

国外磁泡技术发展概况

第四机械工业部技术情报研究所

一九八一年七月

目 录

一、概述.....	(1)
二、发展簡史.....	(4)
三、磁泡器件的特点.....	(6)
四、磁泡材料.....	(8)
五、磁泡器件工作原理、基本工艺及其設備.....	(10)
1.磁泡器件工作原理.....	(10)
2.基本工艺和設備.....	(12)
六、磁泡技术发展概况.....	(16)
(一) 世界各国的研究和生产状况.....	(16)
1.美国.....	(16)
2.日本.....	(25)
3.英国.....	(27)
4.荷兰.....	(27)
5.法国和西德.....	(28)
6.苏联.....	(28)
(二) 世界市場和价格預測.....	(28)
七、磁泡技术的应用和发展前景.....	(30)
1.应用.....	(30)
2.发展前景.....	(32)
(1) 磁泡存儲器与磁性旋轉式存儲器比較.....	(33)
(2) 磁泡存儲器与电荷耦合存儲器比較.....	(34)
(3) 展望.....	(36)
参考資料.....	(38)

一、概 述

多年来,磁学一直是处在缓慢的发展状态之中,由于客观的需要,伴随着计算技术和半导体集成电路技术的发展,十几年前,在现代磁学领域内出现了一门面目全新的技术—磁泡技术。它的诞生,标志着磁学领域内已有了一项重大的技术进展,或者说有了一项技术上的突破。磁泡技术的面世给古老的磁学带来了生气,赋予了青春的活力。

磁泡技术是一门基于半导体集成工艺的磁集成技术,是当前磁学、半导体技术、计算逻辑技术相结合的产物。从它进入应用市场之初,就在存储、逻辑、运算、显示等技术领域中呈显出巨大的潜在作用。十多年来,这门技术,无论是从理论基础方面看,还是从材料、工艺、器件、应用等方面的研究和生产活动上来看,其发展速度都是相当惊人的,这些进展已激起并将继续促使人们对它予以密切注意和高度重视。

磁泡技术正式出现,或者说利用磁泡可以达到信息存储、逻辑运算功能的可能性的文章是1976年由美国贝尔(Bell)电话实验室A.H.Boeck首次发表的。由于这门技术的新颖、奇特和重要,使它成为了以后各次国际性磁学会议、半导体集成电路会议、计算技术学术会议讨论的中心议题之一。在这些会议上,发表的论文、技术性文章、实验总结等的数量很大,内容涉及到磁泡技术的各个方面,如象基础理论、材料、工艺、设备、结构、器件、测试、应用等等,这些内容可以归纳成几个字:丰富、新颖、多样。为了看看磁泡技术在人们中的地位,我们将在七十年代召开的各次国际应用磁学会议上,有关磁泡技术方面公开发表的论文数量作了一个粗略的统计(表1):从表中可看出,有关磁泡技术的论文是占有相当地位的。

表1 1972年-1979年各次国际应用磁学会议上磁泡技术论文数量

年	总论文数 (篇)	磁泡技术论文数 (篇)	占全部论文篇数 的比例
1972	约243	约36	约1/6
1973	约200	约43	约1/5
1974	约249	约36	约1/7
1975	约239	约55	约1/4
1976	约154	约22	约1/7
1977	约231	约60	约1/4
1978	约336	约34	约1/9
1979	约188	约60	约1/3

此外,由于磁泡技术专业性强,涉及的技术领域较宽,为了深入讨论、探索,国际电气和电子学工程师协会从1974年就开始组织国际磁泡技术专题性讨论会。这种会议每两年举行一次,第一次是1974年底在美国加利福尼亚州的圣何塞(San Jose)召开的,有八十人参加;1976年在荷兰埃德霍温召开了第二次讨论会,有一百五十人到会;第三次是在美国加里

弗尼亚州的棕榈泉召开的,出席这次会议的有世界各国代表三百多人,共宣读了45篇论文⁽¹⁾。除了以上所介绍的磁学综合性会议和磁泡技术专题性讨论会上集中发表的文章之外,与磁泡技术有关的其它学术会议上发表的磁泡技术文章,世界各国有关刊物、杂志、文献上发表的文章、报告、讲座、通信等的数量也是相当多的。据不完全统计,从1967年到1977年间世界上所发表的磁泡技术文章多达2000多篇,从1973年到1978年间所发表的有关磁泡技术的专利文献已达200篇以上⁽²⁾。

此外,世界各国对磁泡技术发展的重视程度,还可以从它们对这门技术大力倾注的人力、物力、财力上有所了解。估计全世界对磁泡技术的投资每年约在二千万美元以上⁽³⁾。美国有九家公司的投资额已达数亿美元,其中IBM公司1979年前八年间累计投资达一亿美元。据认为,到1980年,美国在磁泡技术方面的投资要突破十亿美元。在人力方面,目前美国有近三十个公司或单位,近千人在从事磁泡技术的发展工作,其中有五、六家已投入生产。近年来,新开展磁泡技术研究的单位也有五、六家。对磁泡技术的重视程度,日本是仅次于美国的。在日本从事磁泡技术发展工作的单位估计有十几家,约两百人以上⁽⁴⁾。日本大部分厂家最初研究磁泡技术是从生长正铁氧体单晶开始的,现在都采用液相外延生长石榴石单晶薄膜。在器件方面,主要在一些公司的研究所进行。在整个磁泡技术领域内,日本人的竞争能力相当强,投入力量也很大,有人称日本是“把钱倒在磁泡上”。在早期的统计中,曾对美国、日本、西欧等国几十个公司或单位在磁泡技术发展方面的人员比例有个估计,美国的研究生产人员约占60%左右,日本约占18%,西欧占10%,荷兰占10%⁽⁵⁾。当然,其它国家,如象英国、法国、加拿大、意大利、苏联、捷克等国均有不少单位在从事磁泡技术的研究和生产(表2)

表2 从事磁泡技术研究和生产的主要公司或单位

国别	公司(或单位)
美国	贝尔电话实验室 (Bell Telephone Laboratories)
	洛克威尔国际公司 (Rockwell International)
	德克萨斯仪器公司 (Texas Instruments)
	国际商业机器公司 (IBM)
	斯佩里·尤尼瓦克公司 (Sperry Univac)
	巴勃斯公司 (Burroughs)
	霍尼威尔公司 (Honeywell)
	雷声公司 (Raytheon)
	控制数据公司 (CDC)
	休利特·帕卡德公司 (Hewlett Packard)
	美国电话电报公司 (AT&T)
	美国无线电公司 (RCA)
	英特尔公司 (Intel)
	全国半导体公司 (National Semiconductors)
	西格奈蒂克斯公司 (Signetics)

