

源自软磁畴段的布洛赫线链行为研究

韩宝善[†]

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2017-04-06收到

[†] email: bhan@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20170603

The behavior of vertical-Bloch-line chains originating from a group of soft domain segments

HAN Bao-Shan[†]

(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

摘要 在从1967—1992年连续25年研制固态磁存储器的故事中，中国没有缺席。1970年代初，中国科学院物理研究所磁学室磁泡组11个人从生长基片单晶，制备单晶磁泡薄膜和进行磁泡测量三方面开始磁泡材料的研制。当时文章作者负责测量，设计制作了磁泡测量装置。为了表征磁泡薄膜，发现了含有“一盘”软磁畴段的H图形，并找到了“脉冲偏磁场作用下硬磁泡的形成”的研究课题。这使作者在1980年代初经受住了磁泡下马的冲击，迎来了1983年布洛赫线存储器方案的提出，发觉已具有研究其机理的条件，最终成为该存储器的终结者，并在1991年国际 *J. Mag. Mag. Mater.* 杂志第100纪念卷中荣幸地为“China”占了一席之地。从1992年以来，时间又过去了25年，但活生生的磁泡总在，当年报废的磁泡测量装置已经更新。盼望大学生和刚入门的研究者喜欢这台能显示赏心悦目的磁泡畴运动，能生动阐述铁磁学物理基础的研究导向性的物理实验设备。

关键词 石榴石磁泡薄膜，磁泡，磁泡存储器，布洛赫线链，布洛赫线存储器

Abstract In the story of the worldwide investigation and fabrication of solid magnetic memories during the period from 1967 to 1992, China was not absent. In the early 1970's, eleven people in the group of magnetic bubbles at the Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, began to investigate garnet bubble films. At that time the author was responsible for measuring the films, and thus designed and constructed a bubble measurement apparatus. To characterize these films, a group of soft magnetic segments, the so-called H pattern, was found, and a project to form hard bubbles by pulsed bias fields was established. This enabled the author to withstand the impact of the decision to abandon magnetic bubble memory research in the early 1980's, and then to learn the vertical-Bloch-line memory scheme put forward in 1983. The scheme made the author realize that we already had the conditions to study its mechanism, and, as a result, our papers signaled the end of vertical-Bloch-line memories. Finally, we were invited to present a review for the 100th commemorative volume of the *Journal of Magn. Magn. Mater.* in 1991; the article was one of the total of 32 invited reviews and the only one signed "China".

Since 1992, 25 years have passed. However, the lively bubble domains still exist and the once scrapped bubble apparatus has been renovated. It is hoped that college students and those newly entering the field of magnetism and magnetic materials will enjoy this research-orientated apparatus, which can show the vibrant moving bubbles and be used to explain the fundamental theories of ferromagnetism.

Keywords garnet bubble films, magnetic bubbles, magnetic bubble memory, vertical-Bloch-line chains, vertical-Bloch-line memory

1 *J. Mag. Mag. Mater.* 杂志第一百纪念卷的邀请评论文章

1991年,在苏格兰Edinburg举行的国际磁学会议 International Conference on Magnetism (ICM' 91)上,国际磁学和磁性材料杂志*J. Mag. Mag. Mater.* 宣布了即将出版的第一百纪念卷邀请评论的名单。在这由当时国际上“磁学各个领域的领先科学家”撰写的32篇邀请评论文章中,《石榴石磁泡薄膜中硬磁畴垂直布洛赫线链的行为》一文为“China”占了一席之地^[1]。该文所介绍的研究工作成果实际上终结了当时国际上布洛赫线存储器的研制,因而也终结了以美国贝尔实验室Bobeck开创的磁泡存储器(magnetic bubble memory, BM, 1967—1983)^[2]和日本九州大学小西进提出的布洛赫线存储器(vertical-Bloch-line memory, BLM)方案(1983—1992)^[3]为标志的20世纪下半叶连续25年研制固态磁存储器的努力。

2 磁泡,一个研制固态磁存储器的故事

1967年,贝尔实验室的Bobeck提出了固态磁泡存储器的方案,即用磁泡的“有”、“无”来体现信息的“1”、“0”。由于磁泡是圆柱形的磁荷极子,因而能够在外设磁性图型的安排下产生、移动、检出、复制和消灭,从而实现信息的写入、传输和读出。磁泡存储器方案在当时轰动了国际磁学界。后来研制出了液相外延单晶石榴石

磁泡薄膜材料,使得磁泡存储器可以采用半导体平面工艺来制作,而且远景是可以制得 16 Mb/cm^2 的单芯片器件。别看这个存储密度和容量微不足道,但在上世纪60年代半导体存储器件只有几十Kb时是了不起的。再加上电存取,磁存储器固有的信息非易失性和耐恶劣环境,因而国际磁学界和微电子界很快掀起了研制磁泡存储器的热潮。在研制磁泡存储器的全盛时期,国际上三大磁学会议(美国MMM, INTERMAG和ICM)上竟有高达40%的论文属于磁泡材料、器件、物理和计算机模拟。在很多年里,磁泡一直是热门,也生产出了存储密度为 4 Mb/cm^2 ,容量为4 Mb的单芯片磁泡存储器产品,但终因其极限密度低(16 Mb/cm^2),在半导体快速发展的强烈竞争下于80年代初被放弃。然而单晶磁泡薄膜是透明而完美的,磁泡是美丽而又能运动的,所以在学习物理,阐述铁磁学的基础(即铁磁体的自由能和铁磁畴理论)方面磁泡具有永远的魅力。

在无磁性的单晶钆镓石榴石($\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$)基片上,用液相外延方法生长的磁泡薄膜有零点几微米到几微米厚。由于具有垂直于膜面的生长感生单轴各向异性,因而垂直膜面方向成为磁化矢量 M 的易磁化方向。当单轴各向异性有效场大于 M 垂直于膜面导致的退磁场时,磁畴的 M 就能稳定地保持在垂直膜面方向。但单畴的退磁能太大,为了降低退磁能,就必须在不增加单轴各向异性能的前提下分畴。但分畴不会无限进行,因为畴壁的形成会导致畴壁能的增加。在外加静态偏磁场 $H_b=0$ 时,最后的平衡态是如图1(a)所示的“迷

