

高等学校教材

磁记录 物理与材料

金秀中 鲍元恺

华中理工大学出版社

内 容 提 要

本书系统地论述了磁记录和存贮技术的物理原理，重点地介绍了各种磁记录用的材料和材料物理、性能。全书共分八章。首先介绍了磁记录与磁存贮技术的基本概念、种类及其应用，接着从理论上详细地讨论了表面磁记录中的磁头磁化场、磁介质的记录磁化过程、磁记录方式、重放特性、介质材料、磁头和磁头材料，最后讨论了垂直磁记录和光磁记录的基本特性。

本书是高等院校理工科电子类材料及元件专业、磁学和磁记录专业的教学用书，也可供有关教师、研究生和专业科技人员参考。

磁记录物理与材料

金秀中 鲍元恺

责任编辑 傅岚亭

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷

开本：787×1092 1/32 印张：12.625 字数：280 000

1990年11月第1版 1990年11月第1次印刷

印数：1-1 500

ISBN 7-5609-0445-2/TM·30

定价：2.50元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部的工科电子类专业教材1986~1990年编审出版规划,由电子材料与固体器件教材编审委员会电子材料与元件教材编审小组征稿,推荐出版,责任编委张有纲。

本教材由华中理工大学金秀中担任主编,成都电子科技大学陈巧生担任主审。

本课程的参考学时数为60~70学时,其主要内容为磁性记录的基本理论和材料物理、基本性能两大部分,故定书名为“磁记录物理与材料”。在简要地介绍磁记录与磁存储的特点、种类后,重点讨论了目前应用最广泛的纵向表面磁记录技术的基本理论;环形磁头缝隙磁化场分布的各种理论计算和数值计算,磁记录介质磁化过程中的自退磁效应,交流偏磁记录原理,数字式编码记录方式,磁记录重放过程的计算方法和各种损失。其次,对适合于高密度磁记录的垂直磁记录和光磁记录也进行了较详细的分析、论述。在材料部分中,介绍了各种磁记录介质材料和磁头材料。使用本教材时,可以根据各学校安排的学时数和科研特点,适当地进行删节、调整。配合教学实验,有利于提高教学效果。

本教材共分八章,由金秀中编写第二、三、五、八章,鲍元恺编写第一、四、六、七章,金秀中统编全稿。参加审阅工作的还有何华辉、过壁君等同志,都为本书提出了许多宝贵意见,这里表示诚挚的感谢。由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 磁记录与磁存贮

§ 1.1 概述	(1)
一、铁氧体磁心存贮器的存贮原理	(2)
二、磁性薄膜存贮器的工作原理	(5)
三、磁泡存贮技术简介	(7)
四、磁表面记录和存贮技术简介	(10)
§ 1.2 磁记录的模式和特点	(16)
§ 1.3 磁记录技术的应用和发展	(20)

第二章 环形磁头缝隙磁化场分布的计算及实验测定

§ 2.1 有缝隙的磁路计算	(24)
§ 2.2 理想环形磁头缝隙磁化场分布的计算	(26)
一、安培环路法	(27)
二、磁荷法	(29)
三、格林公式法	(36)
四、磁势的富里哀变换法	(40)
五、保角变换法	(47)
§ 2.3 实际磁头缝隙磁化场分布的数值计算和实验测定	(57)
一、有限差分法对磁头缝隙及附近磁势分布的数值计算 ..	(58)
二、磁头缝隙磁化场分布的实验测定方法	(63)
三、数值计算和实验结果的分析	(68)

第三章 磁介质的记录磁化过程

§ 3.1 记录介质的局域性磁化和自退磁现象	(76)
------------------------------	--------

§ 3.2	模拟式磁记录及其自退磁场的理论计算	(80)
§ 3.3	数字式磁记录及其自退磁场的理论计算	(86)
一、	阶跃式磁化分布	(91)
二、	线性磁化分布	(92)
三、	反正切磁化分布	(94)
§ 3.4	记录介质磁化分布的动态分析和理论计算	(98)

