

## 三类硬磁畴的形成及静态特性\*

聂向富 唐贵德

河北师范大学物理系, 石家庄, 050016

牛 秀 德

上海交通大学物理系, 上海, 200030

韩 宝 善

中国科学院物理研究所, 北京, 100080

1989年3月30日收到

本文提出畴壁中含有大量 VBL 的石榴石磁泡材料的三类硬磁畴的分类标准, 描述了它们的形成方法和静态特性, 并示出典型照片. 从形成条件可以合理地推论, 畴壁中 VBL 数目的增加导致硬磁畴静态特性的质的变化.

PACC: 7570K

### 一、引 言

布洛赫线存储器 (Bloch line memory, 以下简称 BLM)<sup>[1]</sup> 以单晶石榴石磁泡薄膜条状畴壁中的垂直布洛赫线 (vertical Bloch line, 以下简称 VBL) 对 (两条) 作为二进制信息的载体, 从而达到大于  $1000 \text{ Mb}^b/\text{cm}^2$  的超高密度. 显然当存储入足够多的“1”信息时, 条畴壁中就会有大量的 VBL. 虽然在 BLM 的设计中使 VBL 彼此分离以减小相互作用, 但大量的 VBL 在条畴壁中共存肯定会影响条畴壁本身. 因而近年来畴壁中含有 VBL 链的自然存在的硬磁泡和哑铃畴等硬磁畴再次成为关注的目标. 事实上, 作为一种实验模拟, 我们已经进行了普通硬磁泡 VBL 链的温度稳定性研究<sup>[2,3]</sup>. 本文讨论三类硬磁畴, 将有助于对 VBL 链作深入的研究.

70 年代初, 为了研制磁泡器件人们注意到了硬磁泡问题, 于是对硬磁泡和哑铃畴作过广泛的实验和理论研究<sup>[4-8]</sup>. 通过这些研究, 人们认识到硬磁泡畴壁中存在由大量同号 VBL 组成的 VBL 链. 人们还认识到当畴壁中 VBL 数更多时, 磁泡不得不畸变为“哑铃畴”. 关于哑铃畴, 我们已经提出, 以泡的形式缩灭的哑铃畴不是硬磁泡而是一类特定的哑铃畴<sup>[9]</sup>. 这样, 哑铃畴就可分为两类, 连同普通硬磁泡及相应的硬条畴, 构成了硬磁畴

\* 国家自然科学基金资助的课题.

1) b 即 bits 缩写.

的家族。

本文将提出这三类硬磁畴的分类标准,并介绍它们的形成方法和静态特性。

## 二、硬磁畴的分类

考虑到硬磁畴的不同的静态特性只有在它们畴壁中大量的 VBL 处在挤压的状态下才能表现出来,因而我们只用增大静态偏磁场  $H_b$  过程中的不同行为作为硬磁畴的分类标准。

先描述一些特征偏磁场:

1. 条泡转变场  $H_{sb}$  (stripe-to-bubble transition field, 即 run-in field). 当  $H_b$  增加到  $H_{sb}$  时, 正常畴段(软畴段)收缩为圆形磁泡. 对一群软畴段,  $H_{sb}$  有一个小的分布范围, 取其最大值作为  $H_{sb}$ .

2. 条泡转变标准场  $H'_{sb}$ . 按照我们的经验, 为了把普通硬磁泡与哑铃畴区分得更好, 有必要定义  $H'_{sb} = H_{sb} + 0.01 \times 4\pi M$ .

3. 正常磁泡(软磁泡)缩灭场  $H_0$ . 当  $H_b$  增大到  $H_0$  时, 软磁泡缩灭. 对一群软磁泡,  $H_0$  有一个小的分布范围, 取其最小值定为  $H_0$ .

4. 硬磁泡标准场  $H'_0$ . 按惯例,  $H'_0 = H_0 + 0.01 \times 4\pi M$ .

5. 硬磁泡最大缩灭场记为  $H_{0,max}$ . 硬磁畴的分类标准如下:

1. 普通硬磁泡及相应的硬条畴。

当  $H_b$  增大到  $H'_{sb}$  时能收缩为圆形磁畴, 且缩灭场  $H_{col}$  分布在  $H'_0$  与  $H_{0,max}$  之间的磁泡称“普通硬磁泡”(OHB). 降低偏磁场, 它们能膨胀成硬条畴。

2. 哑铃畴。

当  $H_b$  增大到  $H'_{sb}$  时仍以非圆形存在的磁畴, 不管是椭圆状 (ellipse), 哑铃状 (dumbbell), S 状或 C 状 (S, C-shape) 等<sup>[7]</sup>, 统称之为“哑铃畴”。哑铃畴分为两类<sup>[9]</sup>.

