

第一章 绪论

1.1 引言

伴随着人类社会的发展,信息的记录和传递从甲骨文到竹文,从绢帛到纸张,从人工手写到各种智能电子产品的开发而不断地进步。当时间进入到 21 世纪,这个被誉为数字化信息的时代后,飞速发展的信息技术已经成为人们生活的重要组成部分。地铁上听着 ipod 的青年,玩着 PSP、用着 3G 手机的白领已经形成了大都市早晚高峰期时的独特风景线。

这一切的出现都与半导体技术,尤其是半导体存储器的出现与发展密不可分。据美国半导体工业协会(SIA)公布的数据,即使在 2008 年全球金融风暴的影响下,全球各行业销售额大幅萎缩之际,半导体行业的销售额依然达到 2619 亿美元。作为一个新兴的半导体生产和潜在的消费大国,中国半导体存储器的的发展也十分迅猛;由于国家的高度重视和大力支持,半导体工业已经在我国国民经济中占据了越来越重要的地位。同时,作为世界上潜在的最大的半导体消费市场,任何一家半导体公司都必须把中国放在不可忽视的地位。图 1.1 给出了近些年和未来几年中国大陆半导体市场的销售额和增长情况与预测。据市场研究机构 iSuppli 调查显示,2008 年中国半导体销售额达到近 740 亿美元,并将在未来长期内继续保持可观的增长势头。

从上世纪 60 年代起,随着金属-氧化物-半导体(MOS)技术的飞速发展和高度成熟化,MOS 型存储器得到了长足的发展。但随着信息的高度发展,存储器的发展速度已经不能满足其需求,也促使世界各大半导体厂商,一方面致力于成熟存储器的大容量、高速化、低压低功耗化;另一方面根据需要在原来成熟存储器如 DRAM、SRAM 和 Flash 基础上开发各种新型存储器,如 FeRAM、MRAM 和 PCRAM 等。

表 1.1 给出了这几种被看好的新型存储器的性能比较,可以看到相比其他各种存储器,PCRAM 拥有更优越的综合性能,作为非易失性存储器,它不仅具有相当高的循环擦写能力、优越的数据保持能力,而且擦写速度快、功耗低。更值得期待的是当工艺生产节点进入 45 nm 以下时,DRAM、SRAM 等目前最

成熟的存储器技术将无法突破技术瓶颈，但 PCRAM 的优势却能更大程度的发挥出来。在应用上，除了便携式设备外，PCRAM 还可作为固态存储器应用到个人电脑中，甚至可能具有内存的功用。因此，PCRAM 有着十分广阔的市场前景，被广泛看好^[1]。

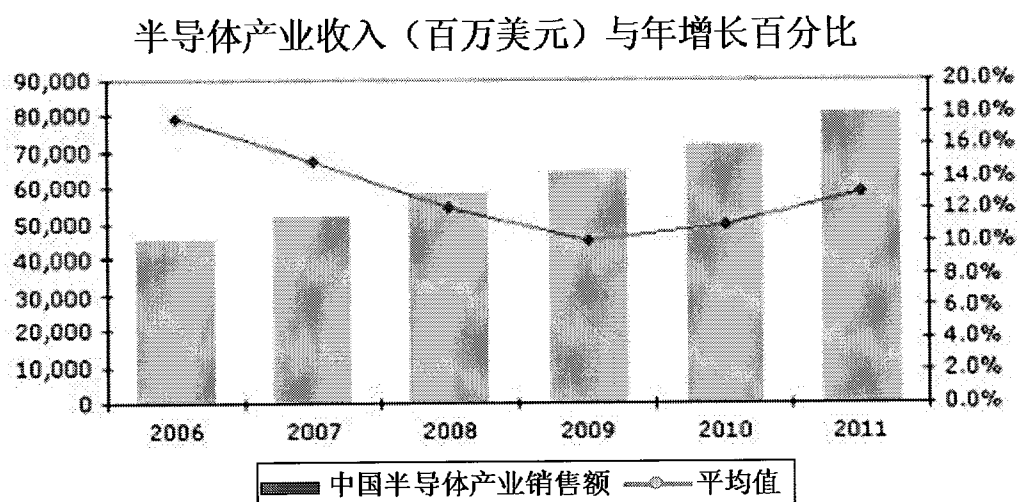


图 1. 1 2006-2011 年中国半导体市场销售额和增长率预测。

表 1.1 各种存储器的性能比较^[1]

性能	SRAM	DRAM	FLASH	MRAM	FeRAM	PCRAM
尺寸	50-80 F^2	6-12 F^2	7-11 F^2	>20 F^2	>20 F^2	5-8 F^2
非易失性	否	否	是	是	是	是
写/读次数	不限/不限	不限/不限	10^6 /不限	10^{12} /不限	10^{12} / 10^{12}	10^{12} /不限
读过程	部分破坏	破坏性	非破坏性	非破坏性	破坏性	非破坏性
功耗	中等	中等	高	中等	中等	低
写/擦/读时间	8ns/8ns	50ns/50ns	1 μ s/1-100ms	30ns/30ns	80ns/80ns	10ns/50ns
与 CMOS 的兼容性	好	差	可以	?	可以	好
多级存储	否	否	是	否	否	是
成本	高	低	中等	?	高	低
抗辐照性	1MRad	<50kRad	<30kRad	1MRad	1MRad	1MRad

正因为 PCRAM 具有如此诱人的性能, 国际各知名半导体公司争先开展 PCRAM 的研发。据市场调研机构 IC Insights 统计, 市场排名前十的厂商中已有 5 家开展了 PCRAM 的研发, 如表 1.2 所示, 其中以 Samsung、Intel 和 ST 尤为重视, 他们均将 PCRAM 列为公司发展规划的重要组成部分, 并取得了相当喜人的成果。

