

新型非易失性存储器

陈怡然¹ 赵巍胜² 孙振宇³ 章尧君¹

(1 匹兹堡大学 15260; 2 北京航空航天大学 100191; 3 美国博通公司)

1. 引言

存储器是计算机系统的重要组成部分。按照在存储体系中的位置不同,存储器可以简单地分为片上内存、主存和硬盘三种类型。与此相对应,静态存储器(SRAM)、动态存储器(DRAM)和磁盘各自成为实现这三种主要存储类型的传统技术。在过去的近40年里,这三种技术取得了巨大的技术和商业成就。除磁盘外,静态存储器和动态存储器的制造都依赖于半导体集成技术。尽管这两种技术的具体实现各有不同,但是它们有一个共同的特性:都依赖于电荷在半导体器件上的积累与释放实现数据的存储。比如在动态存储器里,以电荷进行充电代表逻辑1,放电代表逻辑0。在静态存储器里,这一过程是通过对于晶体管的寄生电容进行充放电来实现。近些年来得到广泛应用的固态存储——闪存也是通过对于晶体管浮栅(Floating Gate)上电荷的捕获与释放来进行数据的存储。随着制造工艺水平的不断提高,半导体纳米器件的尺寸持续缩小,所有以上传统存储器件上所能存储的电荷总数也随之减少,带来了比较严重的可靠性问题:第一,漏电流变得更高;第二,电荷总数的微小扰动会带来相对更大的影响。实际上,除了利用电荷存储这一机制本身的固有局限性,传统主流存储器在纳米级尺度下的加工本身以及克服加工过程中的工艺扰动也是非常大的挑战。

在功能上,静态存储器与动态存储器同属于“易失性存储器”类别。其特点是当断开供电电源后,在存储器上所存储的数据将会消失并无法恢复。尤其在动态存储器的设计中,电容上的电荷会随着存储时间的增长而逐渐漏掉。因此,所存储的内容需要周期性地被刷新。静态存储器虽然不需要刷新这一操作,但是其存储单元包括六个以上晶体管,存储单元的面积通常很大(约为动态存储器单元的20倍),而且其漏电流也相当的严重。闪存则属于“非易失性存储

器”类别,其上存储的数据在供电电源断开后将会保留相当长的一段时间。在性能上,前两种存储器的读取都在纳秒量级,而闪存的读取则在百微秒甚至毫秒量级。在读取方式上,静态存储器与动态存储器均可以实现随机存储,例如,任意读写某一个或者某几个存储器单元。闪存则不同,虽然其存储密度很高,但是其读取操作必须以“页”为单位进行(指NAND Flash)。而且,闪存的内容更新不能通过直接覆盖原有内容来实现,而是必须要写到一个新的已擦写的页上。此外,闪存的可支持的最大读写次数也极其有限,通常在千次到百万次之间。

传统存储器的技术局限以及不断缩小制造工艺尺寸所带来的巨大挑战促使科研人员开始寻找新一代的存储器件。“万能存储器”的概念作为新一代存储器的具体要求被提出来。人们希望找到某种存储器具有接近:1)静态存储器的纳米级的读写速度;2)动态存储器甚至是闪存级别的集成密度;3)类似闪存的非易失性存储特性。尽管至今为止,这样的存储技术还没有完全实现。但是一些非常有前途的新型存储器件已经被开发出来,甚至有部分已经进入到产品化阶段。在本文接下来的部分,我们将着重介绍三种最具有代表性、也是普遍认为最有前途的三种存储器:相变存储器、磁性存储器,以及阻性存储器。

2. 相变存储器

在所有可以被归类为新型存储器的技术当中,相变存储器可能最接近商业实用。如图1所示,相变存储器所使用的相变材料可以在一定条件(譬如加温)下在晶相与非晶相之间产生相变。而当相变材料处于非晶相时,相变材料内部各种原子排列呈不规则状态,材料表现出高阻值、低光学反射系数等特点;相反的,当处于晶相时,各原子排列规则,材料表现出低阻值、高光学反射系数等特点。不同的阻值和光学反射系数可以用来存储不同的数据,例如0和1。