3. 第一类哑铃畴。

在  $H_b > H'_{sb}$  后最终能收缩为圆状, 然后缩灭的哑铃畴称为“第一类哑铃畴”(ID). ID 的  $H_{col}$  的上限为  $H_{0,max}$ , 下限则明显地高于  $H'_0$ .

4. 第二类哑铃畴。

在  $H_b > H'_{sb}$  后长度缩短但不能收缩为圆形畴, 最后以哑铃形状(包括椭圆状, 哑铃状, S 状及 C 状等)崩灭的哑铃畴称为“第二类哑铃畴”(IID). IID 的  $H_{col}$  分布范围很窄, 其中心崩灭场记作  $(H_0)_{IID}$ .

## 三、三类硬磁畴的形成与静态特性

用系列脉冲偏场法<sup>[10]</sup>在 4 种 18 个未经离子注入的 (111) LPE 磁泡样品上研究了硬磁畴的形成. 它们的成份为 (1)  $(YSmCa)_3(FeGe)_5O_{12}$  (7 个样品); (2)  $(BiYLu)_3(FeGa)_5O_{12}$  (1 个样品); (3)  $(YSmLuCa)_3(FeGe)_5O_{12}$  (8 个样品); (4)  $(YSmLuCa)_3(FeGeGa)_5O_{12}$  (2 个样品). 实验表明, 同种成份的样品, 尽管泡径不同但形成硬畴的情况却

相同。上述四种材料都能形成 OHB 和 ID, 但能形成 IID 的只有 (1) 和 (2) 两种。

成分(1)的典型 1# 样品的室温静态参数及特征偏磁场列于表 1。在系列脉冲偏磁场

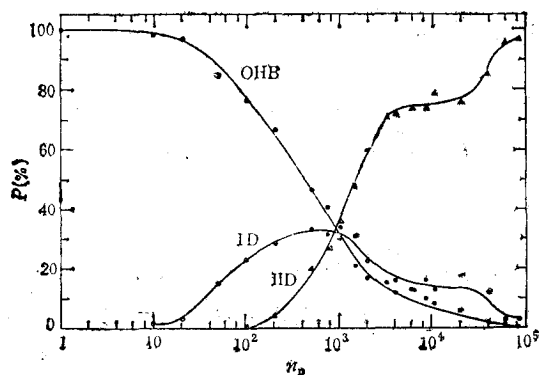


图 1 系列脉冲偏磁场作用下 1# 样品形成的硬磁畴中三类硬畴所占百分比  $P$  与脉冲次数  $n_p$  的关系(其余形成条件:  $(H_b)_0 = 530\text{Oe}$ ,  $H_p = 300\text{Oe}$ ,  $\tau_p = 0.5\mu\text{s}$ , 室温)

作用下 1# 样品所形成的全部硬磁畴中三类硬畴的百分比  $P$  与偏场脉冲次数  $n_p$  的关系如图 1 所示, 其中每一实验点都是多次实验所得的平均值。硬化实验中, 固定偏磁场为  $(H_b)_0$ , 施加于一组软畴段的脉冲偏场方向和  $H_b$  一致, 幅度  $H_p$  选择得使总偏场  $[(H_b)_0 + H_p]$  处于该样品硬磁泡形成区的中央<sup>[10]</sup>。从图 1 可见, 当  $n_p < 10$  次时, 几乎只能形成 OHB; ID 和 IID 在  $n_p$  为 10 次和 100 次时依次出现。随 ID 和 IID 比例的增大, OHB 的比例很快减小。当  $n_p$  高于 1000 时, ID 的比例也减小, 结果 IID 比例急剧上升。当  $n_p$  大于一万次后, IID 占压到优势。文献 [10] 中已表明在系列脉冲偏场作用下畴壁中的 VBL 数是逐渐积累的, 因而从图 1 可以合理推论, 从 OHB 到 ID, 再到 IID, 畴壁中的 VBL 越来越多。