表 1.2 2008 年全球半导体厂商销售额排名及已开展 PCRAM 研究的公司(带*号)

排名	公司	总部	2008 年销售额 (亿美元)
1	Intel*	美国	344.9
2	Samsung*	韩国	202.7
3	TI	美国	119.7
4	Toshiba*	日本	110.6
5	TSMC*	中国台湾	105.6
6	ST*	欧洲	90.5
7	Renesas*	日本	70.2
8	Qualcomm	美国	64.8
9	Sony	日本	64.2
10	Hynix*	韩国	61.8
11	Infineon*	欧洲	59.7
12	AMD	美国	58.1
13	NEC	日本	57.3
14	Micron*	美国	56.9
15	NXP*	欧洲	53.2
16	Freescall	美国	49
17	Broadcom	美国	45.1
18	Fujitsu	日本	44.6
19	Panasonic*	日本	43.2
20	Nvidia	美国	36.7

与此同时, PCRAM 相关的专利申请也在近几年内出现了激增的现象, 图 1.2 给出了 1990 年到 2007 年 1 月在美国专利局申请的 PCRAM 专利统计结果。可见, 各公司与研究机构对于 PCRAM 的关注程度已经达到前所未有的高度。

历史的教训表明, 国家和民族半导体行业的发展必须拥有自主知识产权。面对 PCRAM 这一全新存储器的研发, 我们必须抓住这一难得的机遇, 为中国在未来半导体存储器行业中占有一席之地而努力! 事实上, 我国从 2003 年起, 包括中科院上海微系统与信息技术研究所、复旦大学、上海交通大学在内的三

家研究机构与 Silicon Storage Technology (SST) 公司开始联合开展 PCRAM 的研发, 弥补了国内 PCRAM 研发的空白。从 2006 年开始, 中科院上海微系统与信息技术研究所又历史性地与国际第三大半导体代工厂中芯国际集成电路制造(上海)有限公司 (SMIC) 开展合作研发, 大大加速了国内 PCRAM 研发进程。一个个振奋人心的消息也不断传来: 2007 年 10 月, 国内第一个具有良好性能的带有晶体管驱动的 PCRAM 单元成功问世; 2008 年 5 月, 8 英寸硅片生产平台上 PCRAM 相变单元研发成功, 电极尺寸达到 130 nm, 可擦写次数达到 10^6 次; 2008 年 11 月, 16Kb PCRAM 芯片研制成功; 2009 年 2 月, 1 Mb PCRAM 芯片研制成功。预计 2012 年, 我国将实现 PCRAM 的产业化。

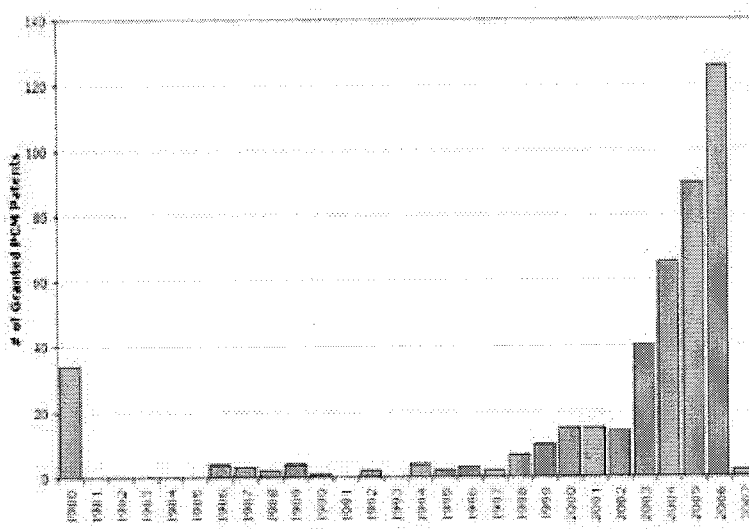


图 1.2 从 1990 年到 2007 年 1 月美国专利局 PCRAM 专利的统计情况。[2]

1.2 半导体存储器概况

半导体存储器可以分为两类: 随机存取存储器 RAM (Random Access Memory) 和只读存储器 ROM (Read Only Memory), 如表 1.3 所示。ROM 的特点顾名思义就是存储器完成后, 只能读取却不能改变。所以, 电源断电后, 其存储信息也不会丢失。ROM 对于重要资料和文件的保存或者定型软件和程序具有广泛的应用市场。根据其操作方式与功能的不同, ROM 又可以分为: 掩膜 ROM, PROM, EPROM, E²PROM 等。

随机存取存储器的特点就是可以随时对其进行读写操作的存储器。根据制备工艺的不同可以分为双极型和 MOS 型。双极性 RAM 具有存取速度快的特点,

但却难以弥补集成度低、功耗大、工艺复杂、成本高的缺陷。而 MOS 型 RAM 却具有集成度高、低功耗、低成本的优势。因此现在凡是芯片密度较高的存储器都采用 MOS 型。根据断电后存储器是否能够数据保存能力，又可将 MOS 型存储器分为以 DRAM、SRAM 为代表的易失性存储器和以 Flash 为代表的非易失性存储器。