利顿公司 (Litton)
 威斯汀豪斯研究所 (Westinghouse)
 西部电气公司 (Western Electro.)
 应用化学公司 (Applied Chemical)
 联合碳化物公司 (Union Carbide)
 孟山都公司 (Monsanto)
 加里弗尼亚州:
 喷气动力装置研究所
 贝克莱大学
 理工学院

日本	日立制作所 (Hitachi) 日立制作所美国子公司 富士通 (Fujitsu) 富士通美国子公司 日本电气 (NEC) 日本电气美国子公司 日本电信电话公司 (NTT) 松下电器 (Matsushita Electric) 东芝 (Tokyo Shibaura Electric) 日本电子综合技术研究所 日本大学 三井大学 大阪大学 早稻田大学
----	---

英国	普莱赛微系统公司 (Plessey Microsystem) 普莱赛研究中心 通用电气公司 (GEC) 诺庭汉州立大学 萨佛大学
----	--

法国	汤姆逊无线电电报公司中心研究实验室 (Thomson-CSF Central Research Laboratories) 电子和计算机技术实验室 (LETI)
----	--

荷兰	飞利浦研究实验室 (Philips Research Laboratories)
----	--

西德 意大利	埃德霍温工科大学 西门子公司 (Siemens) 罗马固体器件研究所
-----------	--

加拿大

北方贝尔研究所 (Bell-Northern R.)

默克莫斯特大学

苏联

莫斯科控制科学研究所

波兰

波兹南分子物理研究所

匈牙利

布达佩斯物理中心研究所

捷克

国家科学院物理研究所

正因为磁泡技术受到各国的重视,研制力量强大,人材济济,致使这门技术的发展可以说是“突飞猛进”,“成绩显赫”。磁泡材料是磁泡器件的基础,美国贝尔电话实验室在这方面曾集中了大量优秀人材进行研制。经过短时间探索,并进行淘汰、选择、放弃了用正铁氧体(YFe_2O_3)和六角晶系铁氧体作为磁泡材料,寻找到了优良的磁泡材料—单晶石榴石材料,这也是目前大量使用的磁泡材料。使用的形式是在钆镓石榴石(GGG)或(CGGG)单晶基片上用液相外延工艺生长的单晶薄膜,组份主要是钆钆铁石榴石(GdSmGaIG)和钆钆锆(YSmGe)铁石榴石材料。材料的进展还体现在七十年代初期发现的非晶磁泡材料上,这种材料的研究亦受到人们的注意。与此同时,在基片材料、磁泡材料以及芯片的制作方面亦出现了不少改进,使材料和磁泡芯片的质量有较大幅度提高。1967年获得的磁泡材料的泡径是100微米,经过十几年的努力,目前在实验室中磁泡泡径已经达到1.0微米,到1980年,工业上用磁泡材料泡径也会达到1微米。当然,与磁泡泡径密切相关的磁泡芯片存储密度也有了很大提高,目前芯片存储密度已达到 10^6 位/英寸²(6),也有了4兆位/片的磁泡芯片。有人作了个简单统计,认为磁泡芯片集成度是以每年2-4倍速度在增长。保守一点估计,1979年—1983年,集成度将从256千位/片扩至4兆位/片以上,而长远目标将达4兆位/片—66兆位/片(7)。目前65-100千位芯片已大量生产,不少厂家已建立或扩大了生产线,256千位和1百万位芯片已研制成功并进入市场,正研制4百万位芯片(它将是下一代产品)。伴随着材料的进步,磁泡基片和芯片或器件的结构也有了改进,出现了主一次环结构、译码环结构、点阵结构等;就其传输图型已有T-I棒、Y-I棒、X棒、Y-Y棒、山形、非对称圆盘……等;驱动方式也由磁场驱动发展到了电流驱动。采用良好的材料和先进的工艺和结构,已使得磁泡器件(存储器)的性能有了很大提高。目前,磁泡存储器的存储容量已经达到 10^8 位、存取时间达到1毫秒以下,数据传输率达100千位— 10^7 位/秒,功耗低于1瓦,工作温度范围为-25—75℃,价格是每位数百毫分(美分)。当前,传统的(磁场驱动)坡莫合金场存储器已经大量生产,市场上已有商品出售。

应用方面,磁泡器件是具有很大潜在能力的,无论是在快速辅助存储器方面和小型外围以及微型外围设备方面,还是在军用磁性记录设备方面,都展示了这种器件的优越性。磁泡技术的出现和发展必将对计算机技术的发展予以大的推动,对半导体技术也必将产生微妙的影响。

二、发展简史

磁泡技术本身显示出真正的应用可能性仅是十几年的事,它的发展速度之所以如此快,除了世界各国的重视,各国政府或研究机构和生产厂家在人力、物力、财力方面大量予以支

持之外,实际上,这门技术的发展是有它坚实基础的,这一方面可以追溯到本世纪的五十年代。

1950年,法国人制成功了正铁氧体,1954年开始研究它的多晶磁特性,到1956年便制得了单晶正铁氧体材料,三年之后,人们在这种材料中就观察到了圆柱形磁畴结构并对之进行了初步研究。六十年代初期,美国RCA公司在钡铁氧体材料中也观察到了类似的磁畴结构。1964年美国贝尔电话实验室根据多方反映,发现无论是在5号纵横制交换机和电子交换机中,还是在数据传输等系统中,存储手段的局限性日益成为这些设备或系统向前发展的主要技术障碍和经济障碍。为此,该实验室工程技术人员和科学工作者均倾力寻找新的存储手段,在自上而下的推动下,也确实取得了很大收效⁽⁸⁾。1966年就纷传贝尔电话实验室在研究新的存储和逻辑器件。1967年,该实验室的A.H.Boeck在贝尔系统杂志上首次提出利用磁泡有可能实现存储和逻辑功能⁽⁹⁾。第二年他在国际应用磁学会议上曾对此作过一次报告,但是,他所报告的内容当时并没有受到人们的关注。1969年4月,A.H.Boeck又一次在相同的会议上介绍了他们的研究小组研究进展,提出了T棒传输方案并放映了显示磁泡产生、传输、破灭、复制情况的电影,与此同时,展示了用磁泡材料制成的100位移位寄存器。从这个时候开始,磁泡技术才真正引起了人们的高度重视⁽¹⁰⁾。这之后,关于磁泡技术的基础理论、材料、工艺、设备、器件及其应用的研究开始有了全面的开展。