1# 样品的 OHB, ID 和 IID 的典型缩灭场  $H_{\text{col}}$  分布直方图分别由图 2(a), (b) 和 (c) 所示。从图 2(a) 可见, OHB 的缩灭场分布在硬磁泡标准场  $H'_0$  和硬磁泡最大缩灭场  $H_{0,\text{max}}$  之间。需要指出的是, 在不同的硬化条件下所形成的 OHB 的缩灭场分布直方图有所不同, 但总可以找到合适的硬化条件使 OHB 的缩灭场覆盖从  $H'_0$  至  $H_{0,\text{max}}$  的整个硬畴缩灭区。图 2(c) 表明 1# 样品 IID 崩灭的偏场范围很窄, 几乎 90% 的 IID 集中在 3 Oe 的范围内崩灭,  $(H_0)_{\text{IID}}$  定为 93 Oe, 这与文献 [6] 的观察一致。由图 2(b) 可以看到, ID 的最大缩灭场与 OHB 的相同, 但最低缩灭场却远高于  $H'_0$ 。在 10% 的误差

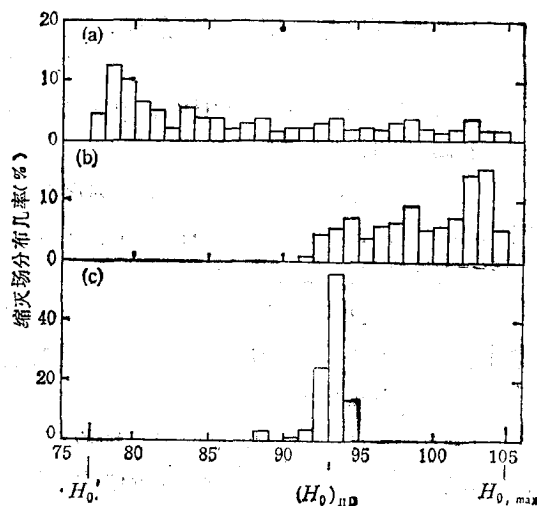


图 2 1# 样品典型的硬畴缩灭场  $H_{\text{col}}$  分布直方图 (a) 为 OHB, 形成所用的系列偏场脉冲数  $n_p = 10$  (次), 检测的 OHB 数为 215 个; (b) 为 ID,  $n_p = 100$  (次), 检测的 ID 数 217 个; (c) 为 IID,  $n_p = 600$  次, 检测的 IID 数 200 个;  $((H_b)_0 = 530\text{Oe}$ ,  $H_p = 300\text{Oe}$ ,  $\tau_p = 0.5\mu\text{s}$ , 室温)

范围内可以认为 ID 的缩灭场分布在  $(H_0)_{\text{IID}}$  和  $H_{0,\text{max}}$  之间。需要说明的是, 在不同的  $n_p$  时虽然形成的 ID 和 IID 的比例不同, 但它们各自的缩灭场直方图却很相似; 而且在 (1) 和 (2) 两种成份的所有样品上都测到类似的结果。所以可以认为图 2(b) 和 (c) 所

表 1 典型样品的室温数据及特征偏场

| # 标称成分                                                       | $h$<br>( $\mu\text{m}$ ) | $l$<br>( $\mu\text{m}$ ) | $4\pi M$<br>(G) | $K_u(\times 10^3)$<br>( $\text{erg}/\text{cm}^3$ ) | $H_{b0}$<br>(Oe) | $H'_{b0}$<br>(Oe) | $H_0$<br>(Oe) | $H'_0$<br>(Oe) | $(H_0)_{\text{IID}}$<br>(Oe) | $H_{0,\text{max}}$<br>(Oe) |
|--------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|----------------------------------------------------|------------------|-------------------|---------------|----------------|------------------------------|----------------------------|
| 1 (YSmCa) <sub>3</sub> (FeGe) <sub>5</sub> O <sub>12</sub>   | 7.6                      | .84                      | 145             | 4.19                                               | 63.5             | 65.0              | 75.5          | 77.0           | 93                           | 105                        |
| 2 (YSmLuCa) <sub>3</sub> (FeGe) <sub>5</sub> O <sub>12</sub> | 5.1                      | .38                      | 238             | 10.6                                               | 120.5            | 122.9             | 141.6         | 144            |                              | 170                        |
| 3 (YSmLuCa) <sub>3</sub> (FeGe) <sub>5</sub> O <sub>12</sub> | 6.6                      | .68                      | 220             | 6.51                                               | 100.3            | 102.5             | 118.3         | 120.5          |                              | 148                        |