表 1.3 半导体存储器的分类

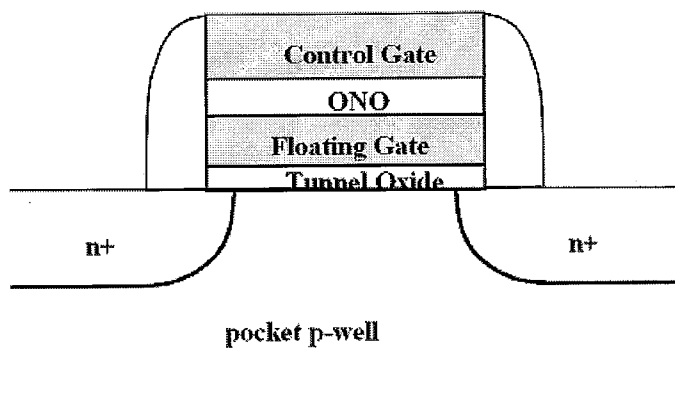
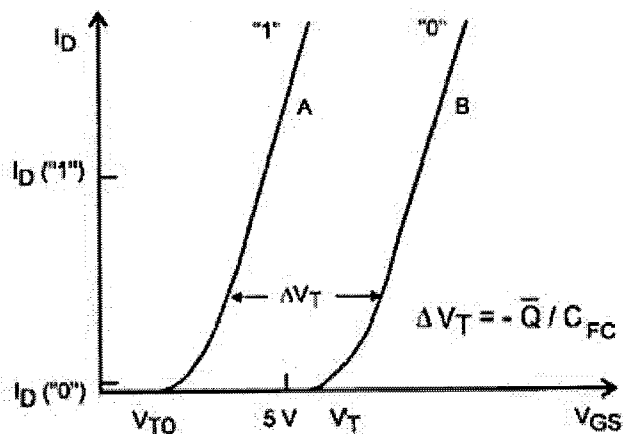
半导体存储器						
读写存储器 RAM			只读存储器 ROM			
双极型	MOS		掩模 ROM	PROM	EPROM	EEPROM
	易失性	非易失性		可编程	可擦可编程	电可擦可编程
	DRAM	Flash				
		PCRAM				
	SRAM	FeRAM				
		MRAM				

DRAM 特点是集成度高，且功耗低。依靠电容存储电荷来保存数据，虽然存取速度快，但是需要定时刷新来保持数据，在突然断电的情况下将无法保存数据。SRAM 则由多个晶体管组成的触发器作为基本存储电路，不需要定时刷新。其存取速度快，但密度低，成本高。作为市场主流的这两种存储器由于自身工艺的限制，均面临在更先进工艺技术节点下无法发展的窘迫境地。

而近年来，非易失性存储器（Nonvolatile Memory）凭借其在断电后依然保持数据不丢失，又能像 RAM 那样及时进行数据擦写的优越特性占据了目前存储器市场的大部分份额，大有取代其他存储器之势。下面将简单介绍主流存储器 Flash 以及 PCRAM 的竞争者 FeRAM 和 MRAM 存储器的工作原理。

1.2.1 Flash 简介

图 1.3 给出的是 Flash 存储器的单元结构，它是由一个带有浮栅的 MOS 晶体管构成的。浮栅上下均被介电质材料隔离，形成电容用来存储电荷。通过控制注入浮栅电荷数量，可以调节 MOS 管的阈值电压 V_T ，如图 1.4。当浮栅中存有电荷时，MOS 管的阈值电压增大，读取电压小于 V_T ，MOS 管关闭，对应于逻辑“0”；当浮栅中无电荷时，读取电压大于 V_{T0} ，MOS 管开启，对应于逻辑“1”。

图 1.3 Flash 存储单元界面示意图^[3]图 1.4 Flash 存储单元 I-V 曲线: A)浮栅中无电荷; B)浮栅中有电荷^[3]

Flash 中,介电层的厚度需要严格控制,否则将影响器件的性能。通常用于隔离浮栅和控制栅的介电质层采用氧化硅—氮化硅—氧化硅(ONO)结构,这样可以增加薄介质层隔离杂质的能力并可提高介质层的介电常数值(5~7, SiO_2 为 3.9)。

经过 20 多年的发展,Flash 是技术最为成熟的非易失性存储器之一,且早已实现商品化。但随着工艺的不断进步,进入 45 nm 工艺节点之后,沟道、浮栅及介电质层的等比例缩小,工艺难度的提高将使 Flash 面临极大的挑战,甚至达到极限。因此,这也给了其他存储器历史性的发展机遇。

1.2.2 FeRAM 简介

铁电存储技术早在 1921 年就被提出，直到 1993 年美国 Ramtron 国际公司成功开发出第一个 4 Kb 的铁电存储器 FeRAM 产品，目前所有的 FeRAM 产品均由 Ramtron 公司制造或授权。最近几年，FeRAM 又有新的发展，采用了 0.35 μm 工艺，推出了 3 V 产品，开发出“单管单容”存储单元的 FeRAM，最大密度可在 256 Kb。

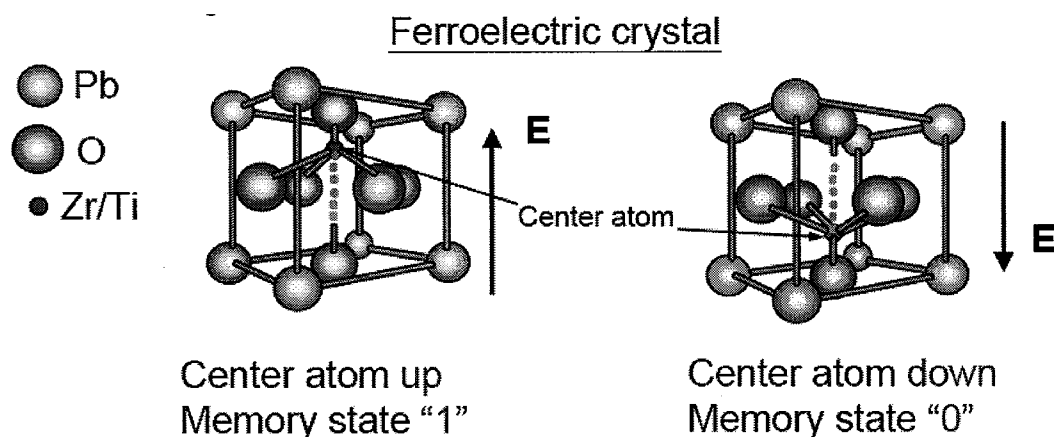


图 1.5 铁电材料晶体结构^[4]