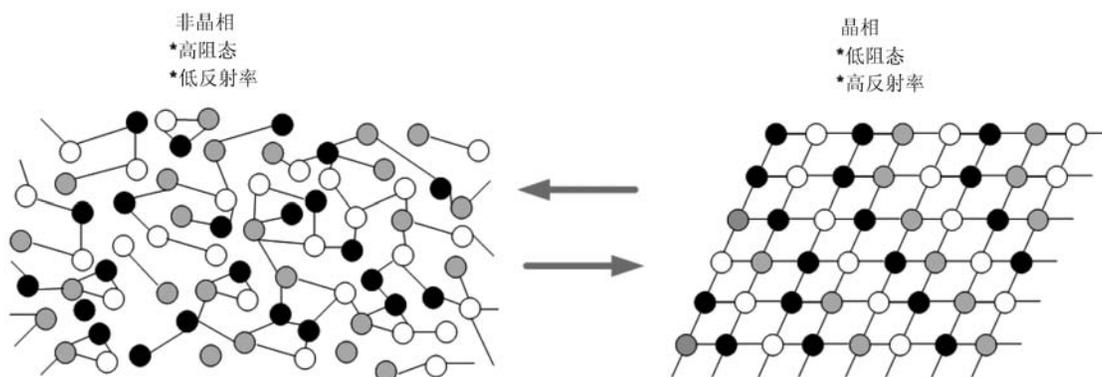


图1 相变材料在晶相与非晶相之间的相变

相变存储器单元的横截面图如图2所示。相变材料（例如硫系玻璃）层夹在两电极层中间。一个加热器件（通常是电阻）则生长在底电极和硫系玻璃（图中多晶硫）层中间。相变存储器的写操作主要分为两种：设置（SET）和重置（RESET）。如图3所示，在设置操作中，一个不大但是持续时间较长的电流通过加热器件产生高温，提高硫系玻璃层的温度。当硫系玻璃层的温度提高到晶化温度之上（ T_x ）时，硫系玻璃层则逐渐晶化。设置电流通常要持续足够长的时间（ t_2 ）使得器件温度保持在快速结晶化的范围从而促使结晶化。当设置操作完成后，相变存储器单元将保持低阻态。在重置操作中，一个大但是持续时间较短的电流通过加热器件将硫系玻璃层的温度提高到熔点之上。材料的结晶态逐渐消失并回复到非结晶态。当重置脉冲快速结束，相变材料将通过淬火过程被冻

