 IAR 和 CCS 下的使用方法	69
3.2.3 常用的在线编程软件 FET-Pro430 和 MSP430 Flasher	70
3.2.4 GangProgrammer 脱机编程工具	73
3.3 MSP430 汇编与 C 语言混合编程	75
3.3.1 IAR 的 C 编译器中函数间变量传递的定义	76
3.3.2 汇编函数被 C 调用	77
3.3.3 编译 C 和汇编函数	77
3.3.4 编译库文件	78
3.3.5 在观察窗口中观察汇编变量	79
3.4 MSP430 在 CCS 下的图形化插件 Grace	88
3.4.1 如何让代码飞起来——MSP430 图形可视化仿真	88
3.4.2 如何让程序写起来容易——MSP430 Grace 插件的使用	95
3.5 MSP430Ware 软件库	102
3.5.1 MSP430Ware 概述	102
3.5.2 在新工程下使用软件库(DriverLib)	102
3.5.3 MSP430Ware 驱动库使用例程	103

第二篇 应用设计部分

第 4 章 TI FRAM 功能模块程序设计及常见问题解答	111
4.1 实验板原理图	111
4.2 I/O 口寄存器以及程序设计	117
4.2.1 I/O 口寄存器操作	118
4.2.2 C 程序设计	124
4.3 ADC 功能及 C 程序设计	125
4.4 比较器及 C 程序设计	127
4.5 定时器 TA 和 TB 及 C 程序设计	128
4.6 串行接口 SPI/UART/I ² C 及 C 程序设计	130
4.7 看门狗定时器 WTD 及 C 程序设计	133
4.8 MPU 写保护功能及 C 程序设计	134
4.9 低功耗模式及 C 程序设计	137

4.10	DMA 功能及 C 程序设计	139
4.11	MPY 硬件乘法器及 C 程序设计	140
4.12	FRAM 字节写入操作及 C 程序设计	141
4.13	TI FRAM 常见问题解答	142
4.13.1	TI FRAM 使用疑问解答	142
4.13.2	MSP430 芯片调试应注意的问题	148
4.13.3	MSP430 单片机常见加密方法	153
第 5 章	EMC 电磁兼容性设计因素考量	161
5.1	MCU 常见的电磁干扰	161
5.2	MCU EMC 抗干扰设计的措施	166
5.2.1	抗干扰措施——缩短布线长度	166
5.2.2	抗干扰措施——电源和地	168
5.2.3	抗干扰措施——接地的设计	171
5.2.4	抗干扰措施——时钟电路	171
5.2.5	抗干扰措施——复位信号的处理	173
5.2.6	抗干扰措施——远离 MCU 信号的处理	174
5.2.7	抗干扰措施——未使用管脚的处理	175
5.2.8	抗干扰措施——削减 MCU 应用时的 EMI	176
5.2.9	抗干扰措施——PCB 布线	179
5.2.10	抗干扰措施——软件设计	180
5.3	MCU EMC 实际应用解决案例	183
5.4	IC 回流焊的建议	189
第 6 章	TI FRAM 产品应用	193
6.1	基于 AISG2.0 协议的电调天线远程控制单元	196
6.1.1	系统总体结构	197
6.1.2	系统硬件实现	197
6.1.3	软件设计	199
6.2	MSP430FRAM 在工业记录仪器中的应用	201
6.2.1	工业数据记录仪	201
6.2.2	工程机械安全监控	203
6.2.3	船舶机舱油气浓度检测	203
6.2.4	高温测试仪数据采集	204
6.2.5	MSP430FRAM 的脱扣器寿命测试仪	205
6.2.6	MSP430FRAM 在智能配电箱中的应用	206
6.3	区域火灾烟雾探测器设计	207
6.4	智能 SFP 光模块中 MSP430FRAM 的使用	209
6.4.1	智能 SFP 光模块系统设计	210