FeRAM 利用铁电晶体的铁电效应来实现数据存储的，图 1.5 给出了铁电晶体的结构示意图^[4]。所谓铁电效应是指在铁电晶体上施加电场时，晶体中心原子在电场的作用下达到一种稳定状态；当电场从晶体移走后，由于高能阶的存在，在没有获得外部能量下中心原子会保持在原来的位置。此外因为铁电效应是铁电晶体所固有的一种偏振极化特性，与电磁作用无关，所以即使断电后，FeRAM 存储器的内容依然可以得到保留，具有非易失性的存储特性。

FeRAM 具有速度快，读写功耗极低的特点；但由于铁电晶体特性的原因，FeRAM 的寿命会受到擦写次数的限制。

1.2.3 MRAM (Magnetic RAM) 简介

磁随机存储器(MRAM)是通过磁化方向的改变来存储数据的，并通过磁阻效应来实现数据的读出^[5,6]。MRAM 的发展与磁阻效应的发展息息相关，从早期的利用率只有 5 % 的 AMR(anisotropic magnetoresistance effect)到后来巨磁阻

效应 GMR(giant magnetoresistance)^[7] 和隧穿磁阻效应 TMR(tunnel magnetoresistance effect)^[8]的相继发现,磁阻效应的利用率已达到 25 %左右,也使得磁存储器的研发进入一个全新的阶段。目前,包括 Motorola, IBM, HP, Infineon 在内的很多国际半导体公司都在积极研究开发磁存储器产品,并已经开发出 1 Mb 的磁存储器。因此,MRAM 将是 PCRAM 今后有力的竞争者。

1.3 相变存储器综述

相变随机存储器(Phase Change Random Access Memory, PCRAM)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^[9,10]。虽然 PCRAM 是一种新兴半导体存储技术,但是它又具有较长历史,这是由于该技术已经被研究了近 40 余年^[11]。但受限于加工技术和存储单元的尺寸要求(纳米尺度),在上世纪后 30 年的时间里,PCRAM 研发的进展非常缓慢。进入 21 世纪后,随着半导体制造工艺的迅猛发展,器件特征尺寸的不断降低,相变材料的尺寸具备了达到纳米量级的可能。同时,由于制备工艺与标准 CMOS 工艺的兼容性,与主流半导体存储技术相比,PCRAM 具有低功耗、高速、高密度、循环擦写次数高等等优越的性能。前面提到的 Samsung、Intel 和 ST 等国际半导体公司都对该技术尤为关注和重视,迅速展开 PCRAM 的研发工作,在最近两年内取得了很大的突破。从此,PCRAM 技术进入了快速的发展阶段。

1.3.1 相变存储器原理

相变存储器(PCRAM)的存储介质是硫族化合物,利用电产生的焦耳热使材料在晶态(低阻)与非晶态(高阻)之间相互转换实现数据的写入与擦除,数据的读出依靠较小的不影响材料状态的直流电压或电流测量电阻变化而实现,如图 1.6 所示。所以,PCRAM 是一种基于电阻的非挥发性存储器,它的操作过程如下:

RESET 操作(晶态向非晶态转变):加一个短而强的脉冲,电能转变成热能,使相变材料温度升高到熔化温度(T_m)以上,经快速冷却,可以使晶态的长程有序遭到破坏,从而实现由晶态向非晶态的转化;

SET 操作(非晶态向晶态转变):加一个时间长且强度中等的脉冲,使相变材料的温度升高到结晶温度(T_x)以上、熔化温度以下,并保持一定的时间,

使相变材料由非晶态转变为晶态；

READ 操作：是通过测量相变材料的电阻值来实现的，此时所加直流电压或电流的强度很弱，使相变材料的温度保持在结晶温度以下，使材料无法发生相变而真实地反映其原有状态。

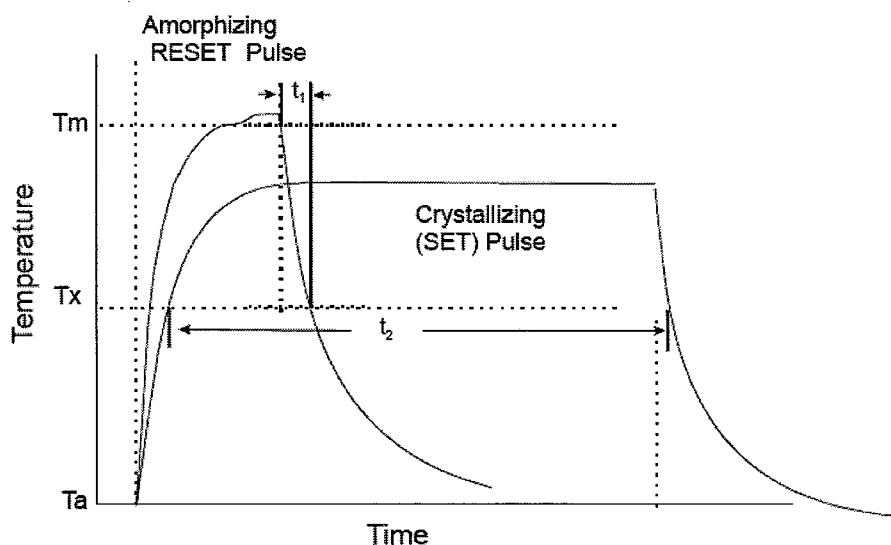


图 1.6 相变过程时间(电流脉宽)-温度关系^[12]: T_a 为环境温度, T_x 为结晶温度, T_m 为融化温度, t_1 为 RESET 脉冲脉宽, t_2 为 SET 脉冲宽度