第四章 磁记录的方式

§ 4.1	偏磁记录方式	(106)
§ 4.2	无磁滞磁化	(110)
§ 4.3	交流偏磁记录原理 (Preisach模型)	(117)
§ 4.4	图像记录方式	(131)
§ 4.5	数字编码记录方式	(137)
一、	调频制 (FM) 或双频制 (FD)	(140)
二、	调相制 (PM) 或相位编码制 (PE)	(140)
三、	改进调频制 (MFM) 或延迟调制记录制 (DM)	(141)
四、	改进型MFM制 (M^2 FM或 M^2)	(141)
五、	成组编码制GCR (4/5)	(141)
§ 4.6	脉冲编码调制(PCM)记录方式	(147)

第五章 重放过程

§ 5.1	镜像法原理	(151)
一、	磁头磁阻的计算	(156)
二、	磁头线圈中磁通及感生电压的计算	(161)
§ 5.2	互易性原理	(167)
§ 5.3	记录损失	(174)
一、	缝隙损失 L_s	(174)
二、	磁层厚度损失 L_d	(178)

三、记录间隙损失及重放间隙损失 L_g	(178)
四、方位角损失 L_a	(179)
五、记录自退磁损失 L_d	(180)
六、重放过程中的低频损失——轮廓效应	(182)
七、磁头铁心损失 L_e	(184)
八、其它损失	(185)
§ 5.4 数字式磁记录的重放	(186)
§ 5.5 噪声的来源和复印效应	(202)

第六章 磁记录介质材料

§ 6.1 磁性微粒理论	(210)
一、单畴临界尺寸的估计	(211)
二、超顺磁性	(214)
三、磁性微粒的磁化	(219)
四、粒子集合体的特点	(228)
§ 6.2 氧化物磁粉	(231)
一、 γ - Fe_2O_3 磁粉	(231)
二、 CrO_2 磁粉	(239)
三、包钴的 γ - Fe_2O_3 磁粉	(241)
§ 6.3 金属和合金磁粉	(245)
§ 6.4 磁粉的特性和涂布型磁介质	(248)
一、磁粉的特性	(248)
二、磁浆的特性	(252)
三、涂布工艺和涂布型磁介质的性能	(254)
§ 6.5 薄膜型磁介质	(260)
一、氧化铁薄膜的制备	(260)
二、金属和合金薄膜的真空蒸镀制备	(263)
三、Co-P 和 Co-Ni-P 薄膜的制备	(266)

第七章 磁头和磁头材料

§ 7.1 金属和合金磁头材料.....	(271)
一、坡莫合金	(271)
二、铁硅铝合金	(275)
§ 7.2 铁氧体磁头材料.....	(280)
一、热压铁氧体磁头材料	(281)
二、热等静压铁氧体磁头材料	(285)
三、单晶铁氧体磁头材料	(287)
四、取向尖晶石多晶铁氧体磁头材料	(290)
§ 7.3 非晶态磁头材料.....	(292)
§ 7.4 磁头性能与磁头材料性能间的关系.....	(300)
一、磁头的有效磁导率	(300)
二、磁头的漏磁计算	(301)
三、磁头的磁阻和阻抗计算	(307)
四、磁头的效率、灵敏度和信噪比	(311)
§ 7.5 磁头的设计和制造.....	(314)
§ 7.6 其它类型的磁头.....	(320)

第八章 新型磁记录

§ 8.1 磁存贮器的磁道格式和技术指标.....	(331)
一、磁盘存贮器的磁道格式	(331)
二、存贮器的技术指标	(334)
§ 8.2 提高纵向磁记录密度的途径和限制.....	(340)
一、位密度的提高途径和限制	(340)
二、道密度的提高和限制	(344)
三、圆形磁化模式	(345)
§ 8.3 垂直磁记录及其特点.....	(348)