1969年,A.A.Thiele提出了比较完整的磁泡静力学理论,同年,贝尔电话实验室作了数百个正铁氧体片,不过材料的制备却存在许多问题。这之后,人们开始寻找六角晶系材料作为磁泡材料,但这种材料也并不理想。到了1970年,A.H.Boeck等人在感生单轴各向异性石榴石单晶薄片观察到了磁泡,并作了深入研究⁽¹¹⁾。当年,在日本举行的国际铁氧体会议上,他提出了采用磁性单晶石榴石作为磁泡材料,并且指出了这种材料的许多优点,引起了人们极大重视。从此开始了这种材料作为磁泡材料的新应用,为磁泡技术的发展开辟了新的发展道路。但是,前进的道路并非是十分平坦的,就在这一年,在磁泡材料中发现了导致磁泡传输失灵的所谓“硬泡”⁽¹²⁾。贝尔电话实验室和IBM公司对此进行了研究。他们认为“硬泡”的起因是泡畴壁中存在着布洛赫(Bloch)壁和尼尔(Nell)壁。为此加强了磁泡静力学和动力学的研究,在这种研究基础上提出了若干办法(如采用多层石榴石薄膜、离子掺杂、淀积极薄的坡莫合金等)来抑制“硬泡”的产生。同年,在磁泡芯片的结构方面,P.I.Bonyhard等人提出了主一次环结构方案,为以后制作优良的磁泡器件奠定了基础⁽¹³⁾。1971年,H.J.Levinstein等人采用液相外延浸渍方法开始长石榴石磁泡材料⁽¹⁴⁾,同时G.S.Almasi等人发明了磁阻检出法。到1973年,IBM公司的P.chaudhau等人在高频溅射Gd-Co膜上发现了磁泡⁽¹⁵⁾,使磁泡材料从单晶态发展到了非晶态(原子排列无序)材料,由于这种材料呈非晶态,所以不用单晶衬底,这就简化了大量工序。这一年,P.I.Bonyhard等人用石榴石材料制得6微米直径磁泡的20千位芯片并组装成样机。同年,W.A.Bonner等人又研制成了增加石榴石材料单轴各向异性的Ca-Ge置换的单晶石榴石磁泡材料,这种材料性能优良,已获广泛应用。1974年,IBM公司提出了磁泡点阵器件(BLD)设想⁽¹⁶⁾。1975年,A.H.Boeck用16千位磁泡芯片组装成0.46兆位磁泡存储器样机,并以此为例对磁泡存储器作了全面介绍。1976年,在磁泡传输图型方面又取得了新进展,P.I.Bonyhard等人发明了比T棒制作容易的半圆盘(HD)传输图型。J.E.Geusic用四个3微米磁泡的68千位芯片制成存储器样机。在磁泡动力学方面,IBM公司的B.E.Argyle等人发现了磁泡的自动运动,而T.J.Beaulieu等人深入研究了磁泡状态,发现了磁泡畴壁结构的几种变换。1977年,洛克威尔国际公司在3英寸直径外延片上制得了49个芯片,容量密度为1兆位/片。Y.S.Lin等

人用4.5微米直径的衔接圆盘(CD)图型传输直径为1微米的磁泡。同年8月,美国德克萨斯仪器公司正式宣布92千位单芯片磁泡存储器组件产品问世,并首次用于微处理机⁽¹⁷⁾。近两年,磁泡存储器已开始在兆位级器件进军了。

纵观磁泡技术的发展简史,可以看到磁泡技术作为一种新的技术门类正向实用化前进,并且逐渐趋于完善。对于磁泡技术的发展,可以概括起来分作几个发展阶段:1966年-1969年为磁泡技术的探索阶段,1969年-1973年为大量研究和发展阶段,1973年-1975年磁泡存储器雏型出现,1976年-现在,开始进行实验性生产并投入使用,进入商品化阶段。

三、磁泡器件的特点

磁泡具有存储、逻辑、开关等多样性功能。在一个磁泡芯片上能同时完成存储、数据操作、数据处理等工作。磁泡存储器(MBM)是磁泡技术的主要应用场合,实际上,目前所说的磁泡技术主要是指磁泡存储器的制造和使用。

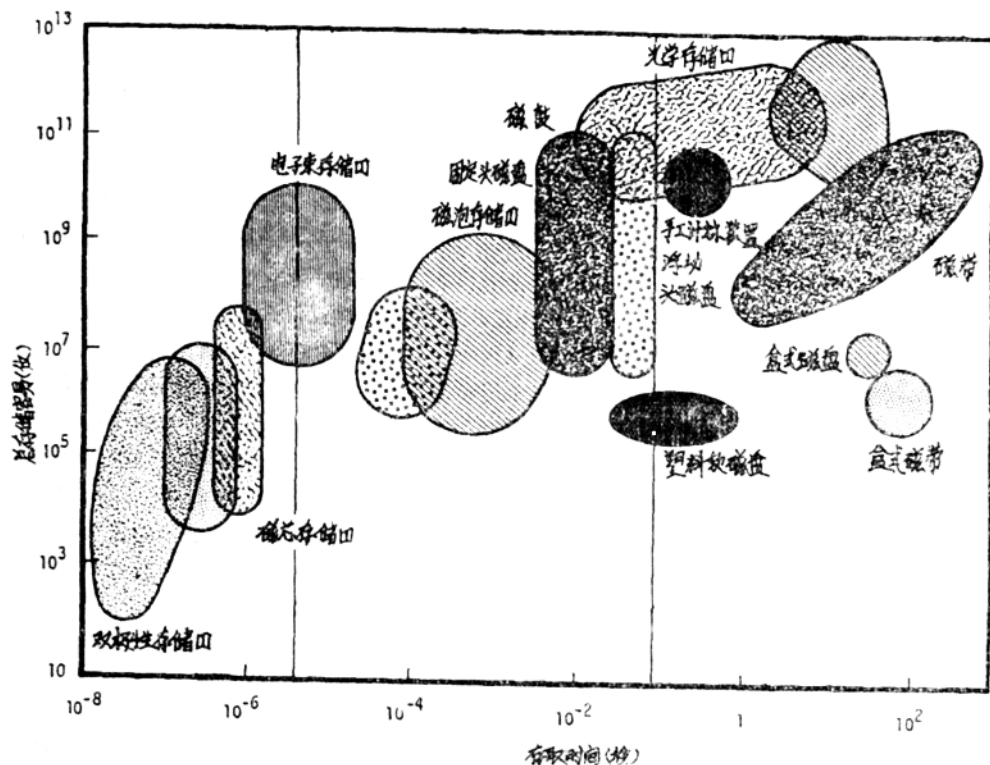


图1 各类存储器存储容量和存取时间

理想的存储器,最好是融为一年的单个非易失性存储器,但是,这却是难以实现的。因此一般采用不同类型的存储器按其特点分成若干级,组成一种层次结构。层次结构最上一层容量最小但速度最快;最下一层容量最大但速度最慢。现代计算机中存储系统采用的这种层次结构主要由磁芯存储器、半导体存储器和用机械方式串行存取的大容量磁带、磁鼓、磁盘等

