

# 脉冲偏磁场作用下硬磁泡形成与温度的关系

韩宝善 徐家法<sup>1)</sup>

(中国科学院物理研究所)

聂向富 孙慧玲 欧阳芳丽 唐贵德

(河北师范大学物理系)

1987年10月12日收到

用一次脉冲偏场法研究了外延石榴石磁泡薄膜条状畴壁中 VBL 群体形成与温度的关系. 发现了与材料参量有关的临界温度  $T_{02}$ , 当  $T > T_{02}$  时, 硬磁泡不再形成. 还发现了当  $T < T_{02}$  时, VBL 群体形成有两个明显不同的阶段, 它们的分界温度为  $T_{01}$ . 定性解释了第一个阶段的实验曲线并用双重曝光照相法揭示了两个阶段中导致软畴段硬化的运动形式的差别.

## 一、引言

1973年, Henry 等人<sup>[1]</sup>为探索抑制硬泡的新方法曾进行过磁泡材料的温度实验, 发现存在一“特征温度”  $T_H$ , 当温度  $T > T_H$  时, 施加脉冲偏磁场不能形成硬磁泡. Hoshikawa 等人<sup>[2]</sup>进而研制了一种  $T_H$  低的所谓无硬泡石榴石磁泡材料. 然而由于离子注入法抑制硬泡既简便又经济, 所以上述方法后来没有采用.

1983年 Konishi<sup>[3]</sup>在磁泡存贮技术的基础上, 提出了超高密度 ( $>1\text{Gbit}/\text{cm}^2$ ) 固态布洛赫线存贮器 (Bloch Line Memory, 下简称 BLM) 方案. 布洛赫线存贮技术是用条畴壁中的垂直布洛赫线 (VBL) 对(两条)作为信息的载体, 以 VBL 对的有、无来体现信息的“1”、“0”. 这样, 为了使 BLM 有满意的操作温度范围, BL 对的写入, 即 BL 的形成与温度关系的研究就显得重要起来.

近几年来, 我们系统研究了脉冲偏场作用下硬磁泡形成的规律性<sup>[4-7]</sup>. 其中介绍的一次脉冲偏场法<sup>[4]</sup>可用来研究脉冲偏磁场形成 VBL 从而形成硬泡的最简单情形. 本文在不同温度下对5个样品进行了一次脉冲偏场实验, 研究了条畴壁中 VBL 群体形成随温度变化的规律性. 实验表明文献[1,2]给出的只是我们实验结果的一部分. 由于在泡径不同的两种5个样品上都观察到了类似的规律性, 所以本文主要给出典型样品5#的实验曲线, 其余样品的主要数据用表列出. 最后对结果作了解释和分析.

1) 吉林大学物理系 1985 年毕业生.

## 二、实验和结果

两种成份的 5 个(111)面外延石榴石磁泡样品都未经离子注入,数据示于表 1. 测量装置同文献[4],但增加了加温设施. 本实验温度范围为室温至 150℃. 30℃ 以上控温精度为  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ .

表 1 5 个样品的室温数据及分界温度  $T_{01}$  和临界温度  $T_{02}$

| 序号 | 成 份                                                        | $d$<br>( $\mu\text{m}$ ) | $h$<br>( $\mu\text{m}$ ) | $P_0$<br>( $\mu\text{m}$ ) | $l$<br>( $\mu\text{m}$ ) | $H_0$<br>(Oe) | $H_{\text{col,max}}$<br>(Oe) | $4\pi M$<br>(G) | $K_u$<br>( $\times 10^3 \text{ erg/cm}^3$ ) | $Q$  | $T_{01}$<br>( $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ) | $T_{02}$<br>( $\pm 1^\circ\text{C}$ ) |
|----|------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------|------------------------------|-----------------|---------------------------------------------|------|-----------------------------------------|---------------------------------------|
| 1  | (YSmCa) <sub>3</sub> (FeGe) <sub>3</sub> O <sub>12</sub>   | 8.3                      | 5.6                      | 15.5                       | 0.99                     | 49.4          | 84.3                         | 120             | 3.47                                        | 6.10 | 65                                      | 80                                    |
| 2  | (YSmCa) <sub>3</sub> (FeGe) <sub>3</sub> O <sub>12</sub>   | 6.7                      | 7.6                      | 15.0                       | 0.84                     | 76.0          | 106.0                        | 145             | 4.19                                        | 4.81 | 82                                      | 98                                    |
| 3  | (YSmCa) <sub>3</sub> (FeGe) <sub>3</sub> O <sub>12</sub>   | 4.0                      | 3.9                      | 7.2                        | 0.39                     | 121.0         | 153.0                        | 224             | 7.26                                        | 3.42 | 52                                      | 76                                    |
| 4  | (YSmLuCa) <sub>3</sub> (FeGe) <sub>3</sub> O <sub>12</sub> | 5.8                      | 6.6                      | 12.4                       | 0.68                     | 124.0         | 152.0                        | 229             | 6.51                                        | 3.26 | 75                                      | 86                                    |
| 5  | (YSmLuCa) <sub>3</sub> (FeGe) <sub>3</sub> O <sub>12</sub> | 3.9                      | 5.1                      | 7.9                        | 0.38                     | 141.6         | 170.0                        | 238             | 10.6                                        | 4.46 | 75                                      | 93                                    |