6.4.2 SFP 光模块信息存储	212
6.5 远程传感器设计	212
6.5.1 “五防”的概念	213
6.5.2 防误闭锁装置的演变	214
6.6 电子式高压互感器中温湿度的实时测量	219
6.6.1 系统概述	220
6.6.2 硬件电路部分设计	221
6.6.3 软件部分设计	224
6.7 太阳能最大功率 MPPT 跟踪器设计	227
6.7.1 系统的整体框图	227
6.7.2 电路拓扑的选择	227
6.7.3 电路的设计	228
6.7.4 电路元器件参数计算	230
6.7.5 控制器的选择	230
6.7.6 MPPT 控制算法的选择及实现	230
参考文献	232

第一篇 基础部分

第 1 章

FRAM 铁电概述

1.1 FRAM 介绍

Ramtron 成立于 1984 年,并从那时起开始发展铁电技术,在第一阶段把重点放在材料科学上——即该采用什么样的材料、怎样去存储等。值得一提的是,Ramtron 花了 8 年时间(1984—1992)才理清了基本的技术原理。1992 年建成晶元生产线后,才开始开发出第一个产品。Ramtron 事实上在 1993 年就已经推出了一个 4 KB 的铁电存储器,而这是第一个用于商业销售的存储器产品。1993 到 1997 年间,Ramtron 开始运作自己的晶元生产线,这也是当时世界上仅有的能生产出铁电存储器的晶元生产线。当时有一台仪器设备能够控制设计出 $1\ \mu\text{m}$ 的芯片制程,能生产的存储器最大容量为 64 KB。在 1995 年 Ramtron 开始铁电存储器的技术授权。

Ramtron 着重于技术授权,而在技术提高升级方面相对较少。在那段时期,Ramtron 事实上在推进技术进步方面没有取得什么很重大的进步。Ramtron 的第一个合作伙伴(Rohm)在 1998 年开始投入铁电存储器的生产,开发出 Ramtron 的 $1\ \mu\text{m}$ 制程。至此,Ramtron 的产品在产量和信任度上取得了实质性的增长,但是还没有达到最大的程度。Ramtron 第二个合作伙伴(富士通)在 1999 年开始生产铁电存储器。他们取得了重大的进展,已经开始了 $0.5\ \mu\text{m}$ 的制程生产,这项进展使得 Ramtron 现在生产 256 KB 容量的存储器成为可能。直到这个时候,Ramtron 才把重点放在提高技术的稳定可靠性和制造工艺上,并且现在在这两个方面已经取得了成效。

铁电存储器(FRAM)的核心技术是将微小的铁电晶体集成进电容内,使得 FRAM 产品能够像快速的非易失性 RAM 那样工作。通过施加电场,铁电晶体的电极化在两个稳定状态之间变换,内部电路将这种电极化的方向感知为高或低的逻辑状态。每个方向都是稳定的,即使在电场撤除后仍然保持不变,因此能将数据保存在存储器中而无需定期更新。

相对于其他类型的半导体技术而言,铁电存储器具有一些独一无二的特性。传

统的主流半导体存储器可以分为两类——易失性和非易失性。易失性的存储器包括静态存储器 SRAM(static random access memory)和动态存储器 DRAM(dynamic random access memory)。SRAM 和 DRAM 在掉电的时候均会失去保存的数据。RAM 类型的存储器易于使用、性能好,可是它们同样会在掉电的情况下失去所保存的数据。非易失性存储器在掉电的情况下并不会丢失所存储的数据。然而所有的主流非易失性存储器均源自于只读存储器(ROM)技术。所有由 ROM 技术研发出的存储器则都具有写入信息困难的特点(这些技术包括有 EPROM(已经废止)、EEPROM 和 Flash)。这些存储器不仅写入速度慢,而且只能有限次地擦写,写入时功耗大。铁电存储器能兼容 RAM 的一切功能,并且和 ROM 技术一样,是一种非易失性的存储器。铁电存储器在这两类存储类型间搭起了一座跨越沟壑的桥梁——一种非易失性的 RAM。

铁电存储器(FRAM)最吸引用户眼球的性能特点是几乎无限的写入次数(100 万亿次),远远超过了 EEPROM 的 100 万次,因此与 SRAM、非易失性 SRAM 模块、MRAM 和 NVSRAM 一起成为需要频繁写入操作的嵌入式应用的存储器选择之一。FRAM 现已广泛地在计量、电力能源的监测、嵌入式系统、安全系统报警监控、工业控制以及汽车电子等领域得到了应用,全球交货量已超过 1.75 亿个,且应用空间和规模还在不断扩大中。FRAM 是需要频繁写入应用的理想选择,FRAM 的优势表现在如下各方面。

① 与 EEPROM、MRAM 和闪存相比,FRAM 有哪些性能优势?