存储器组成。这种层次结构的一个最突出的缺点是大容量存储器和高速电子存储器之间有很大的空隙或空档，当然可以用软件来填充，但这不仅需要人力，增加机器的复杂性，而且还要有一套精心设计的内部程序，因而有可能占用很大的存储容量，对计算机的速度也有一定影响。为了合理地解决这一问题，已出现了若干新的电子存储器，磁泡存储器便是其中较为理想的一种电子存储器⁽¹⁸⁾。

磁泡存储器是一种固态器件，也是一种移位寄存类型的，具有存取特性的存储器。在电子存取和机械存取存储器之间，有存储容量和相差三个数量级的存取时间的空档，磁泡存储器在这两种特性方面正好适合填充这一空档（图1）⁽¹⁹⁾。

磁泡存储器的定性特性可以归纳成下面几点：

串行存储器

移位寄存机构

按区随机存取存储器

位可寻址

优良的非易失性（即使中断电源，磁泡仍旧存在，不需要后备电源，可以长期保持信息。

这是大容量存储器、电可变只读存储器中至关重要的一点）

非毁灭读出

读—修正—写循环

间歇工作

能降低有效存取时间

降低功耗

使传输速率可变

减少缓冲要求，可采用小型缓冲器

标准组件存储容量

低的输入成本

位成本基本上与存储容量无关

封装引线数不取决于存储容量

结构简单

构成系统自由度大

抗辐射，寿命长

制造工艺工序少，掩模少，无需严格对准工艺。与半导体集成电路生产工艺相似。

根据实验设计和计算，磁泡存储器的定量特性也可以归纳出几点：

1. 磁泡存储器存储容量大。因为芯片可以相叠，并可以级联，因此容量可以作得很大，甚至可以达到 10^9 — 10^{14} 位⁽²⁰⁾。

2. 制造磁泡芯片采用单级掩模，精度要求不高；磁泡器件体积小，和半导体存储器相比较位密度易于提高，可达到 10^9 — 10^{12} 位/英寸²，当然这取决于磁泡直径的大小、间距和传输图型。

3. 存取时间比机械式磁性存储器短，约在1毫秒以下。

4. 器件起动、停止均可以在瞬间实现并能瞬时倒转—异步工作，因而可以用任意速度传送信息，也就是说信息传输速率有较大的灵活性。磁泡一般移动的速度为 10^2 — 10^3 厘米/秒·奥，相当于 10^6 — 10^7 位/秒的数据速率，还可以进一步提高。

5. 磁泡移动时所需要的能量小, 在1微秒内磁泡从“0”态变到“1”态, 所需功率约 4×10^{-14} 焦耳, 因此一个容量为 15×16^6 位的磁泡存储器的功耗只有5—10瓦, 估计磁泡存储器功耗可达 10^{-8} 瓦/位以下。

6. 体积小 (10^{-6} 英寸³/位)。一个容量为 10×10^6 位的磁泡固定式存储器, 体积仅16.3厘米³, 相当于茶匙那样大。

7. 重量轻 (10^{-7} 磅/位)。

8. 成本低廉 (10^{-4} 美分/位)。

9. 可靠性好, 失效率在 10^{-12} 位/小时以下。在电源 $\pm 5\%$ 波动下, 仍能长期稳定工作, 工作频率在100千周以上亦能正常工作, 信息(数据)可以保留达一个世纪之久。究其原因有三: 磁泡存储器是一种固体器件, 基片与外延膜均是在高温下生长出来的单晶体; 器件是全磁性存储器, 编排的程序少, 没有机械转动部分; 器件是属于半连续媒质器件, 磁泡在磁体中连续移动, 不需要更多的布线。

表3 磁泡芯片和系统的一般特性 (1979年达到) (21)

芯片特性	
存储密度	1兆位/英寸 ²
芯片容量	256千位
存取时间	3—8毫秒
传输速度	100千位/秒
功 耗	0.7瓦
静态功耗	无
存储温度范围	-40—+85℃
工作温度范围	0—70℃
封 装	20引线双列直插式
系统特性	
存储容量	1—4兆位/板
传输速率	0.1—1.6兆位/秒
平均失效间隔时间	10000小时
控制器	大规模集成电路芯片
封 装	印制电路板

四、磁泡材料

要制作磁泡器件, 重要的问题是磁泡材料(基片与外延膜)的制备。可供磁泡器件使用的磁泡材料, 原则上说共有四种。一种是含钇(Y)或稀土元素的正铁氧体, 一种是六角晶系铁氧体, 一种是具有单轴各向异性的石榴石磁性材料, 一种是非晶态磁泡材料。这四种材料, 前两种已基本不用, 后两种, 特别是第二种材料是目前的应用主流。

为了获得具有磁泡结构、并满足使用要求的磁泡材料, 对这些材料的静态和动态磁特性有一系列要求:

1. 磁性材料中某一特殊方向比其它任何方向都更容易磁化, 即是说, 为了形成泡畴, 必须要求材料有强的单轴各向异性, 也就是 $Q = H_k / 4\pi M > 1$ (一般为 $3 \sim 8$) (H_k : 垂直于薄片平面的各向异性场)。Q 值太低, 操作温度太高时容易生成不希望的泡核, Q 值太高, 迁移率下降, 新磁泡产生困难。

2. 为了增加存储容量, 提高存储密度, 材料要有可能产生出合适泡径的磁泡 (在外磁场作用下)。

3. 为了提高存取速度, 畴壁迁移率要高, 至少大于 200 厘米/秒·奥。

4. 材料畴壁矫顽力要小 (小于 0.5 奥)。

5. 机械上、化学上、温度上的稳定性好。

6. 工艺要简单, 材料要易于生长, 能获得大面积优质膜。

为了使磁泡器件满足各种不同的需要, 必须恰当地选择磁泡材料。现将上述几种材料简介如下:

(1). 正铁氧体 (orthoferrite)

正铁氧体分子式为 RFe_2O_3 (R 代表钇或其它稀土元素), 晶体结构为钙钛矿结构, 属于一种弱反铁磁材料。它的磁化强度 $4\pi M_s$ 低 (100 高斯), 单轴各向异性大, 矫顽力低, 迁移率中等并且泡径大 (100 微米), 致使存储密度无法达到 10^6 位/英寸²。用助熔剂法难以生长大的没有缺陷的单晶, 由于缺乏合适的基片材料, 制作正铁氧体外延膜更加困难。此外, 磁结晶各向异性随温度急剧变化, 磁泡大小强烈地受温度影响, 制成的器件性能极不稳定。当时, 作磁泡材料用的正铁氧体主要有: YFe_2O_3 、 $LaFe_2O_3$ 、 $PrFe_2O_3$ 、 $NdFe_2O_3$ 、 $SmFe_2O_3$ 、 $EuFe_2O_3$ 、 $GdFe_2O_3$ 、 $TbFe_2O_3$ 、 $DyFe_2O_3$ 、 $HoFe_2O_3$ 、 $TmFe_2O_3$ 、 $YbFe_2O_3$ 、 $LuFe_2O_3$ 、 $(Sm_{0.6}Er_{0.4})Fe_2O_3$ 、 $(Sm_{0.5}Gd_{0.5})Fe_2O_3$ 、 $(Sm_{0.5}Y_{0.5})Fe_2O_3$ 、 $(Sm_{0.6}Dy_{0.4})Fe_2O_3$ 、 $(Sm_{0.55}Er_{0.45})Fe_2O_3$ 等。由于这些材料不能理想地满足器件要求, 因而在材料成份和工艺上曾作过不少努力, 但材料的性能、制备仍然存在许多问题。

(2). 六角晶系材料

为了提高存储密度, 在对正铁氧体材料磁泡尺寸的减小方面所作的努力失败之后, 人们开始对六角晶系材料的结构和特性进行研究, 力图寻找新的途径。这种材料的易磁化轴可以平行或垂直于六角对称轴。材料分子式为 $BaFe_{12}O_{19}$, 磁化强度比正铁氧体大得多 (4700 高斯), 能满足磁泡稳定条件。但是, 正由于磁化强度太大, 以致磁泡小到无法驾驭。另外, 这种材料的畴壁迁移率很低 (小于 1 厘米/秒·奥), 因而数据传输速率很低。为此, 还系统地研究了 $PbAl_xFe_{12-x}O_{19}$ 、 $Ba(Ti_{0.5}Co_{0.5})_xFe_{12-x}O_{19}$ ($0 \leq x \leq 1.6$)、 $SrAl_xFe_{12-x}O_{19}$ ($0 \leq x \leq 4$) 等材料, 但终因无法提高到实用水平, 只好另寻出路。

(3). 立方晶系材料

1970 年美国贝尔电话实验室 A. H. Bobeck 发现了具有感生单轴各向异性的石榴石磁性材料, 这种材料是以 $Y_3Fe_5O_{12}$ 为基, 泡径和迁移率对于制作器件均较理想。石榴石磁性铁氧体材料, 实际上是非单轴各向异性材料, 但是在某些实验中却观察到了稳定的泡畴。现在认为, 石榴石磁性材料之所以产生单轴各向异性的原因有两方面, 一是研磨晶片或气相生长所产生的磁致伸缩引起, 一是结晶成长时的部分有序所导致。为了产生足够的单轴各向异性, 可以采用离子掺杂方法制备新型石榴石材料。如用 Sm、SmLu、SmTm、EuLu 等代替 Y 离子; 为了使磁矩下降, 采用了 Ga 和 Ca-Ge 置换部分离子, 使得 Ca-Ge 材料成为当前使用较多的一种磁泡材料。具体来说, 石榴石磁泡材料种类较多, 现举出几种常用材料分子式: $Sm_{0.5}Gd_{0.5}$

FeO_3 、 $\text{Sm}_{0.5}\text{Y}_{0.5}\text{FeO}_3$ 、 $\text{Sm}_{0.55}\text{Tb}_{0.45}\text{FeO}_3$ 、 $\text{Sm}_{0.6}\text{Er}_{0.4}\text{FeO}_3$ 、 $\text{Sm}_{0.6}\text{Dy}_{0.4}\text{FeO}_3$ 、 $(\text{Sm}, \text{Y})_3(\text{Fe}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$ 、 $(\text{Y}, \text{Sm}, \text{Lu}, \text{Ca})_3(\text{Ge}, \text{Fe})_5\text{O}_{12}$ 、 $(\text{Eu}, \text{Er})_3(\text{Fe}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$ 、 $(\text{Eu}, \text{Y})_3(\text{Fe}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$ 等。石榴石磁性铁氧体材料制备工艺较复杂,成本也较高,但是由于它的特性好,特别是温度特性好,制成的磁泡器件可靠,所以它已成为目前主要使用的磁泡材料了。

(4). 非晶材料

1973年出现了以Gd-Co (7890Co)合金和Ga-Fe系合金为代表的非晶态磁泡材料—稀土过渡族金属的非晶态合金。这种材料矫顽力大于2奥,温度稳定性能差,但由于泡径在0.08-5微米之间,畴壁迁移率为5000-30000厘米/秒·奥,因而可以制成高存储密度、高操作速度的磁泡器件。此外,这种材料工艺简单,成本低廉,不用单晶基片,所以是有可能作为磁泡材料使用的。目前,由于还存在许多问题,需要进一步研究。

五、磁泡器件工作原理、基本工艺及其设备

磁泡技术是一种存储、处理和恢复数字信息的新技术。所谓磁泡,通俗地说就是一种圆柱形磁畴。在磁性材料薄片内,倘若没有外加磁场,可以观察到许多蜿蜒曲折的条形磁畴,当在垂直于薄片方向上加以磁化场后,这些条状磁畴会收缩,当磁场达到某一定大小值时,磁畴会缩成圆柱形,在材料表面上呈现为园形状。这种园形体具有带电粒子的许多类似的“特性”,在磁场作用下可以发生移动,因此称之为“磁泡”。磁泡的直径很小,约为零点几微米到几十微米,比头发丝直径还要小。在100毫微秒内,移动一个“泡”直径的距离,就相当于10兆位/秒的时针速度。在实际器件中,相当于3兆位/秒的数据传输速度。如果在上述晶片上生长所需要的磁性材料薄膜图形,借助于加在材料上的控制电路或磁路,就能使磁泡在磁泡材料内产生、传递、相互作用、分裂及消失,从而完成存储、逻辑运算、开关等功能,即能作成各式磁泡器件。