一、垂直磁记录用磁头	(351)
二、垂直磁记录介质	(353)
§ 8.4 垂直磁记录的实用性研究	(355)
一、垂直磁记录磁介质的研究	(356)
二、垂直磁记录磁头的研究	(364)
三、垂直磁记录的理论研究	(367)
§ 8.5 光磁记录	(381)
参 考 文 献	(391)

第一章 磁记录与磁存贮

磁记录和磁存贮技术是随着科学技术的不断发展而形成的一门先进技术。本章叙述磁记录和磁存贮的发展情况。概略地介绍各种磁记录机构和存贮元器件的基本工作原理，磁记录和磁存贮方法的基本特点及其应用情况。

§ 1.1 概 述

人类发明纸和笔是为了帮助大脑来记忆和存贮信息的。随着社会的进步、科学的发展，存贮信息的方法不断得到改进和更新，以满足社会各种信息日益增长和交流的需要。磁性存贮元件的出现和应用使人类记忆和存贮信息的技术更加先进、更加完善，它是电子计算机的基础，又在推动电子计算机技术不断地进步。

铁磁性材料的磁化特性中有磁滞现象，表现为磁场强度 $H = 0$ 时的磁化状态（用磁感应强度 B 或者磁化强度 M 来描述）与磁化的历史有关。当铁磁体为磁中性状态时，则 $B = 0$ ， $M = 0$ ；当铁磁体原先受到过正向磁场作用后，可得一个剩磁状态 $+B_r$ （或 $+M_r$ ）当铁磁体原先受到过负向磁场作用后，可得到一个剩磁状态 $-B_r$ （或 $-M_r$ ）。而且原先所受到的磁化场大小不同，则所得到的剩磁状态 $|B_r|$ 的大小也不同。这些状态都是 $H = 0$ 时的稳定状态，具有记忆的特性。磁记录和磁存贮都是利用磁性材料的这种特性来记忆和存贮信息的。

需要记忆和存贮的信息，可以是随时间连续变化的（如声音、图象、各种物理量的改变等），也可以是数字分立式的。前者可称为模拟信息，后者则称为数字信息。磁记录技术首先被用于记录声音，以后又用于记录视频图象、计测各种物理量的连续变化。磁存贮技术以记忆和存贮电子计算机中的二进制信息为目的，研究生产出了磁心存贮器、磁性薄膜存贮器、磁鼓、磁带、磁盘存贮器，后来又发展了磁泡存贮器和磁光存贮器等。随着记录存贮技术的发展，模拟式磁记录也在逐渐向数字式量化记录的范畴扩展，互相交错。目前，磁记录存贮技术已成为当代由工业化社会向信息化社会过渡时一门必不可少的尖端技术。

为了说明数字信息和模拟信息的记录存贮原理，我们以铁氧体磁心存贮器、薄膜磁存贮器、磁泡存贮技术以及磁表面记录存贮技术等几部分按顺序分别概略地介绍如下。

一、铁氧体磁心存贮器的存贮原理

在电子计算机中，最早作为主存贮器工作的是磁心存贮器。将矩磁性材料制成的环形磁心排成矩阵形状，构成磁心板，然后穿过 x 、 y 读写驱动线和读出线等，再将这种磁心板按所需要的数量叠装组合起来，构成存贮器的磁心体。它长期运行时的可靠性高，不论信息的存贮位置如何，均能以较高的速度写入或者读出信息，是一种较好的随机存取型存贮器。

矩磁性材料是指一类磁滞回线接近于矩形、剩余磁感应强度 B_r 高（即剩磁化 $R_r = \frac{B_r}{B_m} \approx 1$ ，其中 B_m 为工作时的最大磁感应强度）、矫顽力 H_c 适当地大的磁性材料。如冷轧钼坡莫合金、Mn-Mg 铁氧体、锂铁氧体等。为了使存贮器小型化、存取