施加一次偏场脉冲形成硬泡的方法在文献[4]中已详述. 现在结合本实验简要说明如下:

1. 固定直流偏场( $H_b$ )<sub>0</sub>的确定 实验中先要把直流偏场固定在( $H_b$ )<sub>0</sub>, 然后再施加一次偏场脉冲  $H_p$ . 对每一样品都要选择合适的( $H_b$ )<sub>0</sub>, 而且要随温度改变. 为此, 先要测量样品的  $H_{[a]}$  和  $H_{[d]}$ <sup>[9]</sup>. 当总偏场[( $H_b$ )<sub>0</sub> +  $H_p$ ]大于  $H_{[a]}$  时, 扁平脉冲小线圈内的所有磁泡都缩灭, 因而称  $H_{[a]}$  为“磁泡动态缩灭场”. 当总偏场略小于  $H_{[a]}$  时, 偏场脉冲结束后, 小线圈内留下的一个或几个磁泡膨胀为弯曲条畴. 这些条畴或者是单枝的, 或者是多枝的, 决定于( $H_b$ )<sub>0</sub> 的大小. 当( $H_b$ )<sub>0</sub> >  $H_{[d]}$  时, 为单枝畴; 当( $H_b$ )<sub>0</sub> <  $H_{[d]}$  时为多枝畴(一般为硬条畴), 因而称  $H_{[d]}$  为“磁畴枝状膨胀的临界直流偏场”. 5# 样品的  $H_{[a]}$  和  $H_{[d]}$  的温度关系曲线示于图 1(d). 一般选 ( $H_b$ )<sub>0</sub> 在条泡转变场  $H_{sb}$  和  $H_{[d]}$  之间, 并稍高于  $H_{[d]}$  约 1—2Oe, 以保证脉冲后只形成单枝畴.

2. 硬泡形成区和软泡形成区 对于软畴段, 当  $H_p < (H_p)_i$  时, 不能形成硬磁泡; 只有  $H_p \geq (H_p)_i$  时才能形成硬磁泡. 因而称  $H_{[i]} = (H_b)_0 + (H_p)_i$  为“硬泡形成的阈值场”. 当  $H_p$  进一步增大到大于( $H_p$ )<sub>0</sub> 时, 硬泡又不再形成, 所产生的全部磁泡都是正常泡(软磁泡). 我们称  $H_{[b]} = (H_b)_0 + (H_p)_0$  为“软硬磁泡形成的分界场”. 可见  $H_{[i]}$  和  $H_{[b]}$  之间的区域为硬泡形成区 HB, 而  $H_{[b]}$  和  $H_{[a]}$  之间的区域为软泡形成区 SB.

3. 实验用软畴段的数目 在( $H_b$ )<sub>0</sub> 下施加一次脉冲  $H_p$ , 当总偏场在  $H_{[a]}$  和  $H_{[b]}$  之间时, 脉冲后可以得到软畴段. 我们用一定数目的软畴段作为实验的出发点, 而后施加宽度  $\tau_p = 0.5\mu\text{s}$  一次脉冲偏场  $H_p$ . 畴段数的选择因样品而异, 对 5# 样品, 合适的畴段数为 45 条左右.

4.  $P_{\text{max}}$ ,  $(H_p)_m$  及  $(\Delta H)_{\text{max}}$  的测量 在某个温度下加一次偏场脉冲  $H_p$  使软畴段硬

化, 然后升高偏场至  $H_{sb}$ , 测量磁泡总数  $N_1$ , 继续增大偏场至硬泡标准场  $H'_0 = H_0 + 0.01 \times 4\pi M$  (其中  $H_0$  为软泡缩灭场,  $4\pi M$  为饱和磁化强度), 测量硬泡数  $N_2$ , 则硬泡形成几率  $P = N_2/N_1$ , 再增大偏场至硬泡全部缩灭, 可测出硬泡最大缩灭场  $H_{col,max}$ . 改变  $H_p$  重复上述测量, 便可得到该温度下的硬泡形成的最大几率  $P_{max}$ , 相应的脉冲偏场强度  $H_{pm}$  及最大硬泡缩灭场分布幅度  $(\Delta H)_{max} = (H_{col,max} - H_0)_{max}$ . 对 5# 样品, 上述量的温度关系如图 1(a)–(c) 所示.