利用在薄磁性晶片平面的一个特定位置上泡存的在与否作为表示二进制制的“1”态或“0”态,便能使磁泡材料具有与存储器磁芯和用于存储的半导体材料以及其它类型存储器材料相同功能,磁泡存储器也就是根据这一设想而设计出来的新型器件。

1. 磁泡器件工作原理

产生、传递及检测磁泡是设计磁泡存储器的基础。

磁泡的产生是一个把信息写入存储器的过程。产生磁泡的方法主要有电源脉冲分割法(即导体法)和坡莫合金加旋转磁场分割法(即T-棒法)。此外还有两者相结合的方法。第一种方法主要是利用磁泡向低场方向移动的原理,第二种方法则是利用淀积在磁泡材料上的T形及棒形坡莫合金的极性随旋转磁场方向而变化致使泡种分割而产生磁泡。这种方法产生磁泡的速度较慢,因而在T棒传输回路中配置一个发夹形导体线圈来产生磁泡。

磁泡的传递有许多种方法,这些方法大致可以分为磁性驱动法和电流驱动法两种。第一种方法包括TI(T-棒)法、YI(Y-棒)法、Y-Y法和“^”形法以及衔接盘(CD)等方法(图2),其中衔接盘传输线路是为了避免光刻困难,提高密度而出现的新方法。为了

克服光刻困难和提高存储密度, 还采用泡点阵(所谓磁泡点阵存储器)和波状畴推动方法。前者磁泡排列紧密并以畴壁结构的两种不同状态表示“1”和“0”, 沿阵列布置的导体对相串联, 并以脉冲激励, 在垂直梯度场作用下, 传输泡阵沿水平方向传输。后者是磁泡材料膜表面的磁化强度分布成波畴波动传输。采用这种方式, 可以制成波状畴推动磁泡移位寄存器。

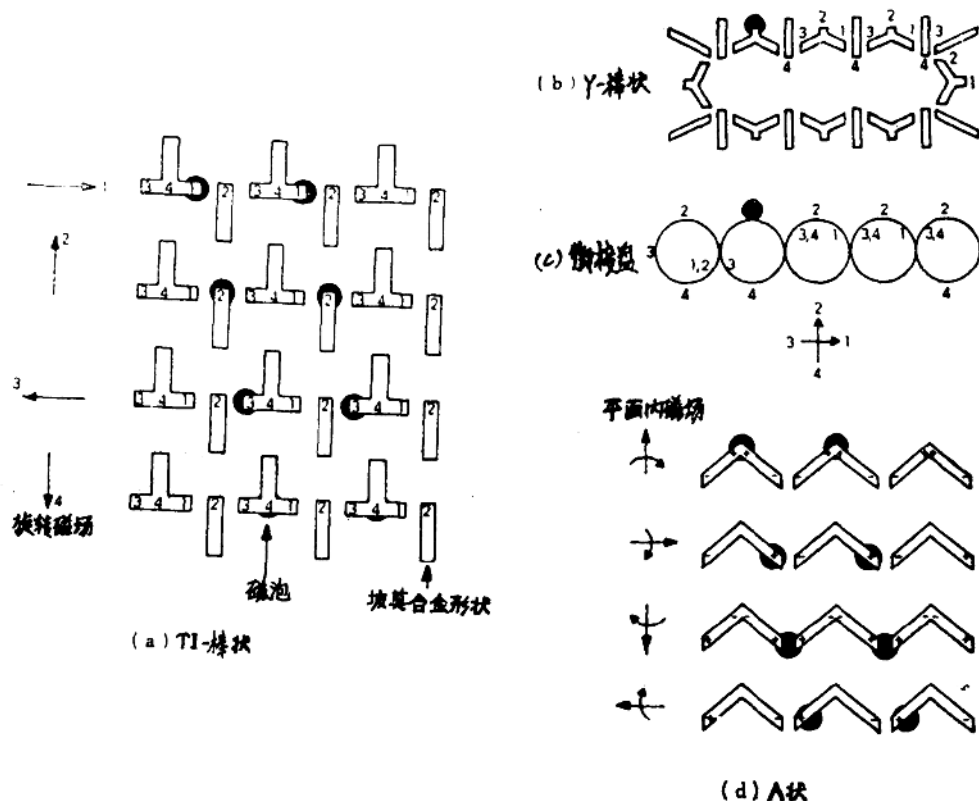


图2 四种磁泡传输技术

磁泡检出是用以读出存储内容, 这通常是利用传输线路中的一个特定部分来完成的。检测磁泡方法多种多样, 除了感应电压法(磁通变化法)之外, 还有光学法、磁阻效应法、霍尔效应法等。感应电压法动作速度慢, 不是一个好的办法。光学法虽然好, 但要求有复杂的机构和设备。坡莫合金磁阻检测器是较新和比较适用的方法, 缺点是只能检出磁泡在单晶表面磁通密度的水平分量, 而不能检出垂直分量, 并且常有杂音产生, 设备本身对泡的移动也有影响。霍尔检测器有好几种, 除了硅、砷化钾检出器外, 还有平面、铈化钢、三端霍尔检测器。然而霍尔检测器仅对垂直于元件表面磁通感生电压, 而对水平旋转驱动磁通不起作用, 因而检测时, 信号干扰比大, 采用局部离子注入方法能够加以改进。

至于这些程序具体在什么位置完成是比较复杂的。一般来说, 磁泡存储芯片通常采用一种主/次环结构(图3)(22), 主环是存取环(联络回路), 次环是存储环(存储回路)。主环由磁泡发生器、磁泡破灭器、检测器和T棒(或YY棒)传输回路组成。次环由T棒(或YY棒)传输回路组成。在主/次环间, 磁泡由转移门控制进出。这种结构缩短了传输回路长度, 从而缩短了信息存取时间。