速度快，常用直径为 $0.25\sim 0.5\text{mm}$ 、高频特性好的铁氧体材料制作环形磁心，便于大批量生产、降低成本。图1.1示出磁心典型的矩形磁滞回线和读写原理。让磁心在 $H=0$ 时的两种稳定的剩磁状态 $+B_r$ 和 $-B_r$ 分别与二进制数码“1”和“0”相对应，这样就可以利用磁心的磁状态来记忆二进制信息，每个磁心寄存一位信息。

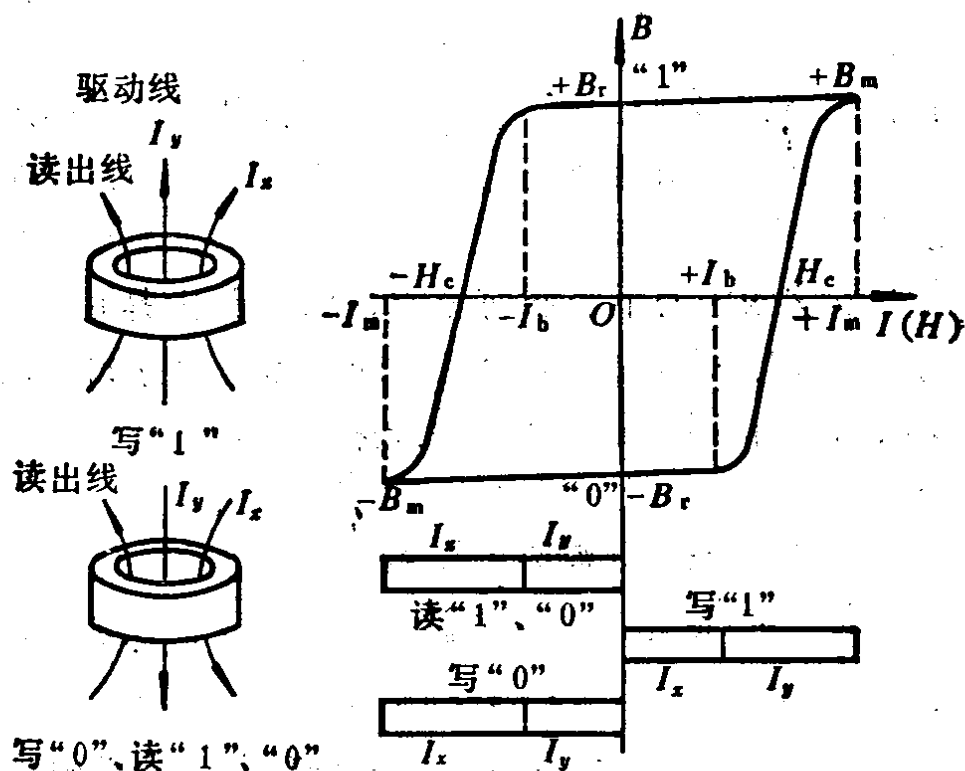


图1.1 磁心存贮器的矩形磁滞回线及读写原理

信息的存取过程可分写入过程和读出过程两部分，它们由读写驱动线及读出线来完成。读写驱动线（又称为信息地址线） x 、 y 穿过磁心构成磁化线圈，按照选址要求通入地址电流脉冲来磁化磁心，其每根线的脉冲幅值均为 $I/2$ ，它比磁化状态临界翻转电流 I_b 要小，比 $I_m/2$ 要大（ I_m 为产生饱和磁化场所需要的最大磁化电流）。写入“1”时， x 、 y 线上同时有