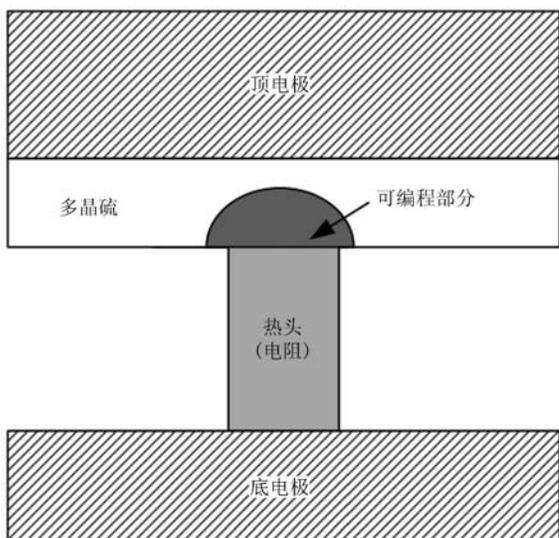


图2 相变存储器单元的横截面

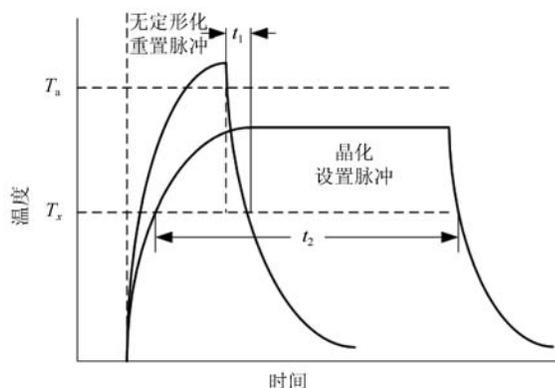


图3 相变存储器单元的写操作

结在无序状态。整个器件表现出高阻状态，整个非晶态部分呈现出“蘑菇”状。这种高低阻值的变化在相变存储器的设计中可以通过半导体电路读取出来。

尽管相变存储器经常被归类于“新型存储器”，“相变”这一概念本身可以追溯到大约50年前。1962年，皮尔森（A. D. Pearson）等率先发现碲砷（As-Te）玻璃存在相变现象。1968年，奥什斯基（S. R. Ovshinsky）在一篇文章里描述了某些半导体材料可以在电场作用下与阻性和导电两种不同状态间相互快速转换（ $\sim 10 \mu\text{s}$ 量级）。这一发现直接导致了其后大量基于碲砷锗硅合金材料（后称之为 Chalcogenide，或硫系玻璃）的薄膜相变现象的研究。1970年，尼勒（R. G. Neale）和摩尔（G.E. Moore）演示了世界上第一个256比特相变存储器。值得一提的是，摩尔后来以提出著名的半导体技术发展的“摩尔定律”——晶体管的集成密度每18个月翻一番闻名，并担任过英特尔公司的首席执行官。在这之后，基于相变材料的半导体存储器的研究由于材料和功耗等问题逐渐减

缓下来。相变材料反而在可擦写光盘（例如 CD-RW/DVD-RW）中得到了极为成功的应用。

在 20 世纪末，人们发现了某些晶化材料诸如锗碲-锑碲合金（GeTe-Sb₂Te₃，或缩写为 GST）以及掺杂锑碲合金（In-doped Sb₂Te，或缩写为 AIST）可以在 100 ns 左右结晶化。这一速度比现有的非易失性存储器例如闪存要快上千倍。相变存储器的开发又重新进入加速状态：1999 年，奥什斯基创建了名为“Ovonyx”的公司。2002 年，作为 Ovonyx 公司和英特尔公司合作的第一个成果，基于 180 nm 3 V CMOS 工艺的 4 M 相变存储器的测试芯片被开发出来。从此之后，相变存储器的容量一再被刷新，并逐渐进入商业应用。

相变存储器作为最有前景的新型存储器之一，可以被嵌入于存储架构的各个层级。由于相变存储器与动态存储器的相似性，尤其是更好的功耗表现和拓展性使得它曾被认为是动态存储器的最好替代者。但是相变存储器有两个比较大的缺点。第一是它的有限的擦写次数（通常情况下仅为 10⁷ ~ 10⁸ 次）。如果擦写次数超过了这个极限，存储单元的寿命将会终结，器件也不能再被使用。第二个缺点是有限的写速度。相变存储器的写速度比动态存储器慢 6 ~ 10 倍。尽管如此，相变存储器在一些领域仍然有着很好的应用前景。最新的一些相关研究提出各种方法来克服这两大缺陷。再比如，通过体系结构的方法来补偿写的性能带来的损失，能极大地减少功耗，从而加速相变存储器作为计算机主存储器的商业化。

最后值得一提的是，多层单元技术在相变存储器上得到了成功实现。在多层单元相变存储器设计中，2^N 个阻态被分别用来表示 N 个数位。例如，在 2 比特多层单元相变存储器中，00、01、10、11 可以分别用 4 个不同的阻值来表示。在具体设计当中，相变材料的阻值可以通过调整写入电流 / 电压的幅度和时间长度来进行调节。

3. 磁性存储器

在磁场作用下固体的电阻发生变化，称为磁电阻。

铁磁性金属在常温下的磁电阻较大，利用铁磁性金属的磁电阻（称为各向异性磁电阻 AMR）制成的传感器和磁性存储器 20 世纪已在计算机等方面获得应用。

1986 ~ 1988 年法国的阿尔贝·费尔（Albert Fert）教授和德国的彼得·格林贝格（Peter Grünberg）研究员发现由分子束外延技术制成的交替的铁磁层和非磁金属层组成的纳米多层薄膜具有比 AMR 大得多的磁电阻，定名为巨磁电阻（GMR）。他们理解到 GMR 可能的应用前景，但分子束外延技术制成的多层膜难以付诸实用。不久，帕金（Stuart Parkin）等人的进一步研究发现用溅射技术制成的（铁磁 / 非磁金属 / 铁磁）三层膜在常温下具有比单层铁磁金属大得多的巨磁电阻，称为自旋阀，开辟了 GMR 实用化的道路。