1.3.2 相变存储器研究现状

1.3.2.1 材料研究现状

能发生相变的材料很多,但未必都能用于信息存储;能在非晶态和晶态间转变的材料也很多,但未必都有电阻或光反射率的强烈反差。硫族化合物相变材料能应用到存储器的主要原因就是它们在相变前后具有电阻或者光反射率巨大差别的性质。因此尽管相变材料数目众多,但是能应用到PCRAM上的却寥寥无几。究竟为什么硫族化合物具有这样的性能呢?我们先从硫族化合物相变材料的典型代表也是目前研究得最多的 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST)介绍开始。

GST 熔点为 617°C , 图 1.7 给出了 GST 薄膜经过不同退火条件处理后的 XRD 图谱、薄膜电阻随温度变化以及差分扫描热量计(Differential Scanning Calorimeter, DSC)曲线^[13]。从电阻-温度曲线可以看到材料电阻的下降过程可分为两个步骤,这分别对应着先从非晶态转变到亚稳态面心立方结构(FCC),再从 FCC 继续转变到六方密堆结构(HEX),这两个结晶过程的结晶温度分别为 175°C

和 365 °C^[13,14], 这一点从 XRD 图谱上也得到了证明。同时发现, GST 非晶态与 FCC 晶态间的电阻差异就达到 $10^3 \sim 10^4$, 完全满足存储器“1”和“0”的识别要求。

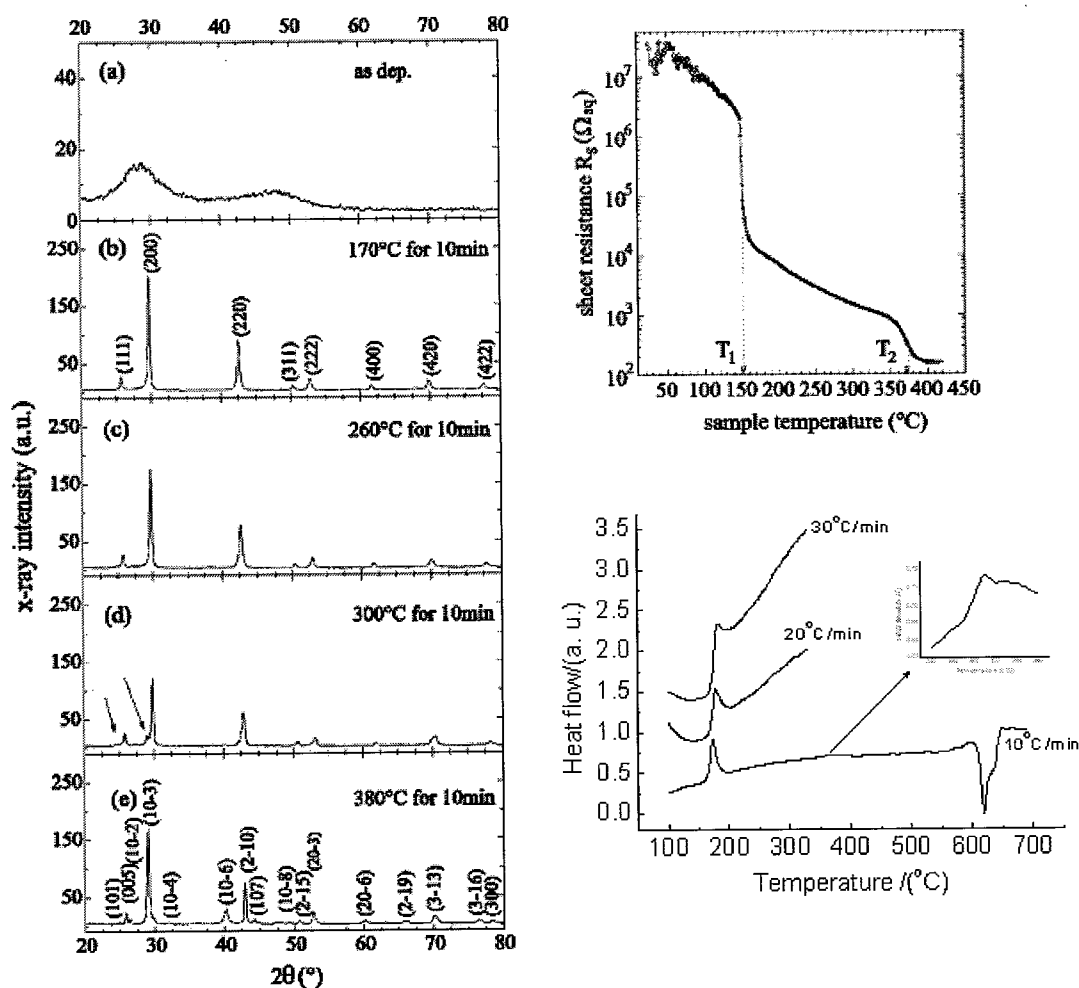


图 1. 7 GST 的 XRD, 电阻随温度变化以及 DSC 曲线。

由于 FCC 晶态结构是亚稳结构, 相变速度快, 因此通常利用它和非晶态之间的转换来对应存储器 RESET 和 SET 操作。图 1. 8 给出了 GST 的非晶态和 FCC 晶态结构^[12-15]。非晶态结构中, Ge、Sb、Te 三种原子的排列杂乱无章; 而在 FCC 结构中, 这三种原子的排列却整齐有序, 但大约有 20 % 的空缺^[16]。图 1. 9 给出了晶态和非晶态 GST 的能带结构^[12]。在 FCC 结构下, 空缺充当受主, 费米能级靠近价带, 为 p 型半导体。而在非晶结构下, 每个原子需要自然成键, 将 2 价的 Te 原子表示为 C_2^0 , 下标表示共价键数目, 上标表示电荷数。缺陷的产生可以表示成:

$2C_2^0 \rightarrow C_3^+ + C_1^-$ 。因此, C_3^+ 和 C_1^- 分别充当施主和受主。

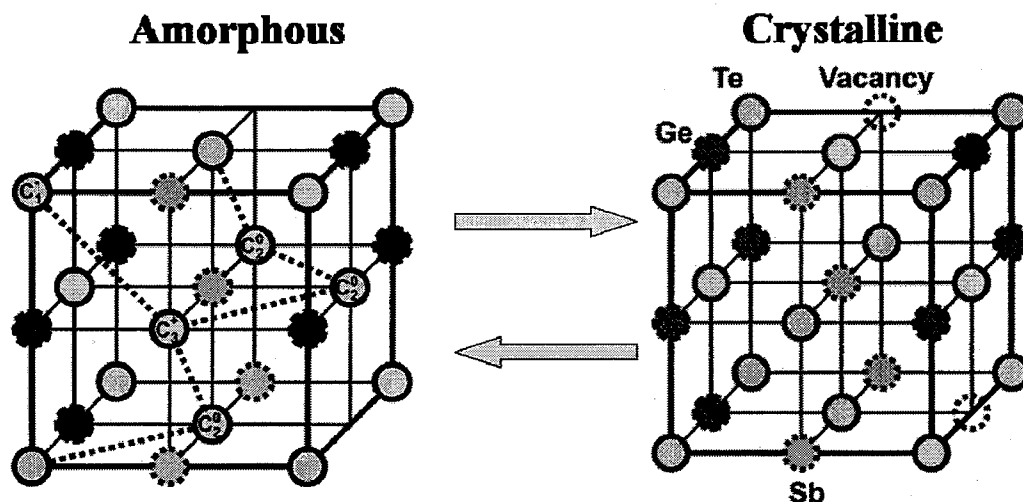


图 1.8 非晶与面心立方结构下的 GST 原子排列结构^[15-16]

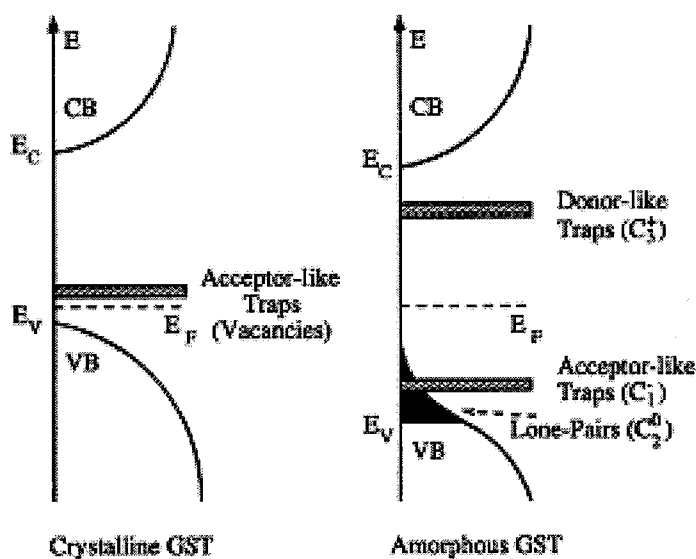


图 1.9 FCC 晶态和非晶态下的 GST 能带示意图^[12,15]

但是在研究GST的同时也发现它具有一些缺点,为了提高结晶温度和数据保持能力,有人对GST进行了掺N、掺O;为了提升循环次数进行了掺N;为了提高器件编程速度进行掺Sn、Bi、In、Ag^[17]金属等等。

研究表明经过7 at.%的氮掺杂后^[18], GST薄膜的晶粒减小,薄膜电阻率和结晶温度提高。由于掺杂会抑制薄膜晶粒的长大,因此,器件的疲劳特性得到明显的提高。同时, N、O的掺杂可以提升高温下的数据保持能力,这是因为掺杂提高了材料的结晶温度和结晶激活能^[19]。Liu等人的研究发现,当氮掺杂达到一定

浓度后, GST变成了一步相变过程^[20,21]。因为当N含量达到一定浓度后, 会形成电阻较高的GeN_x氮化物, 抑制了材料从FCC到HEX的相变。正是由于GeN_x的形成, 材料的电阻率得以提高^[22]。为了提高PCRAM器件的存储速度, 科研人员也进行了金属的掺杂, 比如掺Sn^[23]。本论文第二章也详细地研究了掺Sn的GST材料与器件性能。

此外, 可用于PCRAM的材料还有(Ge₁Sb₂Te₄)_{1-x}(Sn₁Bi₂Te₄)_x^[24], GeTeAsSi^[25], GeTe^[26], GeTeBi^[27,28], GeSb(CuAg)^[29], GeTeAs^[30], InTe^[31], InSe^[32], AsSbTe^[33], SeSbTe^[34], PbGeSb^[35], Sb-Te, KSb₅S₈^[36], Sb-Se^[37], AgInTe和AgSbTe^[38]等。

最近研究人员开始开展了无Te以及非硫系化合物材料的研究, 给相变材料的研究开启了一个新的方向, 为研究相变材料提供了一个更加广阔的空间。这里面有代表性的有GeSb^[39-41]、GeSbSe^[42]和SiSb材料^[43-44]。