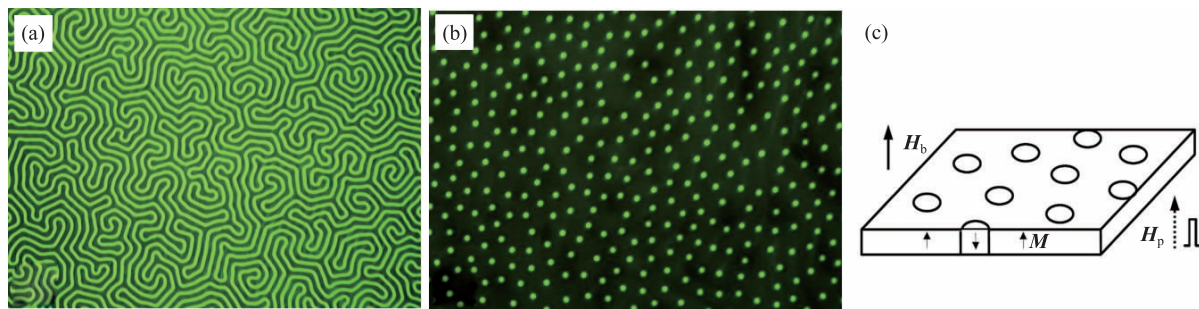


图1 (a)在绿色滤波片后单晶石榴石磁泡薄膜的迷宫畴,图片底边长0.7 mm; (b)圆形磁泡群,图片底边长0.5 mm; (c)磁泡薄膜和磁泡示意图,示出了磁泡内外磁化矢量 M 的取向,以及静态偏磁场 H_b 和与之平行的脉冲偏磁场 H_p 的方向

宫畴”，其相邻条状畴宽度相同，但 M 方向相反，条状畴宽度则由材料特性决定。显示和观察磁泡畴用的是偏光显微镜。调节光路中检偏器和起偏器的夹角就可使图1(a)迷宫畴中的相邻条状畴分别呈黑色、白色，或反之。

为了产生磁泡，需要切断条状畴。由于迷宫畴排列紧密，通常是先施加一个适当大小的 H_b 使迷宫畴变得稀疏些，然后再用一个矩形脉冲偏磁场 H_p 切断之。在较小的 H_b 下，施加适当 H_p ，切出的磁泡群示于图1(b)。在偏光显微镜下，磁泡呈圆形，因薄膜有厚度，因而是圆柱状的；因薄膜几近完美，矫顽力小至0.5 Oe，因而在 H_p 的磁场梯度中能运动，运动起来像水泡，故称为磁泡。通常设定磁泡的 M 方向与 H_b 相反，并使磁泡呈白色，如图1(b)所示。图1(c)是磁泡薄膜、磁泡和外加 H_b 、 H_p 方向的示意图。

3 简单的磁泡测量装置

实际上，中国科学院物理研究所(以下简称物理所)的布洛赫线(VBL)链行为研究是在一台自制的简单装置上完成的。

1970年代初，磁泡组要建立磁泡测量实验室为磁泡薄膜研制配套，主要任务是建立磁泡测量装置。当时手头只有普通的偏光显微镜，要从设计、制图、工厂加工开始，改装显微镜，绕制Helmholtz线圈组建立 H_b 系统，用 $\phi=0.1$ mm漆包线绕制内径为1 mm的10圈扁平小线圈，并制作样品架建立 H_p 系统，还自制了照明用的氙灯光

源。然而，图2(a)的旧装置虽然外观简陋，但内在质量高，好用。

2007年兰州大学物理系魏福林教授建议我们改造报废的旧装置，以便把活生生的磁泡纳入他们的物理实验和铁磁学教学中。我们采用了摄像头、光纤传导的成品氙灯光源、改型的脉冲发生器，特别是济南友人于勇先生设计制作了纳入高稳定性直流电源和5位数字电表的控制器，为兰州大学实行了更新。后来在电子科技大学微电子与固体电子学院以及钢铁研究总院功能材料研究所引进该装置时，改进了样品架设计，使脉冲小线圈能便利地紧贴在磁泡薄膜上。电子科技大学装置的照片示于图2(b)。

4 美丽的H图形

磁泡测量装置建立后，首要任务是对组里研制出来的液相外延单晶石榴石磁泡薄膜进行表征，即测定两个主要参量，特征长度 l 和饱和磁化强度 $4\pi M$ 。按照磁泡理论^[4]，测得磁泡薄膜的厚度 h 后，只要准确测出磁泡薄膜的条状畴周期 P_0 (即两倍的条状畴宽度)和正常磁泡(软磁泡)的缩灭场 H_0 ，就能查表得到。前者用 $H_b=0$ 下的迷宫畴，施加系列小振幅的 H_p 使之局部平行排列，再用测微目镜和1 mm标准尺校准就能测出，后者则需要在脉冲小线圈的1 mm内径里产生相当数目的能同时缩灭的软磁泡。

这不是一件容易的事。起初，在 H_b 和 H_p 联合作用下常常会形成硬磁泡。硬磁泡的主要特征是其缩灭场 H_{col} 大于 H_0 ，且分布在一个从 H_0 到硬磁泡最大缩灭场 $(H_0)_{max}$ 的范围内。不断摸索后终于在小线圈里找到了一个全是软畴段的图形，典型的如图3(a)所示。

这“一盘”软畴段是在一个固定的 H_b 作用下，用适当的 H_p 在小线圈内切割条状畴的产物。畴形反映了

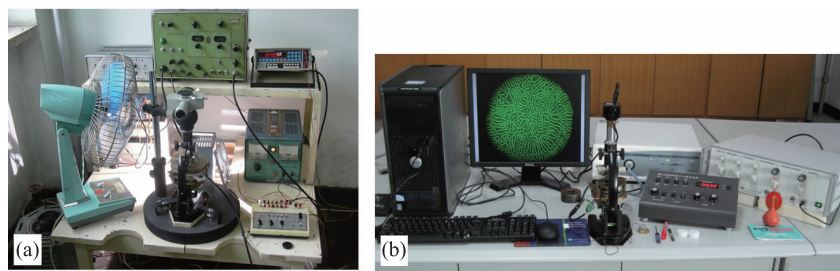


图2 (a)1974—1991年期间物理所磁学室使用的磁泡测量装置；(b)2011年投入使用的电子科技大学微电子与固体电子学院的磁泡显示和测量装置，其电脑屏幕上显示的是一个H图形