FRAM 一个很重要的特性是对称的读/写存取时间,最快的已达到 55 ns,FRAM 读/写所需的功率也是相同的,大约为 55 mW,FRAM 最突出的性能是高达 100 万亿次的写入寿命。MRAM 的读/写存取时间也是对称的,目前最快的已达到 35 ns,其写入寿命也高达 58 万亿次,它的缺点是读/写和待机状态所需的功率都要比 FRAM 大 20~50 倍,而且 MRAM 对磁场非常敏感,稍微比贴在冰箱表面的冰箱贴大一些的磁性就可破坏 MRAM 中的数据和损坏 MRAM,因此它对使用环境的要求很高,而 FRAM 不会受到使用环境中磁性或其他任何因素的影响,因此 FRAM 的可靠性远比 MRAM 要好。

EEPROM 和闪存的读/写时间是不对称的,它们的读取时间与 FRAM 差不多,但写入时间大约要差一百倍,而且写入时所需的功率也较大,闪存的最大不足是写入寿命只有 10 万次,EEPROM 稍微好一点,但也只有 100 万次。这一性能特点使得 EEPROM 和闪存只适合密集读取而不是密集写入应用,如 PC 的程序存储器以及闪存卡,因此它们与 FRAM 不构成竞争关系。例如汽车的 CD/DVD 播放机,该应用要求每隔 0.3 s 在 FRAM 上记录一次当前唱针所在位置,如果以一天 10 h 计不停地播放音乐,FRAM 至少可以支撑 40 年,而要换作 EEPROM 的话,10 天不到 EEPROM 就到寿命了。

② FRAM 的主要竞争对手是什么? 它在性能和成本上有何优势?

FRAM 的主要竞争对手是 SRAM,因为 SRAM 也允许几乎无限的随机读/写操



作,但 SRAM 是易失性存储器,必须配一个备份电池和控制器以在临时掉电时保持数据。现代 SRAM 的最快存取时间已到 10 ns 左右,但高速 SRAM 的最大不足是所需功率也很高,因此 FRAM 主要用于替代读/写速度差不多的低功耗 SRAM。由于 FRAM 是非易失性的,因此可以省去基于 SRAM 方案中的电池+控制器。尽管成本方面 FRAM 比低功耗 SRAM 方案要高一些,但 FRAM 不仅可以节省有限的 PCB 面积、提供更好的可靠性、提供真正的表面贴装解决方案和无需再担心电池容量何时会耗尽,而且可有效防止潮湿、冲击和振动带来的危害。此外,由于它消除了对会污染环境的电池的需要,整个产品可满足时下越来越严格的绿色要求。

③ FRAM 与非易失性 SRAM 模块和 NVSRAM 相比又有何优势?

为降低分立 SRAM 方案占用更多 PCB 面积的缺点和简化客户硬件设计,现在也有一些供应商(如达拉斯半导体)在提供将低功耗 SRAM 与控制器和电池封装在一起的模块。不过,与这些非易失性 SRAM 模块相比,FRAM 的成本则要低很多。NVSRAM 是另一种值得一提的基于 SRAM 的改进产品,它的原理是在 SRAM 阵列的背后再用其他非易失性存储技术(如 EEPROM 或 Quantum Trap)复制一个相同的阵列,在工作电压正常时,其表现就跟只有 SRAM 一样,掉电时,它只须利用一个外部 68 μF 电容就可实现将 SRAM 中内容复制到对应的 EEPROM 或 Quantum Trap 单元上;电压恢复正常时,再把储存内容恢复到 SRAM 中。NVSRAM 也消除了对电池的需求,但代价是芯片面积更大和需要一个外部大电容,而且储存和恢复内容需时比 FRAM 长。因此,总体来说,FRAM 是替代低功耗 SRAM+电池+控制器的最佳选择。

④ FRAM 目前最大的容量是多少? 限制其容量进一步提高的技术瓶颈是什么?