由于PCRAM存储单元的相变过程最终要靠晶体管的驱动来实现, 为实现与晶体管功率的匹配, 同时降低器件的功耗, 必须大幅度降低操作电流。降低操作电流的方法有: 减小电极与相变材料的接触面积; 提高相变材料的电阻; 在电极与相变材料之间或相变材料内部添加热阻层; 进一步完善器件结构设计, 探索新型结构。近年来, 为提高相变材料的发热效率, 降低操作电流, 出现较多有关热阻层材料的研究。S. Y. Lee 等人^[45]通过在GST与W下电极之间引入一层SiGe作为热阻层, 大大提高了GST材料的升温效率并促进了相变过程。与传统的TiN、W等加热材料相比, SiGe热阻层使得SET和RESET电流降低了约80 %。这是由于SiGe合金具有较高的电阻率和较低的热传导率, 从而既提高了加热效率又降低了热损耗。Y. Matsui等人^[46]在GST和W电极之间引入了一层非常薄的Ta₂O₅, 作为热阻层有效提高了加热效率, 降低了器件的操作电流, 在W电极直径为180 nm的条件下, 获得了1.15 V/0.11 mA如此之低的RESET电压/电流; 同时作为粘附层有效改善了GST与SiO₂间的界面接触, 改善了器件的稳定性。也提高了器件的循环擦写性能。中科院上海微系统研究与信息技术所在PCRAM热阻层材料研究方面也获得了许多创新性研究成果。F. Rao等人^[47]通过在上电极与相变材料之间添加一层GeSiN过渡层材料, 使RESET操作电压降低至少25%。本论文也创新性的研究了TiO₂加热层材料, 使热量通过下电极的损耗大为降低。T. Zhang等人^[48]的研究表明, 在相变材料和加热电极之间引入同时具有低电导和低热导的过渡层, 形

成三明治式结构,该结构可以提升相变存储器的加热效率、增加用在材料相变过程的热量比率,并且还能够将相变材料的熔化区域向加热电极移动,消除并联电阻,使器件具有稳定的高阻态。多晶Ge拥有较低的热导率和较低的电导率,是一种理想的材料,并且制备工艺简单,与其他材料相比,在引入多晶Ge过渡层的同时不会进一步引入其他元素,制备工艺与GST器件的制备工艺完全兼容,具有较强的实用性。

1.3.2.2 器件研究现状

前面已经提到既然PCRAM实现信息的写入和擦除的方式是利用焦耳热使微小区域的相变材料发生相变,那么相变区域的尺寸越小,发生相变所需的功耗就越低。也就是说器件单元的尺寸越小甚至达到三维纳米尺度,PCRAM的优越性将越充分地体现,如图1.10所示。因此,对PCRAM器件结构的研究和设计时主要考虑以下几点:

- 1) 容易实现器件单元尺寸的纳米化;
- 2) 器件制备工艺与现有的半导体工艺或未来主流半导体工艺很好地兼容;
- 3) 器件结构简单易行、可行。

图 1.11 示出了目前国际上 PCRAM 器件单元的几种典型结构设计。

目前研究和应用最多的是“蘑菇型”器件结构,这种结构是最为经典也是制备工艺较简单、成本较低的一种结构。目前,很多相变存储器研发机构的PCRAM单元都采用了此结构,并得到了较好的性能。值得注意的是,Samsung 在此结构上进行改进后研发的 PCRAM 芯片存储容量已达到了 256M^[49]。

研究表明,PCRAM 器件的功耗随着加热电极的面积减小呈快速下降的趋势。对于传统的“蘑菇型”结构来说,电极面积的减小意味着需要更先进的曝光和刻蚀工艺来实现,同时意味着成本的大幅增加。Samsung 提出的边缘接触结构可以很好地解决上述问题^[50],这种结构的优点在于不需要利用最先进的工艺技术,而通过控制沉积的电极的厚度来有效地减小加热电极的接触面积。在 Samsung 的研究中,用 0.18 μm 的 CMOS 工艺制备出了高性能的器件,其 RESET 和 SET 电流分别达到了 0.2 mA 和 0.13 mA,远远小于同等工艺条件下制备的“蘑菇型”结构 PCRAM 的操作电流。这种边缘接触结构也吸引了其他研究小组在此

基础上进行了改进^[51]。

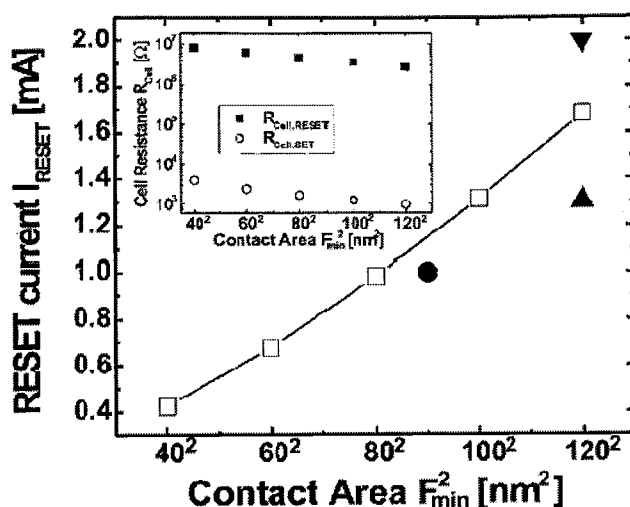


图 1.10 功耗与相变区域面积的关系^[52]