小线圈内 H_0 的对称性和径向不均匀性, 美丽得像有着花瓣和花蕾的一朵花。随着 H_0 的升高, 这几十条长短不同的软畴段能在条泡转变场 H_b 作用下一起收缩成圆形软磁泡(图 3(b)), 然后在 H_0 作用下一起缩灭, 由此能准确测定 H_0 , 从而得到准确的 $4\pi M$ 值。从图 3(a) 可见, 这些总数约为 50—70 条的软畴段都是光溜的, 不分枝。经验表明, 如果数目多于此数, 往往有硬磁泡混入, 而少于此数时, 虽然都是软畴段, 但数目不够, 不适于进行需要积累磁泡个数的统计性实验。

实际上, 一旦摸清软畴段形成的规律性, 设定好偏场条件, 这个图形就可以凭经验在几秒钟内产生。而且一旦做完一个实验, 就可升高 H_b , 把盘内残存的磁畴全部缩灭后重新再来。当然, 像万花筒一样, 两个图形不可能相同, 但它们包含的总是一群数目相近、性能一致的畴壁中不含布洛赫线链的软畴段。因此, 我们后来就把这群软畴段作为布洛赫线链行为统计性实验的起点。为了简单起见, 下面就把图 3(a) 称为“H(u) 图形”。

5 “硬泡危机”, 布洛赫线成了麻烦?

1970 年代初, 当我们还在建立磁泡测量装置时, 国际上磁泡存储器的研制正在大步向前, 尤其是美国, 在首创液相外延单晶石榴石磁泡薄膜的基础上迅速采用平面工艺制作磁泡存储器, 磁泡技术突飞猛进。然而, 1972 年却遭遇了“硬磁泡危机”。当时主流技术是在磁泡薄膜表面上光刻一层软磁性 Ni—Fe 巨莫合金图型的“轨道”, 如 T—I 图型, 再施加一个平行于膜面的旋转磁场, 使 T—I 图型端部磁极性依次改变, 产生的磁场梯度就能吸引磁泡一步步向前传输。硬磁泡危机指的是传输着的软磁泡会突然偏出运行轨道使传输失败。然而, 贝尔实验室的科学家短期内就

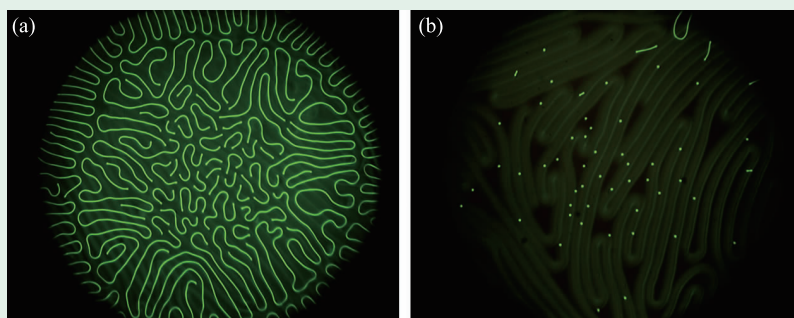


图3 脉冲小线圈 1 mm 内径里完整的磁畴图像 (a) 含有几十条软畴段的一个典型的 H 图形; (b) 条泡转变场 H_b 前收缩成的磁泡, 大多数已是圆形磁泡, 其中故意残存了几条软畴段

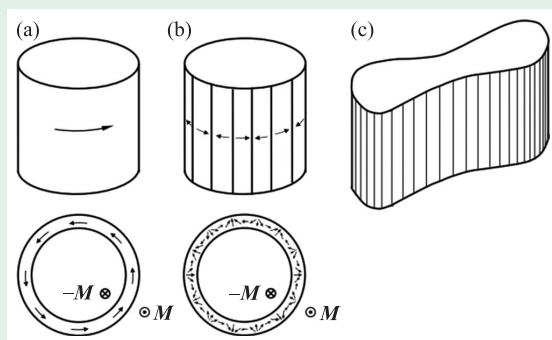


图4 软磁泡、硬磁泡和哑铃畴壁中央磁化矢量取向示意图(立体图和横截面图) (a) 畴壁中没有布洛赫线的一种软磁泡; (b) 含有布洛赫线的圆形硬磁泡; (c) 含有很多布洛赫线的哑铃畴

解决了此危机。他们指出, 偏出轨道是因为软磁泡畴壁内激发了布洛赫线而变成了硬磁泡。在建立硬磁泡理论模型的同时, 他们提出了各种遏制硬磁泡的方法^[5, 6]。最后采用了离子注入法, 即在磁泡薄膜表面用离子注入的方法产生一层极薄的面内磁化层, 用以稳定传输中的软磁泡, 从而遏制了硬化。

磁泡畴的畴壁是布洛赫壁。在软磁泡的横截面中, 畴壁中央以小箭头表示的磁化矢量 M 与畴壁平行, 且沿圆周首尾相连, 如图 4(a) 所示。布洛赫线是布洛赫壁中的微磁结构, 图 4(b) 是激发了布洛赫线的一个硬磁泡示意图, 在横截面图中最多画出了 14 条负布洛赫线。实际上, 畴壁内磁化矢量必须保持连续性, 因而布洛赫线总是成对激发的。从横截面图还可以看到在每根布洛赫线的中心点, 磁化矢量是垂直于畴壁的, 而且这个