目前 FRAM 的最大容量是 4 MB,采用了简单的 1T 架构,与 SRAM 的 6T 架构相比,相同容量下它的裸片面积仅是 SRAM 的 1/6。从技术上讲,FRAM 的容量可以想做多大多就做多,目前之所以无大容量 FRAM 提供是因为市场到目前为止还没有这一需求。

⑤ FRAM 目前在中国市场的典型应用有哪些?

FRAM 主要针对这样的一些嵌入式应用:需要频繁写入但存储容量不需很大的,对写入速度和应用环境的要求不是很高,但希望能独立可靠地连续工作几十年而不用管它的。目前它在中国市场的典型应用包括:复费率/单费率电子电表、一部分安装了远程抄表模块的机械电表、电子水表、电子气表、汽车电子(如里程表、CD/DVD 播放器和气囊)、电梯、数控机床、电子钱包、银行卡、公交卡、ATM 柜员机、POS 机、复印机、游戏机、汽车和飞机黑匣子以及电梯。未来它很有潜力的一个应用是铁路运输领域,如用来记录火车站来来往往车辆的轨道和进出时间等参数。

⑥ 为什么以上这些应用需要用 FRAM 来实现?

以电子电表、数控机床和电梯为例,电子电表要求每 3 s 记录一次电脉冲,而且它是不分日夜和节假日地工作的,如采用 EEPROM 来记录,50 天不到就超过了 EE-

PROM 的最大写入寿命,而 FRAM 工作 100 年也远不到其写入寿命。数控机床也一样,它需要几十毫秒就记录一次车/铣头的位置,一旦发生紧急掉电事件,当重新上电时,车/铣头需要按照掉电前的车/铣轨迹退回到起始位置,再从起始位置按照先前的轨迹前进到掉电时的位置继续原来的工作,而 FRAM 能够很好地完成这么频繁地写入操作和快速持久数据保持任务。电梯也一样,SRAM+电池+控制器的方案现在基本上很少采用了,它的维护成本较高,因为不知道什么时候需要换电池。现在不少客户开始采用 SRAM+超级电容和 NVSRAM 的方法来实现,但这两种方法有一个缺陷,即超级电容和外接大电容的电压最多只能维持 2~3 天,一旦遇上春节或国庆七、八天长假,存储在超级电容和 NVSRAM 中的数据就无法维持,这意味着长假后必须请电梯原厂的技术人员过来对电梯工作参数重新做一次设定,这也意味着很高的维护成本和更多的不便。而解决方法只有两个,一是放假期间电梯的电源系统不能停电,而这意味着电能的浪费;二是采用 FRAM,万事皆无。

1.2 FRAM 的基础知识

德州仪器在其标准的 130 nm 铜互连工艺中添加了两个额外的掩模步骤,用来创建嵌入式 FRAM 模块。通过转向 130 nm 工艺,将使用目前最小的商用 FRAM 单元(仅 $0.71 \mu\text{m}^2$),提供 Ramtron 的 4 MB FRAM 存储器,并且获得较 SRAM 单元更高的存储密度。为了实现这种单元尺寸,该工艺使用了创新的 COP(capacitor-over-plug)工艺,将非易失性电容直接堆放在 W 型插入晶体管触点之上。FRAM 存储器将易失性 DRAM 的快速存取和低功耗特点与不需要电能保存数据的能力结合起来。EEPROM 和闪存等其他非易失性存储器由于必须以多个掩模步骤、更长的写入时间及更多的功耗来写入数据,因此对于嵌入式应用不太合适。此外,FRAM 的小单元尺寸和增加最少的掩模步骤特点,使得面向嵌入式应用的 FRAM 可以低于 SRAM 的成本生产。FRAM 所消耗的功率亦较 MRAM 低很多,并且已在要求严格的汽车、测量、工业及计算等应用中实现商业化应用。FRAM 具有快速存取、低功耗、小单元尺寸以及实惠的制造成本等特点,这意味着它应用广泛。对于那些需要低功耗、非易失性存储、关机前快速数据保护以及无限写入耐久性等系统而言,将从 FRAM 的功能中获益良多。