同方向的正脉冲通过，产生超过矫顽力 H_c 的磁场强度，从而使脉冲过后磁心达到 $+B_r$ 状态，即处于“1”状态。为了读出所记忆的内容，需要 x 、 y 线上同时有同方向的负脉冲通过，产生超过矫顽力 H_c 的负向磁场强度。如果该磁心原来记忆的内容为“1”，在此磁场作用后，磁化状态由 $+B_r$ 变成为 $-B_r$ ，磁化状态的翻转就会在读出线构成的感应线圈上产生感生输出电压；如果该磁心原来记忆的内容为“0”，在此磁场作用下，磁化状态只是由 $-B_r \rightarrow -B_m \rightarrow -B_r$ ，因为 $-B_m \approx -B_r$ ，其磁通几乎不变，故不会产生感应电压。因此，可以根据读出线上是否有感应电压输出来判断记忆的内容是“1”还是“0”。对于那些 x 、 y 线上不同时出现同方向电流脉冲的磁心，其磁状态都不会改变，故这些磁心不受任何影响。 x 、 y 线上是否同时通过同方向电流脉冲，是由读写信息地址选择驱动方式所控制的。这也反映出为什么要用 x 、 y 两根线来磁化驱动磁心的理由（ x 、 y 相当于一个二维平面上某地址点的坐标）。

应当指出，上述的读取信息操作对磁心的磁化状态是破坏性的，读取“1”信息后的磁心就变成了“0”。这样的存贮器被称为破坏性读出存贮器。为了恢复到读出以前所记忆的状态，必须读后立即重写。为此，要求选择对那些读出是“1”的地址磁心重新在读写驱动线上通以正向电流脉冲，使该磁心的磁化状态再由 $-B_r$ 状态翻转恢复为 $+B_r$ 状态。

磁心存贮器虽然可以实现随机存贮，可靠性高；但也存在一些缺点：磁化翻转速度不能太快，磁心的性能必须经过严格挑选，穿心布线工艺比较复杂，消耗功率较大，存贮器体积庞大，读出后必须重写。因此在现代的电子计算机中，已被更先进的半导体存贮器所取代。但是这种矩磁性材料的记忆和开关特性仍然有着广泛的应用前景。

二、磁性薄膜存贮器的工作原理

磁性薄膜存贮器，是采用真空蒸镀、电镀沉积等方法制备的坡莫合金薄膜作为数字信息高速存贮介质的器件。在该合金薄膜的制备过程中，施加了磁场处理，使该薄膜的膜面方向上呈现以原磁场处理方向为易磁化轴的感生单轴磁各向异性。结果，沿易磁化轴磁化时具有矩形磁滞回线的特性；而沿与它垂直的难磁化方向磁化时，则具有线性磁化特性（图1.2）。可以利用这种感生单轴磁各向异性，根据该易磁化轴上磁化矢量的不同取向来存贮二进制的信息。

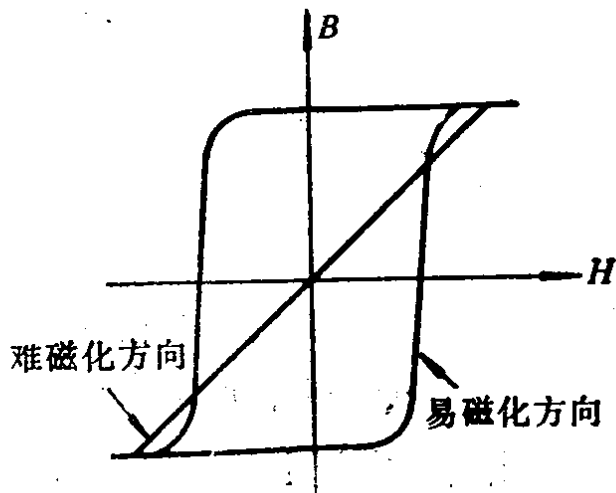


图1.2 磁性薄膜膜面内的磁化特性

磁性薄膜存贮器从结构上可分为磁环线存贮器和平板状薄膜存贮器两种。平板型薄膜存贮器的结构如图1.3所示。在 $0.05\sim 0.2\text{mm}$ 厚的玻璃基板上或者在涂有绝缘层的抛光金属板上镀有膜厚约 200nm 的坡莫合金膜，将合金膜刻蚀成 $n\times n$ 个矩阵块，每块面积约 1mm^2 ，紧贴在基板的两面分别布有字线、位线和读出线（它们也是一些薄膜，但是电导体）。其中平行于磁性膜易磁化轴方向的是字线，通以字电流脉冲，在难磁化轴方向的是读出线和位线，位线通以位电流脉冲，读出线可输出磁通变化时所感生的电压。