2007 年度诺贝尔奖颁给了费尔教授和格林贝格研究员。GMR 的发现和研发，导致了高密度磁盘中高灵敏读头的实现，促进了整个现代硬盘工业的发展。自旋阀传感器在硬盘阅读磁头中最早的应用是在 IBM Deskstar 16GP Titan 中，该产品于 1997 年发布，拥有 16.8 GB 的存储容量。2007 年，日立公司推出了 Deskstar 7K1000，这是第一个 1 TB 硬盘驱动器。如今，日立 Deskstar 7K3000 型号硬盘的存储容量更是达到了 3 TB。

1996 年，斯朗却夫斯基（Slonczewski）和伯格（Berger）各自独立预言了自旋转移效应：纳米尺寸的磁性薄膜结构的磁化方向在自旋极化电流的作用下可以翻转，而不需要外加磁场。如图 4 所示，当电流通过被非磁隔离层隔开的两个铁磁层时，电流在经过第一个铁磁层（又称钉扎层）时，自旋方向与钉扎层磁化方向相反的电子被反射的数目显著高于自旋方向与钉扎层磁化方向相同的电子中被反射的数目。因此，电流会被自旋极化并在穿过隔离层后继续保持这一极化特性。当到达另一铁磁层（又称自由层）时，极化电流所产生的自旋角动量转移矩可以在铁磁层中产生磁激发，使自由层的磁化方向翻转。这一过程被称为自旋转移。当电流足够强并且持续的时间足够久时，就会导致自由层磁化方向翻转到与钉扎层一致。相反

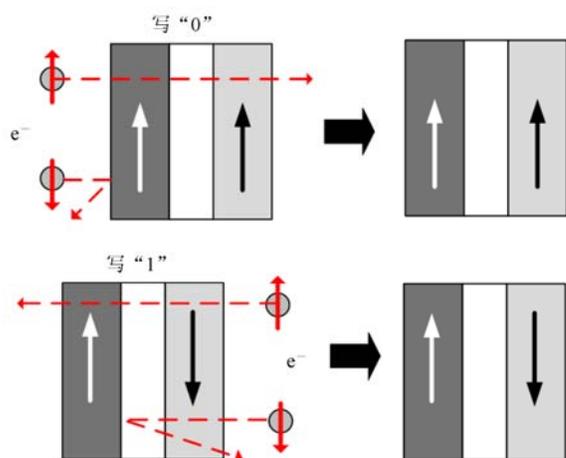


图4 自旋转移力矩存储器的基本原理

地，如果电流首先经过自由层，在钉扎层表面反射回的电子具有与钉扎层磁化方向不同极化方向并将自由层的磁化方向翻转与钉扎层相反。通过以上的过程，我们可以通过电流使磁化反转以改变此类器件的阻值，以代替体积较大的磁化磁场线圈。从而实现磁性存储器的微型化。

与外加磁场相比，自旋转移这一现象将磁化方向改变这一过程局限在器件本身。随着器件尺寸的减小，翻转电流的大小也相应随之减小。这就为此类存储技术的进一步工艺微缩提供了理论基础。而由两个铁磁层和一个隔离层（通常为氧化镁或者氧化铝）所组成的器件被称之为磁性隧道结（MTJ）。所加电流密度越大，磁性隧道结翻转的速度也就越快。理论上，电流驱动引起的磁性隧道结磁化翻转所需要的本征电流密度 J_{c0} 可以表达为：

$$J_{c0} = 2e\alpha M_s t_F (H + H_k + 2\pi M_s) / \hbar \eta \quad (1)$$

其中， H 是加在易轴方向的磁场， M_s 和 t_F 分别是自由层的磁化方向和厚度。 α 是阻尼常数， H_k 是等效各向异性场，包括磁晶各向异性和形状各向异性。自旋转移效率 η 是有关电流极性、自旋极化，以及自由层和钉扎层的磁化方向间夹角等参数的函数。