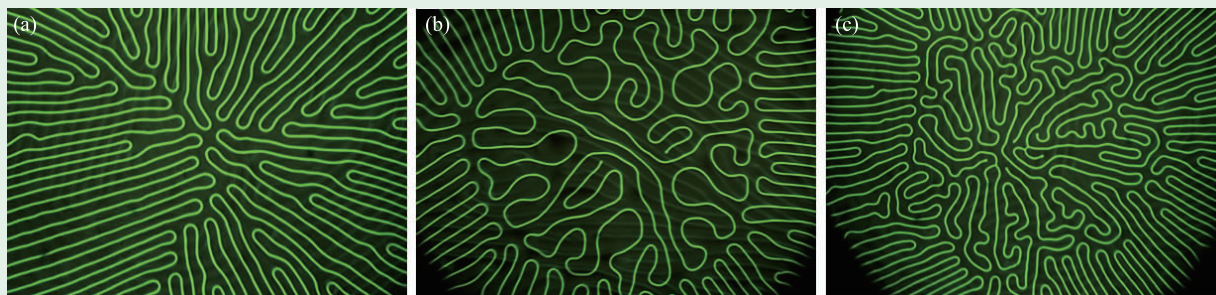


图5 脉冲小线圈1 mm内径里磁泡薄膜典型的(a)“辐射环”畴,底边长0.7 mm; (b)单枝花畴(内有一根有两个头的单枝花畴),底边长0.88 mm; (c)多枝花畴(内有两根多枝花畴,一根是Y形三枝花畴,另一根是π形四枝花畴),底边长0.88 mm

微磁结构贯穿畴泡厚度,因而在立体图上是用一根垂直于磁泡上下底面的直线表示,故称“垂直布洛赫线”。在哑铃畴壁中含有更多的布洛赫线对,如图4(c)立体图所示。当硬磁泡或哑铃畴因 H_b 降低而伸展时,其畴壁中的布洛赫线因静磁和交换作用相互吸引连接成链,称为布洛赫线链。

6 软、硬磁泡形成区在哪里?

硬泡危机激发了我们对布洛赫线的兴趣,当时学习了磁泡畴壁内的各种磁化构型,为日后布洛赫线链行为的研究建立了清晰的物理图像。Nishida等人最早采用脉冲偏磁场法形成硬磁泡群^[7],我们采用和发展了他们的方法。1977年,与刘英烈合作开始用统计的实验方法研究硬磁泡的形成。1978年,与刘英烈和河北师范大学物理系聂向富合作发表了名为《脉冲偏场作用下硬磁泡的形成》的论文^[8]。毛廷德、李靖元、樊世勇和刘英烈发表了论文《垂直布洛赫线在畴段畴壁中的形成和消失》^[9]。1980年代初,磁泡技术走下坡路,并很快被放弃。当时磁泡组也经历了人员离散,经费和课题的困难,但是在物理所和磁学室的支持下,我们努力解决了人力问题和申请了基金,从而坚持了“脉冲偏磁场作用下硬磁泡的形成”的研究。由于改用H图形为实验起点,我们得以探测 H_p 从零增大至把小线圈内所有磁泡动态缩灭的全过程。在具有多种成分的约20个磁泡样品上作了大量实验,并在题目分别为《一次脉冲偏磁场作用下硬磁泡的形成》^[10]和《系列脉冲偏场作用下硬磁泡的形成》^[11]的2篇论文中,全

面揭示了 H_b 和 H_p 联合作用下软、硬磁泡的形成规律,同时也标定了H图形产生的位置。

6.1 实验确定切泡场 $(H_b)_0$,排除枝状畴

对于一个新样品,要得到没有枝状畴段的H图形,就必须先确定合适的 $(H_b)_0$ 。实验中,在 H_b 上叠加一个 H_p ,如果使 H_p 增大至超过某一值 $(H_p)_a$,就能缩灭小线圈内所有磁畴,当 H_p 终止时小线圈内就能形成由线圈外磁畴侵入而形成的“辐射环”畴形,如图5(a)所示,于是称 $H[a]=H_b+(H_p)_a$ 为“磁泡动态缩灭场”。如果总偏场 $(H_b+H_p)<H[a]$,但很接近于 $H[a]$ 时,当 H_p 脉冲结束时小线圈内留下的1—2个磁泡将快速长大,成为无分枝的“单枝花”畴(图5(b))或“多枝花”畴(图5(c)),取决于 H_b 大于或小于被称为“多枝畴生长的临界静偏场”的 $H[d]$ 。实际上, $H[d]$ 就可按图5(b)和图5(c)的形成比率来测定。总之,一方面,要形成无分枝的软畴段, $(H_b)_0$ 必须大于 $H[d]$,另一方面,要得到的是畴段, $(H_b)_0$ 还必须小于 H_{sb} ,因此产生H图形的首要条件是使切泡场 $(H_b)_0$ 满足 $H[d]<(H_b)_0<H_{sb}$ 。

6.2 一次脉冲偏磁场作用下硬磁泡的形成^[10]

在 $(H_b)_0$ 作用下,从H图形出发,固定脉冲宽度 $\tau_p=0.5\mu s$,使 H_p 强度逐渐增加,在每个强度下施加一次脉冲 H_p ,然后测结果,并多次测量,计平均值。由于在所有样品上都观察到了相似的结果,所以只给出标称成分为 $(YSmCa)_3(GeFe)_5O_{12}$

的典型样品1号的实验结果,如图6所示。

从图6(a)可见,当 H_p 小于约40 Oe时,脉冲后畴段数 N_1 与H图形的畴段数(50—70)相仿,表明一次脉冲只使软畴段原地运动;当 H_p 大于约40 Oe时, N_1 陡升,表明软畴段开始被切断,且段数越来越多;当 H_p 大于约53 Oe时虽被切得更细,但伴随的缩灭越来越多,所以 N_1 反而从极大值陡降。

从图6(b)可见,一次脉冲作用下硬磁泡形成几率 P 的极大值只有20%,而且存在一个从 $(H_p)_i$ 到 $(H_p)_0$ 的硬磁泡形成区(以外加的红线段标出),以及从 $(H_p)_0$ 到 $(H_p)_a$ 的软磁泡形成区(以蓝线段标出)。若在图6(a)上把 $H_p \sim 40$ Oe前的 N_1 直线段向右延长至与 N_1 曲线陡降段相交,其交点稍大于 $(H_p)_0$,刚进入软泡形成区,实际上就是产生H图形的坐标。