磁性薄膜存贮器的工作方式与磁心存贮器基本相同。规定易磁化轴方向的正负两种磁化状态与“1”和“0”数码相对应，利用读出线上的感生输出电压的正负脉冲来判断存贮的数

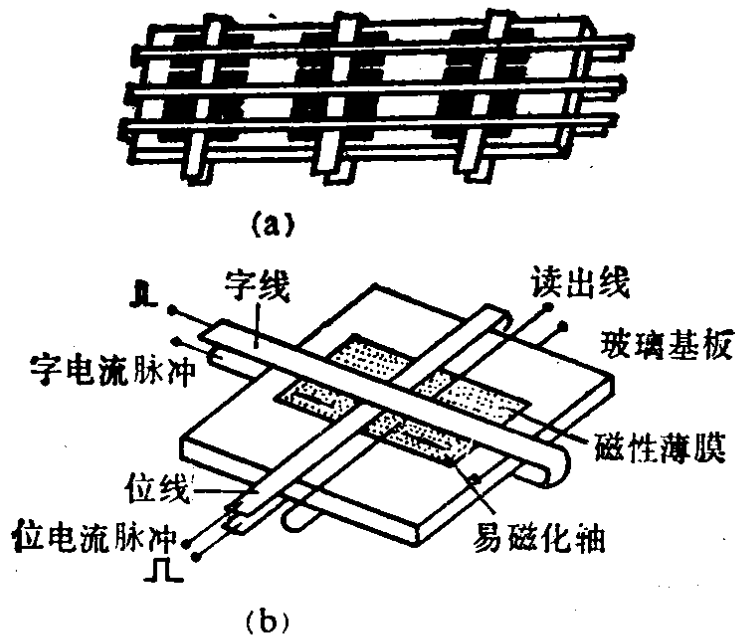


图1.3 平板型磁性薄膜存贮器

(a) 薄膜存贮矩阵; (b) 存贮单元的结构

息。读出时，字线上的字电流脉冲使磁性薄膜中的磁化矢量从易磁化方向转向难磁化方向，与读出线相交链的磁通随时间发生变化，就产生与存贮信息相对应的电压脉冲；写入时，当加在字线上的字电流脉冲切断的时刻，相应于不同的存贮信息在位线上加正或负的电流脉冲，以控制转到难磁化方向的磁化矢量向易磁化轴复位时的取向。由于薄膜在难磁化方向的磁化特性不具有磁滞性能，磁化矢量总是迅速地向易磁化方向复位，因此可以实现非破坏性读出。

磁环线存贮器是在金属细线的外表面均匀镀上一层坡莫合金薄膜。和平板状薄膜相比，圆周方向的磁路是闭合的，所以退磁场不存在，轴向方向的退磁场也较小，故只要较小的驱动电流即可。输出电压可以通过增加镀膜的厚度适当提高。心线本身可作为一条驱动线，另一条驱动线则与平行排列的存贮器磁环线相交，并将它们包围起来。按照磁性薄膜的易磁化轴位