研究人员对进一步缩小 RESET 和 SET 电流的探索是无止境的, Philips (现 NXP) 提出的桥式结构^[53], 是用掺杂后的 SbTe 材料制备出 100 nm×50 nm 尺度的相变材料纳米线, 得到了具有较低编程电压的线状存储器件。在 2006 年的 IEDM 会议上, IBM、Qimonda 和 Macronix 相变存储器联盟也报道了类似的用 GeSb 材料制备的纳米桥存储器^[39]。这种存储器的优点在于能够得到很好的电性能, 但是工艺较繁琐, 密度较低, 制备成本高, 而且目前的可擦写次数还没有达到很高的水平。距工业大规模生产还有相当长的距离。

为突破经典蘑菇型结构的设计思路, Samsung 公司开发了一种相变材料 confined 结构^[54,55], 从减小相变材料尺寸上入手, 使操作电流降低了三分之一以上, 并且实现了 64 Mb 芯片的擦写次数达到 10^9 以上。

为了解决传统加热电极尺寸不易减小的瓶颈, C.W. Jeong 等人^[56,57]设计了一种环形加热电极, 通过在电极中心填充介电材料, 大大缩小电极的面积, 且环形的壁厚可以很薄、容易加工, 这种结构在降低 RESET 电流的同时, 还可以改善较低的低阻、电阻分散性较大现象的发生。同时, 适合于高密度芯片的制备, 目前已成功应用于 256 Mb 芯片的制备。

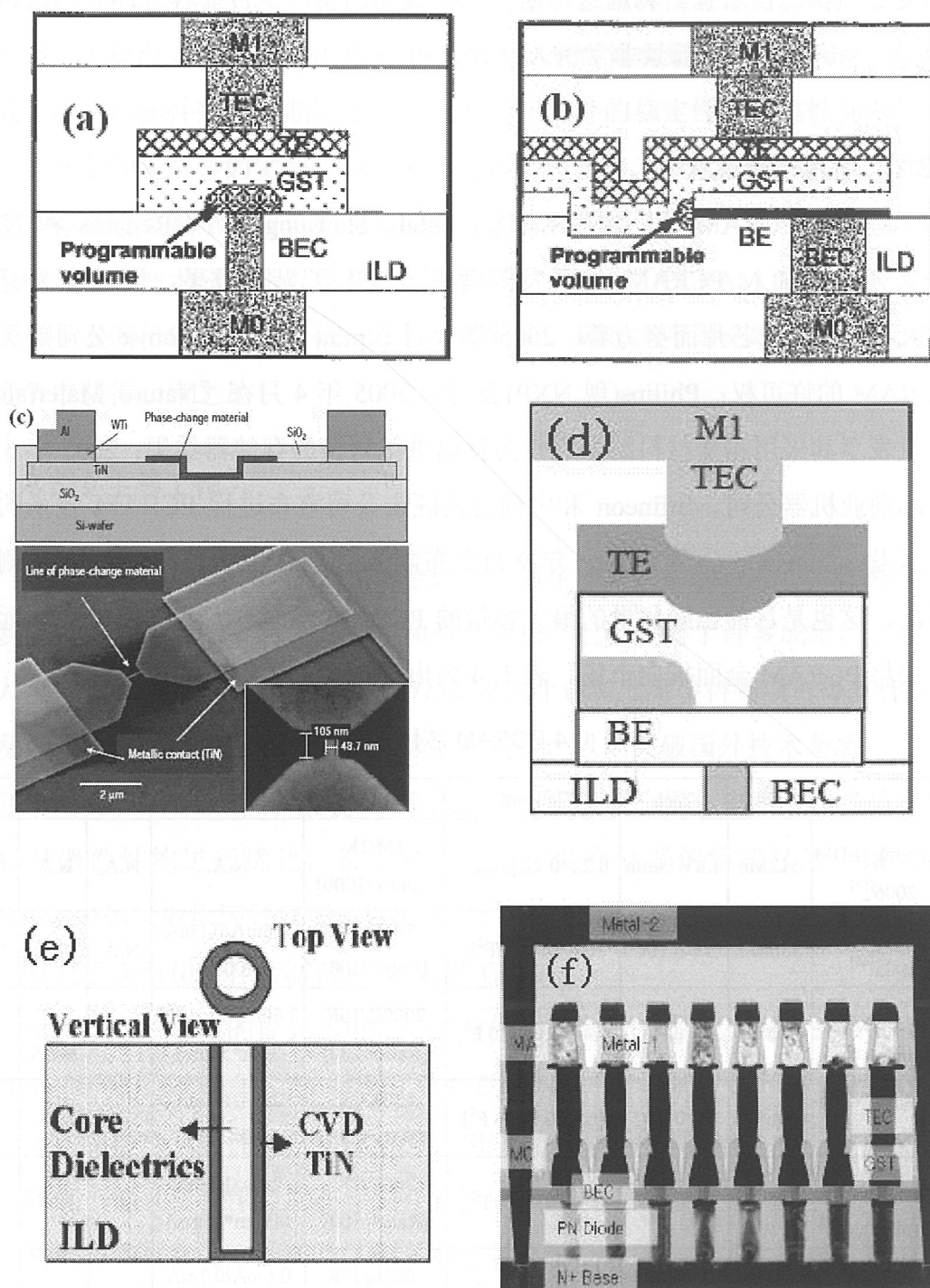


图1.11 各种结构的相变存储器。(a)“蘑菇型”结构；(b)边缘接触型；(c)桥型结构；(d)相变材料confine结构；(e)环形电极；(f)垂直二极管结构。

最近，Samsung 公司又提出了一种全新的器件结构——垂直二极管驱动结构^[58,59]，将二极管、相变材料放置在垂直的绝缘材料孔内，利用了二极管驱动能力强的优点，最大程度减小了器件尺寸(5.8 F^2)，也降低了器件单元之间的串扰，