从图6(c)可见,一次脉冲作用下所形成的硬磁泡的最大缩灭场 $(H_{col})_{max}$ 明显低于硬磁泡的最大缩灭场 $(H_0)_{max}$,说明一次脉冲在软畴段畴壁中激发的布洛赫线数有限。

软畴段是磁荷极子,相互排斥,因而它在小线圈内的 H_p 梯度场中的运动是受限制的。图6(b)中 P 极大值20%在 $H_p \sim 40$ Oe处,刚处于 N_1 陡升的起点,可以想象此时软畴段的运动最为剧烈。我们设计了一个“双重曝光”实验考察在 $P=20\%$ 处软畴段硬化与其运动的关系:把一张底片的足量曝光时间分成两份,1/3和2/3,分别曝光施加一次脉冲前后畴段的位置,接着的一张底片则拍摄所形成的硬磁泡。通过对33张双重曝光照片几百个畴段的分析,发现畴段主要运动方式有6种,其中导致硬化的是畴段端部的“中摆”(适中的摆动)和弓形畴段的“弓缩”(畴段弓部的收缩)。

然后可以想象,施加系列脉冲后畴段中摆和弓缩的机会大增,图6(b)的 P 曲线一定会鼓起来,事实果真如此。

6.3 系列脉冲偏磁场作用下硬磁泡的形成^[11]

作为一个实例,对H图形施加 $\tau_p=0.5 \mu s$,脉冲频率 $f_p=100$ Hz的脉冲偏场20 s,在经受了 $n_p=2000$ 个脉冲后的统计结果示于图7。与图6相比,图7的又高又宽的 P 曲线说明H图形软畴段

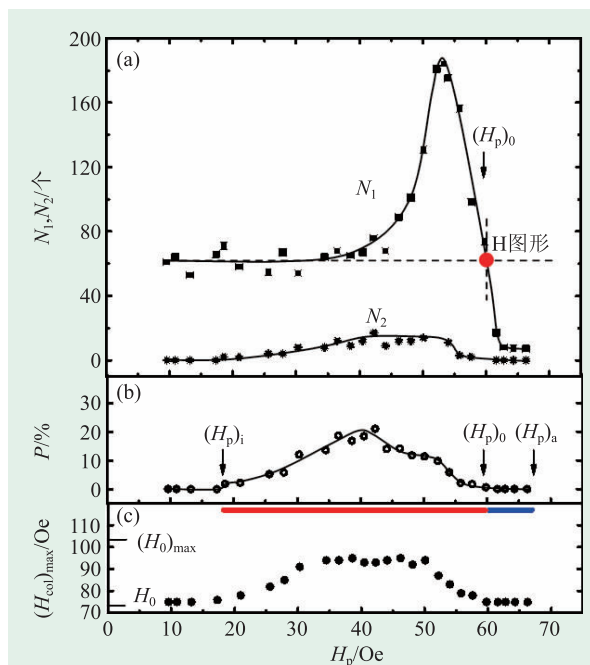


图6 给H图形施加一次 H_p 后,(a)小线圈内总磁泡数 N_1 和其中形成的硬泡数 N_2 , (b)硬泡形成几率 P , (c)硬泡最大缩灭场 $(H_{col})_{max}$ 与 H_p 的依赖关系(典型样品1号(YSmCa)₃(GeFe)₅O₁₂, $\tau_p=0.5 \mu s$, $(H_0)_0=51.3$ Oe, 引自文献[10])

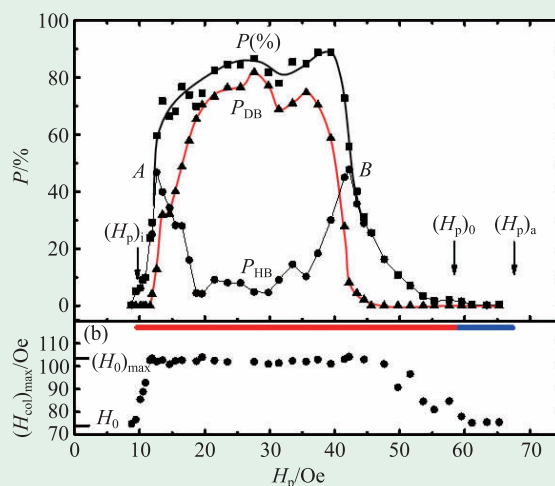


图7 给H图形施加2000次 H_p 后,(a)小线圈内硬磁畴总形成几率 P (其中硬磁泡和哑铃畴的形成几率分别是 P_{HB} 和 P_{DB} , $P=P_{HB}+P_{DB}$), (b)硬磁畴最大缩灭场 $(H_{col})_{max}$ 与 H_p 的依赖关系(条件同图6, 引自文献[11])

畴壁中布洛赫线是不断积累的,但也不是图6中 P 曲线的2000次叠加,说明还伴随着布洛赫线的复合和消失,但积累大于复合。从 $(H_p)_i$ 至 $(H_p)_0$ 的硬磁畴形成区(以红线段标出)十分鲜明,从 $(H_p)_0$ 到 $(H_p)_a$ 则是软磁泡形成区(以蓝线段标出)。注意图7(a)中硬磁畴的总形成几率 $P=P_{HB}+P_{DB}$,其中