1.2.1 FRAM 物理效应

FRAM 技术的核心是将微小的铁电晶体集成进电容内,使得 FRAM 产品能够像快速的非易失性 RAM 那样工作。通过施加电场,铁电晶体的电极化在两个稳定状态之间变换。内部电路将这种电极化的方向感知为高或低的逻辑状态。每个方向都是稳定的,即使在电场撤除后仍然保持不变,因此能将数据保存在存储器中而无须定期更新。德州仪器利用 COP 方式制作了平面型 FRAM 单元,将单元的面积降至最小,并且利用铌电极和锆钛酸铅(PZT)铁电薄膜层来形成铁电电容。图 1.1 为铁

电 FRAM 的结构图。

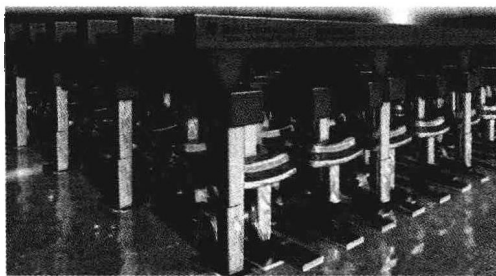


图 1.1 铁电 FRAM 的结构

铁电存储器技术和标准的 CMOS 制造工艺相兼容。铁电薄膜被放置于 CMOS 基层之上,并置于两电极之间,使用金属互连并钝化后完成铁电制造过程。采用锆-钛层来形成一个能够为每个数据位存储相应磁极性的电容,去电后每个状态仍然保持在稳定状态,这个结构只需要增加两个加工步骤:PZT 和顶层电极。铁电晶体剖析图如图 1.2 所示。图 1.3 为 FRAM 的层面结构图。

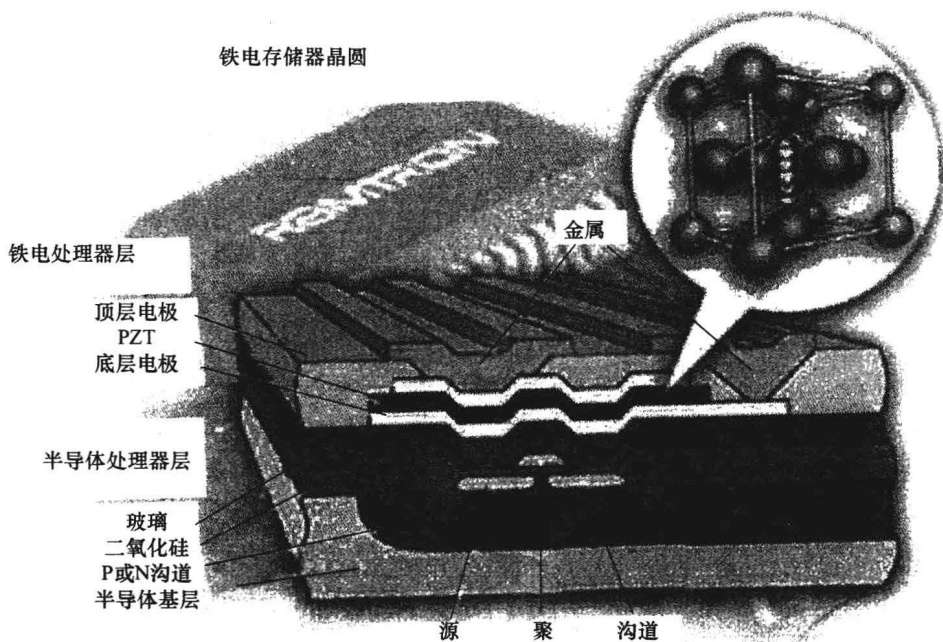


图 1.2 铁电晶体剖析图

Ramtron 公司的铁电存储器技术发展到现在已经相当的成熟。最初的铁电存储器采用两晶体管/两电容器(2T/2C)的结构,如图 1.4 所示,导致元件体积相对过大。最近随着铁电材料和制造工艺的发展,在铁电存储器的每一单元内都不再需要配置标准电容器。Ramtron 新的单晶体管/单电容器结构可以像 DRAM 一样,使用单电