(1) 式说明本征翻转电流密度 J_{c0} 的降低可以通过调节材料和磁各向异性参数（例如改变 M_s 、 α 、 η 等）来实现。也可以通过改变磁性隧道结和自由层的结构（例如 t_F 等）来实现。但是，磁性隧道结的热稳定性

系数 $\Delta = H_k M_s V / 2K_B T$ 。其中 V 是自由层的体积， K_B 是玻尔兹曼常数。 T 是绝对温度。所有以上这些降低本征翻转电流密度的办法都会显著降低磁性隧道结的热稳定性系数，从而影响信息存储的稳定性。

(1) 式还表明本征翻转电流密度实际上主要由薄膜易面各向异性 $4\pi M_s$ 所决定（大于 10K0e）。 H_k 的强度通常仅在几百 Oe。因此，一个有效降低本征翻转电流密度同时又不影响磁性隧道结热稳定系数的方法是采用具有垂直各向异性的自由层。在这种情况下，自由层的磁化方向垂直于薄膜表面，(1) 式右边的 $2\pi M_s$ 项将不复存在。 H_k 变为有效垂直各向异性 $H_k^\perp = H_k^\perp - 4\pi M_s$ 。因此，热稳定性系数保持不变，本征翻转电流密度 J_{c0} 显著下降。垂直隧道结已经成为近来自旋存储器的研究热点。

自旋电子学的研究已经从简单的巨磁阻自旋阀器件伸到磁性随机存储器（MRAM）以及用于自旋逻辑应用的自旋注入器等其他新型存储技术。比如近年来热门赛道存储器就是一种由帕金在 2004 年提出的与磁性随机存储器截然不同的非挥发存储器技术。赛道存储器利用自旋定向电子的电流沿着磁性赛道——纳米级磁线——“移动”磁区存储信息。如果赛道存储器技术可以最终成熟，它将提供比闪存更高的存储密度，甚至有可能取代现有的磁盘驱动器。

4. 阻性存储器

阻性存储器一词通常用来表示除磁性存储器和相变存储器之外的其他利用电阻变化来存储数据的存储器。因此，阻性存储器的工作机理与实现方式非常多样。近些年来，阻性存储器主要用来指金属-绝缘体-金属（MIM）的三明治结构。其中数据以绝缘体的不同电阻值来表示。

阻性器件电阻包括两种基本翻转行为方式：双极型翻转和单极型翻转。如图 5 所示，在双极型翻转机制下，阻性器件电阻从高到底和从低到高分别通过在阻性器件上施加不同方向的电场来实现；在单极型翻转机制下，阻性器件电阻的两个方向的变化都是通过某一固定方向施加电场来实现，只是具体所加强的