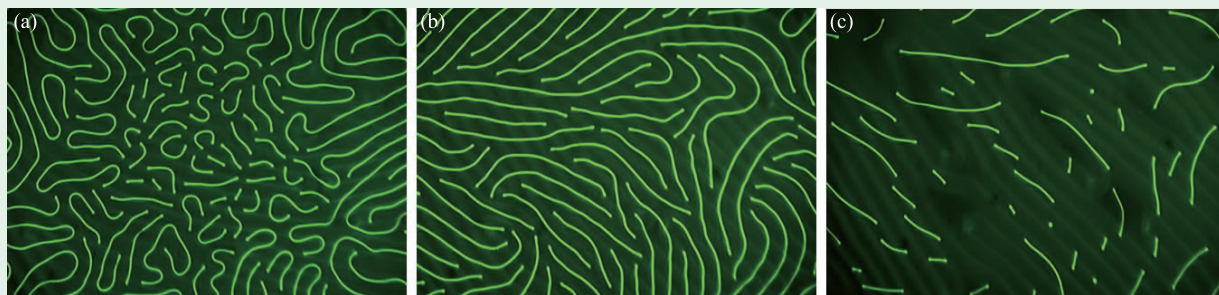


图8 (a)把切泡场(H_0)下的H图形作为实验起点; (b)在(H_0)下,施加几百次适当强度的 H_p 后形成的畴形; (c)把 H_0 升高到软磁泡缩灭场 H_0 后的畴形,其中少数圆形的是硬磁泡,大多数的是哑铃畴(图(a)的底边长为0.7 mm, (b)和(c)的底边长皆为0.88 mm)

P_{HB} 和 P_{DB} 分别是硬磁泡和哑铃畴的形成几率,且 P_{HB} 有 A 、 B 两个极大值点,当 P_{HB} 随 H_p 快速上升到极大点 A 时,伴随着图7(b)中硬磁畴缩灭场(H_{col})_{max}快速上升至硬磁泡最大缩灭场(H_0)_{max},其后哑铃畴才开始形成,且图7(a)中 P_{DB} 很快从零上升至极大值,表明正是软畴段畴壁中布洛赫线的不断激发和积累才导致硬磁泡以及哑铃畴的先后出现。这正是我们日后提出磁泡薄膜硬磁畴新分类法^[12, 13]的实验根据之一。

以上实验揭示了 H_0 和 H_p 联合作用下软、硬磁畴的形成规律。实际上我们研究过的所有磁泡样品都有同样的规律性,因而按照每个样品相应的图6和图7就能设定恰当的 H_p 条件,从H图形出发,可方便地重复产生个数和性能都相近的所需的硬磁泡群或哑铃畴群,如图8定性所示,从而对它们畴壁中布洛赫线链行为进行统计性的实验研究。

7 机会总是向着有所准备的人们

1980年代初,就在磁泡存储器走下坡被放弃之时,1983年日本九州大学小西进提出了“超高密度”布洛赫线存储器方案^[3],即把磁泡拉长为条状畴,以其畴壁中的一对(两根)负布洛赫线作为信息的载体,有无“负布洛赫线对”就是“1”和“0”。由于布洛赫线非常窄,同种磁泡材料的布洛赫线存储器密度比相应磁泡存储器提高30—100倍,因而单芯片布洛赫线存储器的容量就能达到Gb量级。这在当时又轰动了国际磁学界,日本、德国、法国等国马上响应,掀起新一轮研制高潮。

在布洛赫线存储器方案中,在信息传输环(主

环)中传输的还是软磁泡,只是信息存储区由很多平行排列的次环组成,每根次环就是一根条状畴的环状畴壁。次环中的一个信息“位”(bit)即是一对负布洛赫线。显见,如果不考虑次环中使信息定位的“bit pattern”,当次环中信息皆为“0”时,相应的为软畴段;皆为“1”时,如有 n 个bits,那么就有 $2n$ 根布洛赫线,它们相应的或是硬磁泡,或是哑铃畴,取决于 n 的大小。

真幸运,在磁泡下马的冲击犹存时,BLM方案的提出使我们发觉已具有研究其机理的条件。机会难得。1984年上半年,在物理所前所长管惟炎领导的“研究组长负责制”的成功改革中,“磁泡和磁畴畴壁物理的研究”课题组被所学术委员会空前绝后地定为“C-1组”,从而给了课题一年的生存机会。就在1984年底,由物理所出头,我发起组织了一次有28个单位参加的全国BLM讨论会(即第三次全国磁泡会议)。正是在这次会议上得到了国家科委高技术司的支持,“BLM机理研究”预研项目被列入1986—1990的“七五科技攻关计划”。

1985年,“磁泡和磁畴畴壁物理的研究”课题组在物理所从C类组升级为B类组,1986年更升级为A类组。一些年后,终于以研究所的A类组融入了物理所“磁学国家重点实验室”。

“七五”期间,布洛赫线链行为的机理研究取得一系列的成果,最重要的是下面两项:

一是布洛赫线存储器的温度稳定性。在磁泡薄膜的各类硬磁畴中,选择畴壁中布洛赫线数与其缩灭场呈单调依赖关系的硬磁泡作为研究对象。令 $H_0=0$,使之伸长为条状畴,用其畴壁中自

然存在的布洛赫线链作为布洛赫线存储器中满载信息的次环的模拟,进行温度实验。该研究导致了布洛赫线链解体临界温度 T_0 的发现,以及发现同种磁泡薄膜的 T_0 比其居里温度 T_c 低30—50℃,也就是说,当布洛赫线不存在了,磁泡依然存在。实际上 T_0 和 T_c 分别是布洛赫线存储器和磁泡存储器操作温度的绝对上限,因此布洛赫线存储器的温度稳定性比相应的磁泡存储器差很多。此外,还发现了软畴段壁中布洛赫线不能再激发的临界温度 T_{02} ,而 T_{02} 总小于 T_0 ,这使布洛赫线存储器操作温度的绝对上限比 T_0 更低。该论文被1988年巴黎国际磁学会议(ICM'88)接纳为邀请报告^[14]。

二是我们关心布洛赫线存储器的容量极限,即布洛赫线存储器的次环中到底能容纳多少负布洛赫线对?布洛赫线存储器方案实际上隐含了一个前提,即次环环形畴壁中可以无条件地注入 $2n$ 根负布洛赫线而不改变其静态特性。这可能吗?在上面第6节中,介绍了从H图形出发的单次和系列脉冲实验,结果表明,正是磁泡畴壁中激发的布洛赫线数目的增加导致了从硬磁泡到哑铃畴的转变。在“七五”期间,还发现哑铃畴有两类:一类是能收缩为圆形泡的,它们的缩灭场反而比硬磁泡的最大缩灭场 $(H_0)_{\max}$ 小,而且其畴壁中的布洛赫线越多,缩灭场越小;另一类是有更多的布洛赫线,不能缩成圆形泡,但随 H_0 增加会缩短,然后在一个很窄的 H_0 范围内以哑铃状崩灭。其后我们设计了一个“锻炼”实验,证明了第一类哑铃畴(ID)的存在^[11],从而提出了石榴石磁泡薄膜硬磁畴应该分为普通硬磁泡(OHB)、第一类哑铃畴(ID)、第二类哑铃畴(IID)三类的新分类法^[12]。新分类法实质是揭示了磁泡畴壁中布洛赫线数逐步增加时,其静态特性大变,软磁泡依次变为OHB, ID和IID,因此,布洛赫线存储器用条状畴环形畴壁作信息存储次环的方案行不通。

8 再创辉煌或可期?