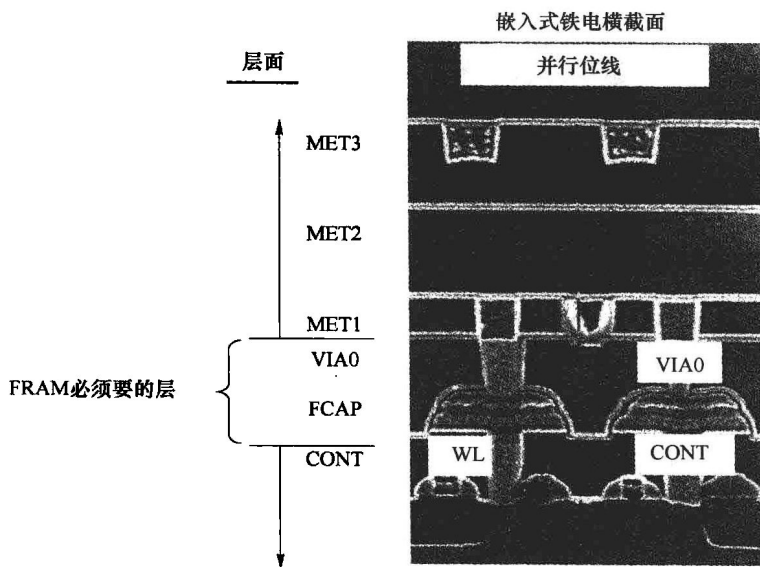


图 1.3 FRAM 层面结构

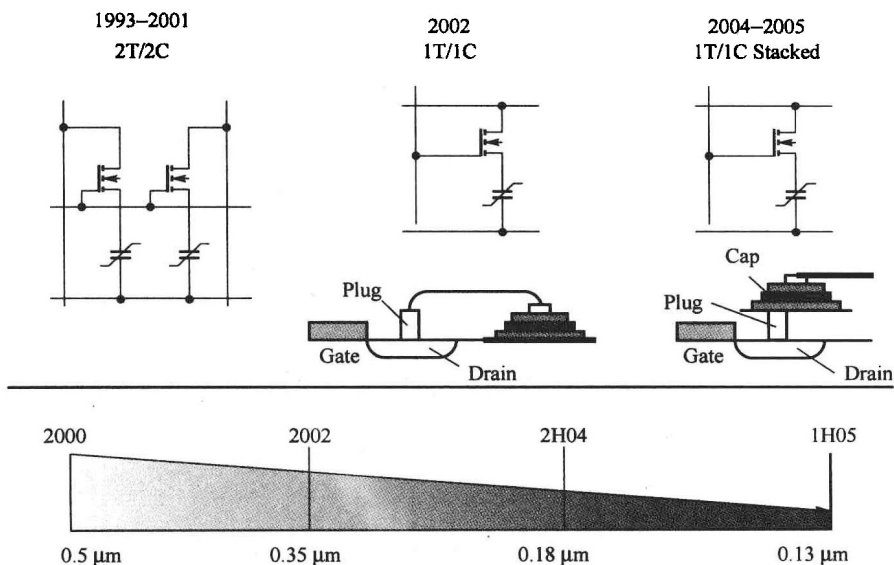


图 1.4 铁电工艺结构

容器为存储器阵列的每一列提供参考。与现有的 2T/2C 结构相比,它有效地把内存单元所需要的面积减少一半。新的设计极大地提高了铁电存储器的效率,降低了铁电存储器产品的生产成本。

Ramtron 公司同样也通过转向更小的技术节点来提高铁电存储器各单元的成本效率。最近采用的 $0.35\ \mu\text{m}$ 的制造工艺相对于前一代 $0.5\ \mu\text{m}$ 的制造工艺,极大地降