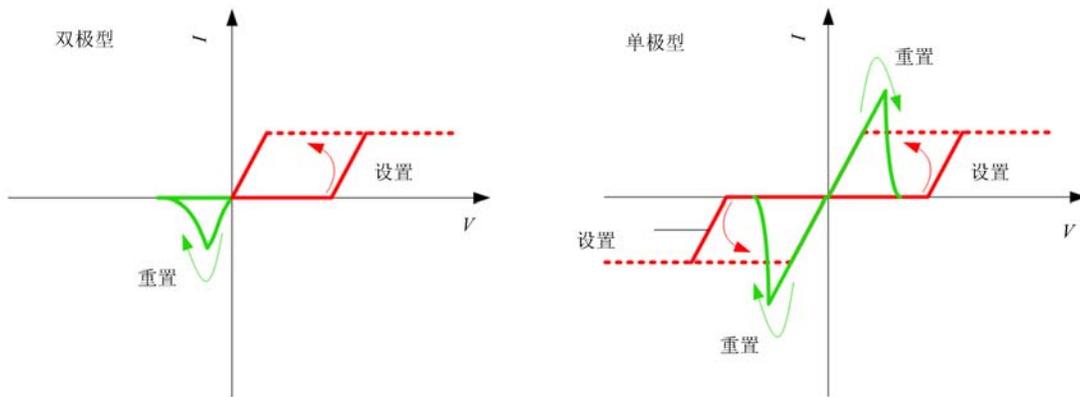


图5 双极型翻转与单极型翻转

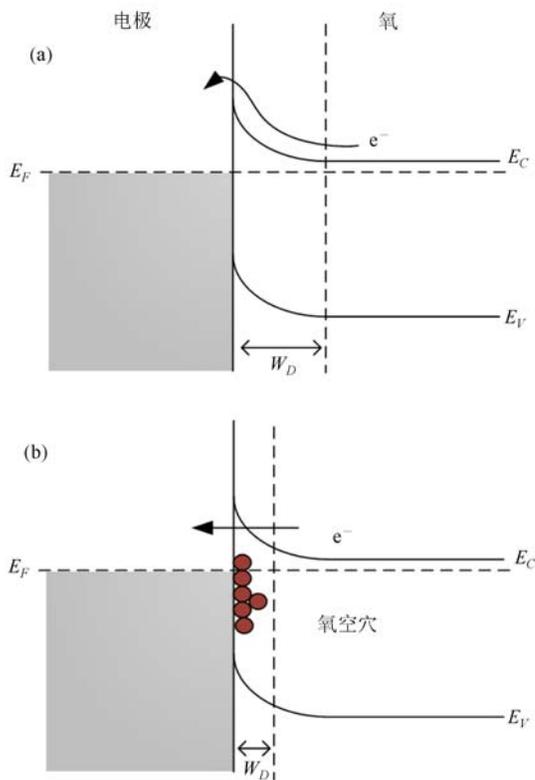


图6 离子扩散模型

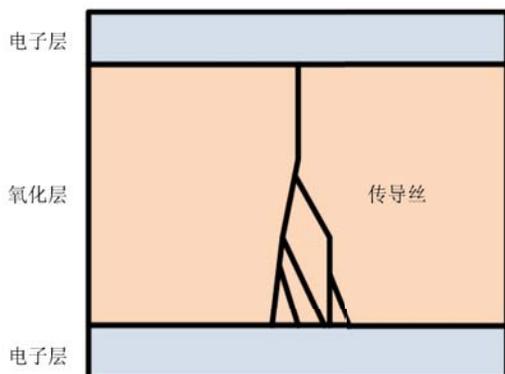


图7 丝状传导模型

度与时间长短不同。

物理学界至今还没有就阻性存储器的存储机制模型达成一致意见。由于篇幅所限，这里仅介绍有关绝缘体阻值变化最主要的两种解释：离子扩散和丝状传导。这两种解释分别和以上两种不同的阻值翻转方式相对应：离子扩散模型认为双极型翻转机制下，当电压施加在阻性器件上时，带有正电荷的氧空穴移动会带来内部电场的漂移。如图6所示，内部电场的变化会导致在电极表面耗尽层的厚度变化，从而引起电极表面形成的肖特基势垒的接触电阻的稳定变化。丝状传导模型则认为，单极型翻转机制下的阻性器件变化是由于氧化层中传导丝（通常为5~10 nm）的形成和破裂造成的，如图7所示。在很多的氧化材料中，研究人员都观察到了可以用来实现多层单元设计的多级阻态，例如 WO_x 等材质。一般来说，基于丝状传导机制的阻性器件的高阻态通常与电子层面积无关，而其低阻态则与传导丝的数目或者制造工艺有关。对于不同的材料，阻态的数量和大小并不相同。

虽然MIM的概念比较简单，但是要全面地进行综述是非常困难的。这是因为有太多的材料可以表现出电阻翻转特性。电阻翻转特性不光依赖于氧化材料而且依赖于材料电极和界面特性。近来的一些综述性工作，包括瓦斯(Waser)、萨瓦(Sawa)和秋永(Akinaga)都很好地对不同种类的阻性存储器进行了概述和有用的分类。从2004年三星展示了NiO存储器件开始，阻性存储器的研究和发展越来越受到关注。在2004年发表的文章中，三星不光展示了NiO器件与0.18