光阴似箭,从1992年算起,时间又过去了25年,但当年报废的“磁泡测量装置”却因为有需

要已经更新。

这台研究导向性的物理实验设备可以为物理教学和铁磁学教学服务:

它可以用来显示石榴石单晶磁泡薄膜的迷宫畴,及其随直流偏磁场变化的收缩、缩灭、形核、扩胀和还原的磁化和反磁化过程,生动地显示铁磁体几种自由能(交换能、各向异性能、退磁能、畴壁能、外场能)的此消彼长,使观察者直观地理解磁畴结构形成的原动力是铁磁体系降低退磁能的需要,理解稳定的磁畴结构是由铁磁体系总自由能极小决定的等铁磁畴理论的基本原理。

它还可以花几秒钟产生美丽的H图形,观察软磁泡的产生、缩小和缩灭。在静态偏磁场和脉冲偏磁场联合作用下形成畴壁中含有布洛赫线链的各类硬磁畴,特别是可以欣赏一盘几十条畴壁中含有较长布洛赫线链的哑铃畴像竹蜻蜓似的以不同角频率同时旋转。如果要得到定量的结果,可以测量磁泡薄膜的条畴周期 P_0 和缩灭场 H_0 。在已知薄膜厚度 h 的情况下,按照磁泡静态理论,由 P_0 推算出特征长度 l ,由 P_0 和 H_0 推算出饱和磁化强度 $4\pi M$ 等磁泡薄膜的静态特性参数。

此外,这台装置还能生动地演示磁性材料的法拉第磁光效应,即线偏振光平行于磁泡样品磁化矢量 $\mathbf{M}$ 方向传播时偏振方向的偏转。

无疑地,该装置将提高学生的学习兴趣,使学生能在生动的赏心悦目的实验中学习物理,学习磁学,扩大知识面。对于一些学生,装置将给他们以发挥才智的机会,诸如设计接口和编程,把装置的操作全盘自动化等,或在磁泡薄膜上设计新实验,甚至是异想天开的实验。

历史告诉我们,现在搁置的东西也许有朝一日会“咸鱼翻身”。对于单晶石榴石磁泡薄膜这样完美的材料,再创辉煌或可期?

9 结束语

本文以设计制作磁泡测量装置,发现H图形,和找到“脉冲偏磁场作用下硬磁泡的形成”的研究课题为线索,简介了磁泡以及磁泡畴壁中

布洛赫线的物理概念和图像,讲述了我们驾驭布洛赫线链的磁泡故事。幸运在于抓住了1983年布洛赫线存储器方案提出的机会,最终竟成为该存储器的终结者。幸运还在于磁泡是如此活泼和美丽,因而当年报废的“磁泡测量装置”已经更新,而且坚信这个有着丰富多彩研究背景的物理实验设备还能变得更好。

致 谢 作者感恩物理所和磁学实验室的支

参考文献

- [1] Han B S. J. Magn. Magn. Mater., 1991, 100:455; Han B S. Behavior of vertical-Bloch-chains of hard domains in garnet bubble films. In: Magnetism in the Nineties. North-Holland, 1991, p.455—468 (第100纪念卷邀请评论)
- [2] Bobeck A H. Bell Syst. Tech. J., 1967, 46: 1901
- [3] Konish S. IEEE Trans. Magn., 1983, MAG-19: 1838
- [4] Thiele A A. Bell Syst. Tech. J., 1971, 50: 725
- [5] Bobeck A H, Blank S L, Levinstein J. Bell Syst. Tech. J., 1972, 51: 1431
- [6] Malozemoff A P, Slonczewski J C. Magnetic Domain Walls in Bubble Materials. London: Academic Press, 1979

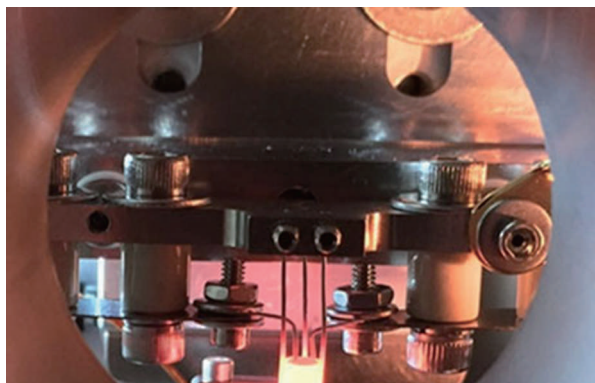
持。衷心感谢当年物理所磁学室磁泡组张寿恭、毛廷德、刘英烈、林泉、贾克昌、李靖元、于志弘、樊世勇、吴宗麟、黄毅英等老同事,河北师大聂向富、唐贵德等师生,李伯臧研究员,以及R. Dahlbeck博士,同他们的合作是难忘的经历。衷心感谢A. Hubert教授的学术指导,以及J. Engemann教授慷慨赠与样品。最后,作者感谢曹则贤研究员在本文撰写过程中给予的帮助,感谢方以坤研究员协助重新绘制实验曲线和示意图。