反映的 ID 和 IID 的静态特征带有普遍的意义。还需要说明的是图 2 中只有图 2 (c) 的测量最简便。在  $n_p$  数很大时,如图 1 所示, IID 的形成几率高,对一群软畴段作一次硬化实验即可产生约 20 条 IID,测得很类似于图 2 (c) 的直方图。

1<sup>#</sup>样品三类硬磁畴形成的典型照片示于图 3 (见图版 I)。图 3 (a), (d) 和 (g) 为在固定直流偏磁场 ( $H_b$ )。下一群软畴段分别经 10, 100 和 6000 次系列偏场脉冲作用后的畴形。按照前面的定义,图 3 (c) 中的磁泡全是 OHB, 图 3 (e) 中 4 条完整的哑铃畴为 ID。图 3 (h) 中 4 条完整的哑铃畴在偏场接近  $(H_0)_{\text{IID}}$  (93 Oe) 时呈椭圆或长度不等的哑铃状(图 3 (i))。实验表明它们在  $(H_0)_{\text{IID}}$  附近崩灭时仍没有缩成圆状畴,因而它们是 IID。

上面提及的 (3) 和 (4) 两种成份的样品与 (1) 和 (2) 不同,只能形成 OHB 和 ID 两类硬磁畴,而不能形成 IID。(3) 类材料的典型 2<sup>#</sup> 和 3<sup>#</sup> 样品的室温静态参数及特征偏场也列于表 1。系列脉冲偏磁场作用下 2<sup>#</sup> 样品形成的硬磁畴中 OHB 和 ID 所占比例  $P$  与脉冲次数  $n_p$  的关系曲线如图 4 所示。由图 4 可见, 2<sup>#</sup> 样品的 ID 在  $n_p > 30$  后才能形成。此后 ID 形成比例随  $n_p$  增加而急剧增大。当  $n_p = 1000$  时 ID 的比例已高达 80%。与 2<sup>#</sup> 样品成份相同的 3<sup>#</sup> 样品的 OHB 和 ID 的典型的  $H_{\text{col}}$  直方图为图 5。很清楚,图 5 (a) 也表明 OHB 的特点是缩灭场范围大,能覆盖从  $H'_0$  至  $H_{0,\text{max}}$  的整个

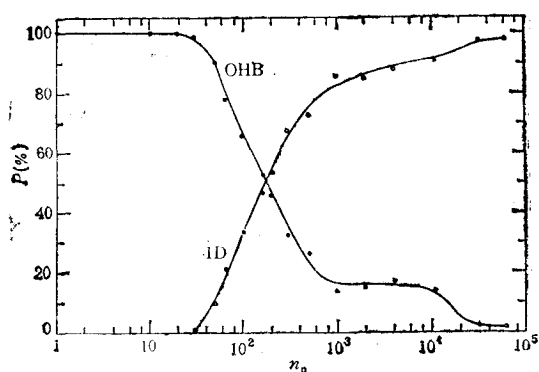


图 4 系列脉冲偏磁场作用下 2<sup>#</sup> 样品形成的两类硬磁畴的百分比  $P$  与脉冲次数  $n_p$  的关系 ( $(H_b)_0 = 108 \text{ Oe}$ ,  $H_p = 56 \text{ Oe}$ ,  $\tau_p = 0.5 \mu\text{s}$ , 室温)

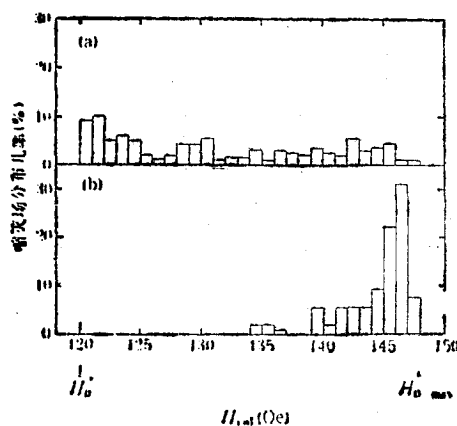


图 5 3<sup>#</sup> 样品典型的硬畴缩灭场  $H_{\text{col}}$  分布直方图 (a) 为 OHB,  $n_p = 100$ , 检测的 OHB 数 199 个; (b) 为 ID,  $n_p = 5000$ , 检测的 ID 数 108 个; ( $(H_b)_0 = 85.5 \text{ Oe}$ ,  $H_p = 44.6 \text{ Oe}$ ,  $\tau_p = 0.5 \mu\text{s}$ , 室温)