于轴向或圆周方向又可分为轴向方式和圆周方式两种。工作原理和平板状磁性薄膜存贮器基本相同。

磁性薄膜存贮器具有许多突出的优点，如磁化翻转主要通过磁化矢量的转动，而不象铁氧体磁心依靠畴壁位移来进行，故开关速度要高出一个数量级以上，可以实现非破坏性读出，没有重新写入的步骤，这对简化控制系统、提高存取速度有利；存贮介质的居里点高（可达 600°C ），信息存贮的稳定性、可靠性高；存贮元件的体积小，表面积与体积之比大，高速运行时的自发热效应可以忽略，温度特性好，适合于大批量生产，布线工艺简单，不必象铁氧体磁心那样进行穿线布线。但也存在一些问题，如时效引起的性能变化，磁路有开路状态出现，相邻元件之间的干扰较明显，使其可靠性不如磁心存贮器，元件在性能上不能象磁心那样通过严格筛选来控制，致使批量生产有些不过关。但人们在不断地进行改进，取其超高速的非破坏性读出记录存贮优点，克服其缺点。目前正在向多层耦合膜方向发展，通过调节磁性膜之间相互的耦合作用和矫顽力，以满足记录存贮性能的需要。在材料方面也不再限于坡莫合金，加工方面也不再限于电镀法，这些都加速了对薄膜性材料的研究，为磁性记忆元件的发展和应用开辟了新的道路。

三、磁泡存贮技术简介

磁泡存贮技术是20世纪70年代才开始出现的一种新型高密度存贮技术，发展十分迅速，其中有的部分已进入实用阶段。

磁泡是一种微小圆柱形磁畴。美国贝尔研究所的博贝克(Bobeck A H)，在正铁氧体、石榴石等铁氧体材料的垂直磁性薄膜上首先得到了这种微小圆柱形磁畴。垂直磁性薄膜中磁化矢量的易磁化轴垂直于膜面，并且满足条件：

$$H_k = \frac{2K_u}{\mu_0 M_s} \geq H_d = M_s \quad (1-1)$$

其中， H_k 为材料垂直于膜面方向的磁各向异性等效场； K_u 为磁各向异性常数； M_s 为材料的饱和磁化强度； H_d 为垂直于膜面方向的退磁场。这样，薄膜的自发磁化矢量就总是垂直于膜

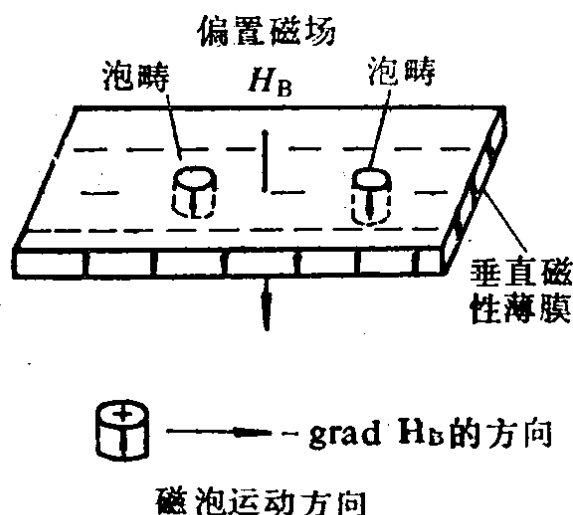


图1.4 磁泡畴

面而稳定取向。如果在垂直于膜面方向施加适当大的偏置磁化场 H_B ，就可在薄膜中产生一些磁化矢量与外场方向相反的圆柱形磁畴，利用材料的光透性，借助于法拉第效应偏光显微镜法，可以观察到这些磁畴象气泡一样（图1.4），故称为磁泡。

实验发现，磁泡畴的形成与偏置磁场 H_B 的大小有关。当 H_B 较小时，薄膜中只能出现一些象蛇形的带状畴；当 $H_B \geq H_c$ （称为成泡场）时，磁泡的直径大小随 H_B 的增大而减小；当 $H_B \geq H_d$ （称为破灭场）时，磁泡就会突然破灭而消失。另外，如果 H_B 沿膜面方向的分布不均匀，存在磁场梯度时，磁泡就会沿着这个磁场梯度相反的方向移动。当然， H_c 、 H_d 、磁泡直径的大小和磁泡迁移率的大小都与磁泡膜材料的性能有关。

根据上述特性，博贝克首先提出用它制作存贮记忆元件的思想。由于磁泡畴能在薄膜材料中稳定存在，若把传输磁泡的线路也制作在材料表面上（用坡莫合金薄膜制作），使磁泡畴适当地排列，令有泡的地方表示“1”，无泡的位置代表“0”，