- [7] Nishida H, Kobayashi T, Sugita Y. AIP Conf. Proc., 1973, 10: 493
- [8] Liu Y L, Nie X F, Han B S. Acta Phys. Sinica, 1980, 29: 241
- [9] Mao T D, Li J Y, Fan S Y *et al.* Acta Phys. Sinica, 1983, 32: 176
- [10] Han B S, Tang G D, Nie X F *et al.* Acta Phys. Sinica, 1985, 34: 1396
- [11] Nie X F, Tang G D, Lin J W *et al.* Acta Phys. Sinica, 1986, 35: 338
- [12] Han B S, Nie X F, Liu D P. Chin. Phys. Lett., 1989, 6: 329
- [13] Nie X F, Tang G D, Niu X D *et al.* J. Magn. Magn. Mater., 1991, 95: 231
- [14] Han B S, Nie X F, Tang G D *et al.* Journal de Physique, 1988, 49: C8-1877 (ICM'88邀请报告)

太空竞赛激活绿色能源

电子从热的电极(发射体)无规地运动通过真空,被冷的电极(收集体)吸收,在两个电极之间产生一个电位差。用这种方法,可以将温度差转换为电能。上世纪50年代,曾利用这一效应试制为航天器供电的小型热离子转换器。但因效率太低不适于实际应用。

斯坦福大学的Roger Howe等对影响热离子能量转



物理新闻和动态

换器效率的两个问题进行了研究。首先他们降低了收集极的功函数,典型的收集体——钨——的功函数为2.15 eV, 装置的效率很低。研究人员利用石墨烯的功函数可以通过加电压来调整的特点,在掺杂的反向硅栅上沉积20 nm的HfO₂介电层,然后用单层石墨烯覆盖其上。通过在硅栅上加电压,提高了石墨烯上的电子密度,将其功函数降低到1.69 eV。

其次,空间电荷效应使电极间空隙中的电子互相排斥,将电子推回发射体。为减小这种效应,研究人员使用纳米制造技术将电极间隙减小到17 μm,确保电子尽快到达收集极。这样做的另一个好处是,使钨的原子层从钨发射体的涂层蒸发,覆盖收集极,形成表面偶极子,进一步减小收集极的功函数。

研究人员估计,在温度差为1000 ℃时,发射体有9.8%的热量转换成电能,与以前的技术相比,提高了6.7倍。这是一种绿色能源。

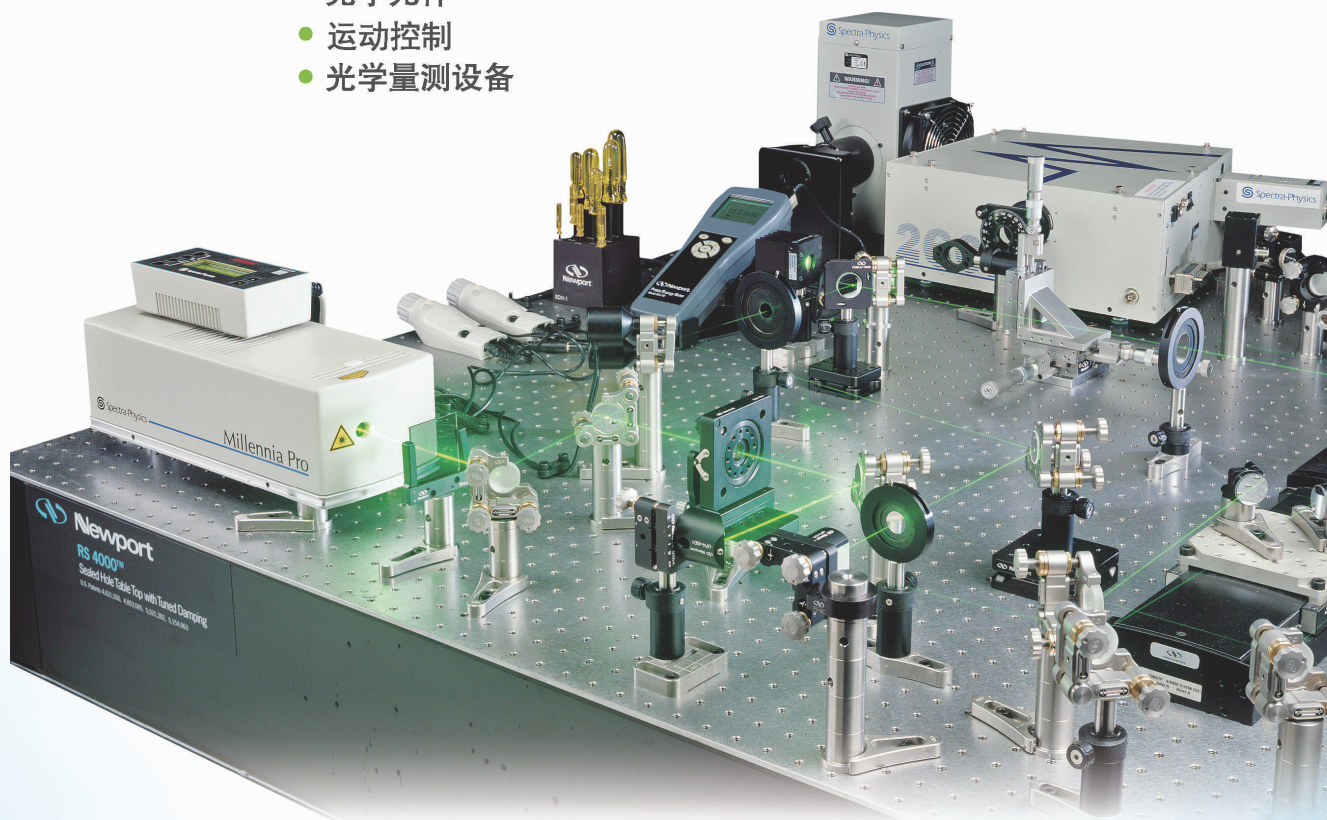
(周书华 编译自 *Physics World News*, 13 March, 2017)

您在筹备新的实验室吗？

加入Newport新实验室计划，产品最高折扣18%！

产品包括：

- 光学平台
- 光机械
- 光学元件
- 运动控制
- 光学量测设备



Newport 中国

电话：+86 510 8113 5000
 邮箱：china@newport.com
 网址：www.newport.com