μm 工艺的互补金属场效应半导体 (CMOS) 组合形成晶体管-电阻 (1T1R) 的结构, 而且对于阻性存储器进行了包括对非挥发性, 耐写性, 编程特性等的全面讨论。阻性存储器不光可以用作独立的高容量存储, 而且同样适合嵌入式应用: 除了拥有比闪存更低的编程电压以及动态存储器没有的非挥发性之外, 阻性存储器还拥有足够高的可擦写次数。除了嵌入式应用, 可重新配置逻辑也是阻性存储器的一个新应用。一些文献提出了 CMOS- 纳米混合可重新配置在线可编程门阵列 (FPGA) 结构以及基于 3 维 FPGA 的阻性存储器件。利用阻性存储器实现神经元设计也逐渐成为半导体电路研究中的新热点。

5. 三种新型非易失性存储器的基本性能比较

基于不同的工作原理, 本文介绍的三种新型存储器体现出非常不同的电学特性。表 1 给出三种非易失性存储器基本性能的比较:

表 1 存储器科技性能比较

	保持时间	写入/擦除时间	读时间	单元面积	写入/擦除次数
相变存储器	大于 10 年	小于 50 ns	12 ns	4F^2	10^8
磁性存储器	大于 10 年	小于 10 ns	$5 \sim 10\text{ ns}$	8F^2	10^{15}
阻性存储器	大于 10 年	小于 10 ns	$5 \sim 10\text{ ns}$	$<1\text{F}^2$	10^{15}

表中可以看出, 磁性存储器和阻性存储器的性能相对比较接近, 在一定程度上优于相变存储器, 但是相变存储器在其中却是最早进入产品化, 也是最接近商业实用的技术。

6. 结束语: 新型存储器的发展新趋势

由于篇幅所限, 我们只能有选择的介绍几种新型存储器。除了本文介绍的三种存储器之外, 铁电存储器、量子点存储器, 甚至一些基于生物材料的存储器, 都有不少学者在研究。相比于传统存储器, 所有这些正在研究的新型存储器有以下几个显著特点: 1) 均为非易失性存储; 2) 读写性能均在纳秒级; 3) 存储机制受器件尺寸的限制小; 4) 存储性能和可靠性受工艺扰动的影响低; 5) 可实现多单元存储, 从而大大提高存储密度。虽然这些新型存储器的研究与开发现在还存在着一些工艺上的问题需要解决, 但是很多已经非常接近工程实现, 比如相变存储器和磁性存储器 (自旋转移力矩存储器)。许多大公司也已经开始了实用化的初步尝试。相信在不远的将来, 我们就能看到这些新型存储器中的某些在计算机以及存储系统中的广泛应用!

新书推荐

《粒子物理导论》简介

杜东生和杨茂志合著的新书

《粒子物理导论》已经于 2015 年 1 月出版。

该书着重介绍粒子物理的基础知识, 同时也尽可能的介绍了粒子物理前沿的研究进展和新的实验结果。书中从对称性出发相继介绍了强子的夸克模型、电磁作用和弱相互作用、弱电统一理论、量子色动力学、中微子振荡、超出标准模型的各种新模型, 如大统一理论, 超对称和超引力, 以及超弦和膜理论等内容。书中对中性介子 K、B、D 介子的混合及弱衰变过程的 CP 不守恒做了详细讨论。为了满足读者科研中具体计算的需要, 书中还给出了弱电统一理论的 R_ξ 规范下的费曼规则。在量子色动力学部分, 详细讨论了重整化和各种减除方案, 对粲偶素和底偶素、部分子分布函数及其应用、胶球和混杂态等也做了介绍, 对读者掌握量子色动力学 (QCD) 理论及其应用十

分有用。

该书在很大程度上填补了国际和国内已出版的同类书的空白。此书适合于物理系高年级本科生、研究生、青年教师, 以及粒子物理 (高能物理) 实验和理论研究人员阅读。

(卞吉)