区域。图 5(b) 表明 ID 的  $H_{col}$  的上限为  $H_{0,max}$ , 下限则明显高于  $H_0$ 。与图 2(a)、(b) 相比, 可见我们所研究的四种成份的磁泡材料的 OHB 和 ID 有相同的静态特性。需要说明的是图 5(b) 的测量很简便。如图 4 所示, 在  $n_p$  数很大时, (3) 和 (4) 两种材料 ID 的形成比例高, 一次硬化实验即可产生几十条 ID, 测得很类似于图 5(b) 的直方图。3# 样品硬畴形成的典型照片示于图 6。结合图 6(b) 和 (c) 可以看到, 这两张照片中左上方的圆形畴是一个 OHB, 而图 6(c) 中其余 5 个完整的哑铃状, S 状和 C 状硬条畴都是 ID。随着静态偏场的增大, 它们都将先缩成泡然后破灭。

#### 四、结 论

1. 磁泡材料磁畴壁中含有大量同号 VBL 的硬磁畴有三类: 普通硬磁泡 (OHB) 及相应的硬条畴, 第一类哑铃畴 (ID) 和第二类哑铃畴 (IID)。在所研究的四种成分的磁泡材料中,  $(YSmCa)_3(FeGe)_3O_{12}$  和  $(BiYLu)_3(FeGa)_3O_{12}$  两种能形成所有三类硬磁畴, 但  $(YSmLuCa)_3(FeGe)_3O_{12}$  和  $(YSmLuCa)_3(FeGa)_3O_{12}$  两种只能形成 OHB 和 ID 两类。

2. 用适当的系列偏场脉冲, 在任何未经离子注入的 (111) 面石榴石磁泡材料中能产生所需的硬磁畴。从本文介绍的形成条件可以合理推论, 从 OHB 到 ID, 再到 IID, 畴壁中的 VBL 越来越多。

3. 三类硬磁畴在以消灭场直方图所标志的静态特性上有很大的差别, 这反映了畴壁中 VBL 增多时所引起的质的变化。三类硬磁畴的研究为石榴石磁泡材料条畴中 VBL 容量极限问题的研究提供了线索。

- [1] S. Konishi, *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-19**(1983), 1838.
- [2] 霍素国、聂向富、韩宝善, *物理学报*, **37**(1988), 1703.
- [3] B. S. Han, X. F. Nie, G. D. Tang and S. G. Huo, Invited Paper 4G3 of ICM'88, Paris.
- [4] W. J. Tabor, A.H. Bobeck, G.P. Vella-Coleiro and A. Rosencwaig, *AIP Conf. Proc.* 10,(1973), p. 442.
- [5] H. Nishida, T. Kobayashi and Y. Sugita, *AIP Conf. Proc.* 10, (1973), p. 493.
- [6] J. C. Slonczewski, A. P. Malozemoff and O. Voegeli, *AIP Conf. Proc.* 10, (1973), p. 458.
- [7] F. G. West and D. C. Bullock, *AIP Conf. Proc.* 10, (1973), p. 483.
- [8] A.P. Malozemoff and J.C. Slonczewski, *Magnetic Domain Walls in Bubble Materials*, Academic Press, (1979).
- [9] HAN Bao-shan, NIE Xiang-fu and LIU Da peng *Chinese Phys. Lett.*, **6**(1989), 329.
- [10] 聂向富、唐贵德、凌吉武、韩宝善, *物理学报*, **35**(1986), 338.

## FORMATION AND STATIC CHARACTERISTICS OF THREE KINDS OF HARD DOMAINS IN BUBBLE MATERIALS

NIE XIANG-FU    TANG GUI-DE

*Department of Physics, Hebei Normal University, Shijiazhuang, 050016*

NIU XIOU-DE

*Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 20030*

HAN BAO-SHAN

*Institute of Physics, Academia Sinica, Beijing, 100080*

(Received 30 March 1989)

### ABSTRACT

The criterion of classification for three kinds of hard domains with lots of VBLs in their walls in garnet bubble materials is proposed. Their formation and static characteristics are described in detail and their typical pictures are shown. Considering the formation conditions of hard domains, it is reasonable to deduce that the increase of the number of VBLs in their walls leads to substantial change of their static characteristics.

**PACC:** 7570K