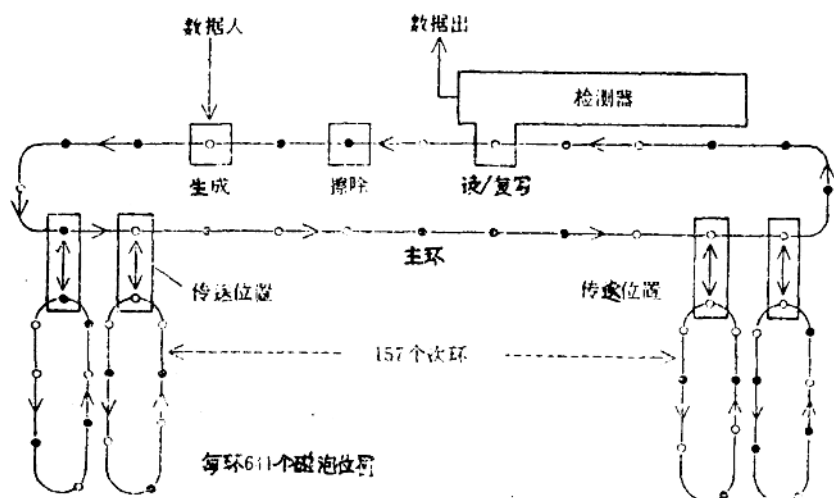


图3 磁泡存储装置图

此外，为了使磁泡器件具有多功能，仅靠一个辅助电路是不行的。它需要各式各样的电路以形成一个完整的磁泡存储器系统，这些电路主要有以下几种：一个控制器（为了提供一个CPU连接体和产生脉冲，它有执行同步发生器的功能）、线圈、功能驱动器、读出放大器（放大磁泡检测器的信号），图4为一个磁泡存储器辅助电路的简单方框图⁽²³⁾。磁泡控制器是微处理器与磁泡存储器之间的高级连接装置。控制器完成微处理器与磁泡存储器之间的并—串行和串—并行转换。它的主要作用是停止和促使磁泡的移动，保持存储页面位置，提高或降低磁泡存储器的功能（如象产生、交换、信息重现、冗余位重现），控制器信号是送入到功能同步发生器——一个单片集成电路，提供精确信号以控制功能驱动器，线圈驱动器和读出放大器。

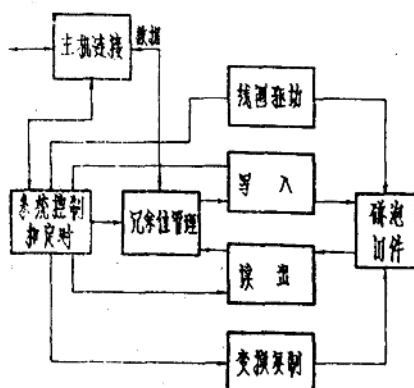


图4 磁泡存储器辅助电路方框图

2. 基本工艺和设备⁽²⁴⁾

磁泡器件的制作工艺与半导体集成电路制作工艺相似，工艺设备也基本类同。先作基片（现在一般用无磁性GCG基片—钽铌石榴石，也有采用其它基片的），然后在基片上生长一层石榴石单晶外延膜，再蒸发、光刻磁路和导体做成芯片、尔后便组装成器件，其工艺流程

见图 5:

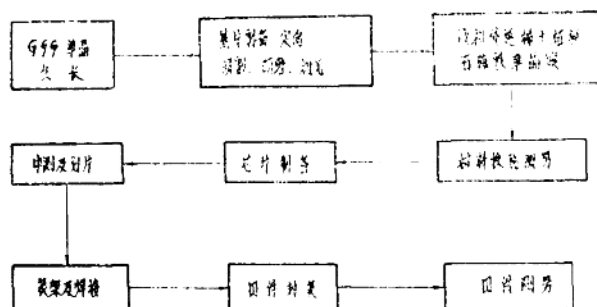


图 5 制备磁泡器件工艺流程

对于磁泡器件的基片和外延膜的制备一向是制备磁泡存储器的关键或核心。

(1) GGG单晶体的生长

GGG单晶体是制作基片用材料，对它的要求是很高的，因而对生长单晶体的方法十分考究。对生长单晶用的设备的稳定性（温度、机械等方面）要求也较高，其原因就是要使单晶生长均匀，而且长成的单晶一致性、重复性均佳。一般生长GGG单晶采用高频加热晶体生长炉进行。为了改进生长特性，现已采用自动控制生长法（如光学、称重、工业电视法等）。美国联合碳化物公司的GGG单晶长得最好，专供美国及其它国家有关厂家使用。这种3G材料是1969年出现的非磁性基片材料，近来，贝尔电话实验室研制出了一种新型磁泡基片材料，即 $\text{CGGG}-\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ，它的熔点较低（1380℃），制备工艺简单，价廉，这对3G材料是一个挑战。波兰人也采用另外材料，如象 MgO_2 作为基片材料。这里仅就GGG单晶材料生长中的一些工艺问题简述如下：

消除晶体缺陷的方法：

位错的消除：主要通过双扩肩和缩颈工艺过程中保持凸界生长面来消除晶体中的位错。

核心的消除：主要是采用控制GGG晶体生长时的转速来达到。扩肩后增加转速，到一定程度，转速要逐渐下降，以保持平的生长界面。

消除掺杂：GGG晶体所用的原料纯度要很高， Ga_2O_3 纯度达99.9999%， Gd_2O_3 纯度达99.99%，稀土杂质要尽量减少。晶体生长的气氛 N_2 和 O_2 要十分纯。坩埚表面要十分光滑，晶体生长环境亦要十分干净。

(2) GGG基片制备

通过切片、研磨、抛光获得一定厚度和晶向、高度平整光洁以及无损伤的GGG基片，而这些是获得高性能器件的重要前提。片子厚度不合适，会导致工艺困难，片子易于破碎；其次，片子不能偏离〈111〉晶面过大，否则磁泡材料易磁化轴会远离膜的法线轴，以至根本不能作为磁泡材料。表面不平整或有损伤，会使外延膜受损和光刻图形畸变。因此上述工序十分重要。关于它的具体制备问题好多与制造硅片一样，这里仅指出粗加工和精加工两个工序中应该注意的问题。

粗加工：尽量避免冲击过猛、采用质地较软的硬腊基的砂轮，以免产生表面损伤、裂纹和碎片。

精加工：主要是指抛光。这里，化学机械抛光液、供料量、清洗、抛光布、压力、温度、

速度，特别是抛光液、温度、压力对基片质量的影响都极大。除了采用硅胶抛光膏(Sylon)外，其它抛光剂均不行。一般供料量为1滴/秒， $T_{\text{热}} = 45^{\circ}\text{C}$ ，压力：5磅/英寸²，采用红外仪测量温度。

据称，美国联合碳化物公司GGG晶体长得最好，每月生产2000片，1985年将要增加到20000片。国外用GGG单晶生长制作磁泡基片在1972年就有报道。在美国，3英寸GGG基片已有商品出售，1980年春，在英国出售直径为3英寸GGG单晶生长专利。日本日立金属株式会社也出售GGG基片。目前有关GGG生长及完理性方面的研究很多，从1972年到目前已有约200多篇文章发表，在熔体中自然对流与强迫对流耦合效应、掺杂、工艺问题、设备、应用等方面均有许多独特见解。

(3) 磁性外延膜制备

目前在GGG单晶体基片上生长磁泡材料外延膜，常采用等温液相外延法，用这种方法可以获得较好的外延膜，并且工艺重复性好。这一道工序直接影响到器件性能，所以十分重要，现将等温液相外延工艺流程列于图6。

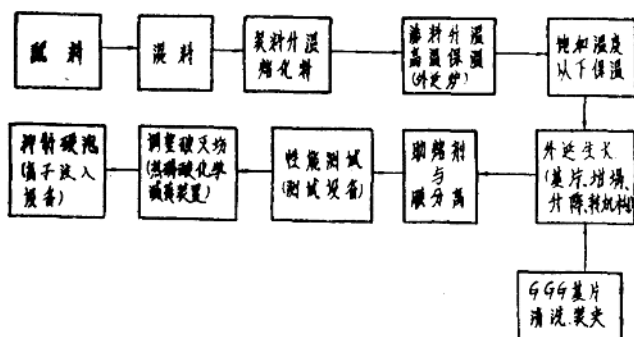


图6 磁泡材料外延工艺流程

配料应在洁净房间内进行，配料材料必须要采用高纯原材料，混料时要防止原料飞散。升温、保温及降温也必须严格掌握，外延生长是关键的一步，为了获得一致性好的膜，在外延过程中，必须适时调整温度、外延时间及基片转速等，以控制生长速度基本不变，保证外延膜的性能不变。生长结束时，利用基片高速转动机构，使粘附在基片上的熔体在未凝固时甩掉。再有就是对外延膜进行性能测试，性能的测试项目很多，有膜的磁参数（ $4\pi M_s$ 、 H_c 、迁移率、各向异性场、居里温度等）、膜厚及其膜成分和杂质浓度分布、结晶结构、成泡场、破灭场、泡畴直径等。

(4) 芯片制备

芯片（图7）是磁泡器件的核心。芯片的制备曾采用控制导体、传输用坡莫合金、检测用坡莫合金三次掩模工艺，也有采用控制导体、传输检测用坡莫合金二次掩模工艺。这说明芯片的制作工艺因结构变化而更加简化，这也是磁泡器件优于半导体的一个主要之点，具体的制备工艺见图8。近年来，磁泡技术的发展很快，在芯片的制造方面，如象在芯片功能图形设计上，一方面提高制版光刻设备的分辨能力，一方面改进功能图形，采用计算机辅助设计、光笔改图。而在掩模制造、光刻、刻蚀剂、划片等方面的进展也很快，改进也很多，这里就不一一赘述了。

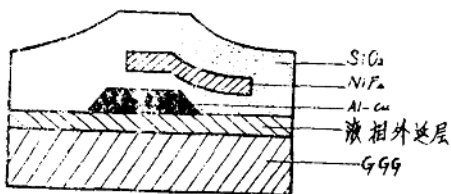


图7 磁泡芯片剖面示意图

(5) 后工艺

所谓“后工艺”是指装架、焊接与封装，它的目的是使芯片与外壳之间有良好接触，芯片、旋转磁场线圈、偏磁场恒磁铁等部件得以保护，使器件经封装后的工作稳定可靠。随着器件结构的完善和复杂化和多样化，封装工艺也有发展，双列直插式封装便是一种新的磁泡器件封装工艺。

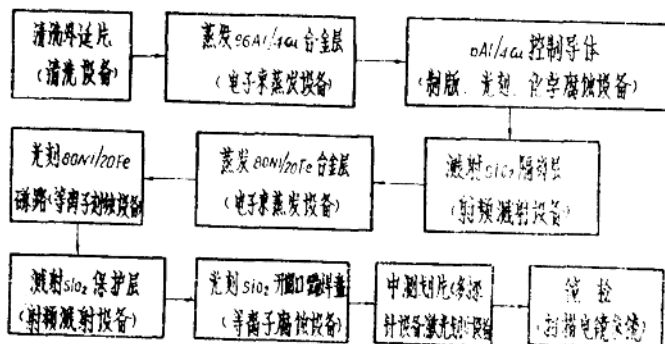


图8 两次掩模工艺流程

(6) 测试

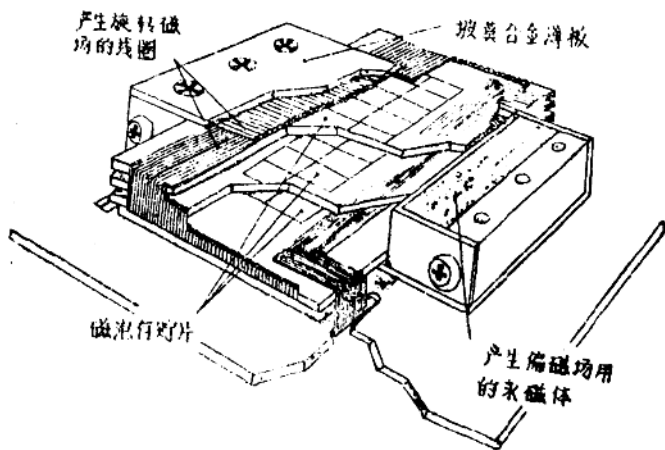


图9 磁泡组件

经过上述各工序后，再进行一些其它的辅助工作，即可装成磁泡器件（图9）(25)。为了保证产品合格（质量、性能、可靠性、一致性等），以及预防万一，还要对组装后的器件各参数进行测试。器件的测试是批量生产的重要环节。系统制造厂家在有源元件插入印制电路板之前，均要进行正常的预测。对器件进行完整的特性测试，可采用专用设备（如象价值5000—100000英磅的一种磁泡测试设备），也可采用简易设备。对于批量测试，则一般采用计算机控制下自动测试，或用计算机控制微处理器进行测试，这样既可以减少工作量，其测试也准确、迅速。