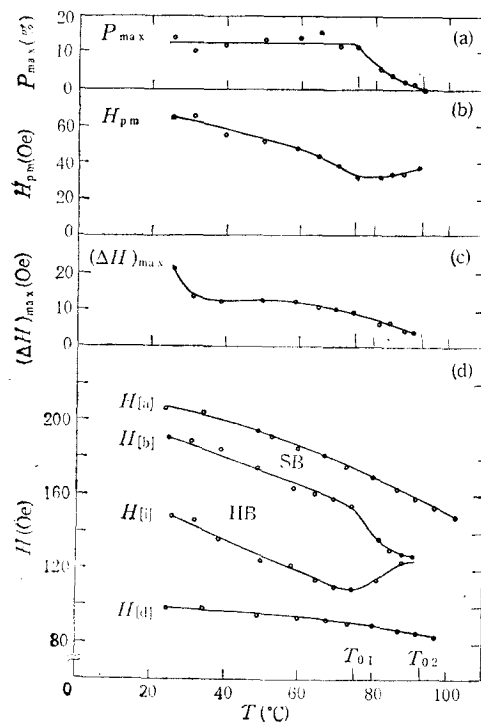


图 1 一次脉冲偏场作用下, 5# 样品的 (a) 最大硬泡形成几率  $P_{max}$ ; (b) 相应于  $P_{max}$  的脉冲偏场强度  $H_{pm}$ ; (c) 最大硬泡缩灭场分布幅度  $(\Delta H)_{max}$ ; (d) 硬泡形成的阈值场  $H_{[a]}$ , 软硬磁泡形成的分界场  $H_{[b]}$  连同  $H_{[a]}$ ,  $H_{[b]}$  随温度  $T$  的变化 ( $\tau_p = 0.5 \mu s$ )

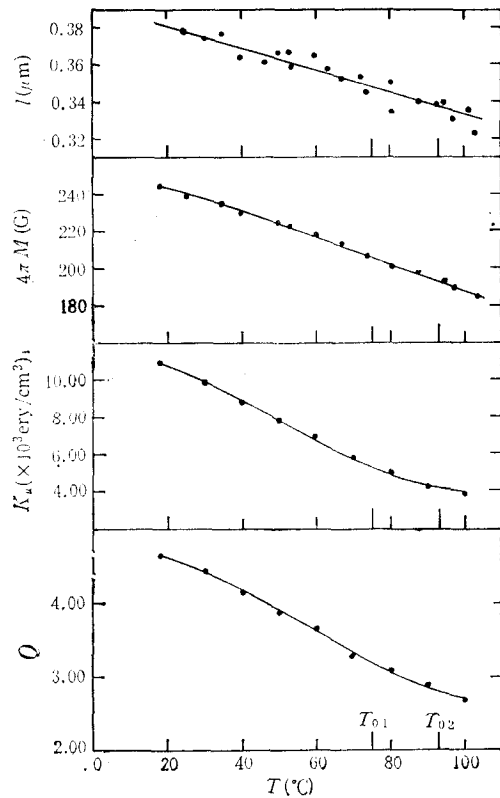


图 2 5# 样品的特征长度  $l$ , 饱和磁化强度  $4\pi M$ , 单轴各向异性常数  $K_u$  及品质因数  $Q$  随温度  $T$  的变化

5. 静态参数 样品的特征长度  $l$ , 饱和磁化强度  $4\pi M$  用磁泡静态测量法测量. 单轴磁各向异性常数  $K_u$  用转矩仪测量.  $l$ ,  $4\pi M$ ,  $K_u$  及材料品质因数  $Q = K_u/(2\pi M^2)$  随温度的变化曲线如图 2 所示.

6. 双重曝光照相法 为深入研究图 1(d) 中  $H_{[a]}$  和  $H_{[b]}$  线之间的硬泡形成区 HB, 揭示软畴段硬化与畴段运动形式的关系, 采用文献[4]的双重曝光照相法, 在同一底片上拍摄软畴段在一次脉冲偏场作用前后的象. 对 1# 样品, 在  $T = 40$  和  $74^\circ C$  两个温度下所得结果分别如图 3 和图 4 所示.

### 三、讨 论

1. 由图 1(d) 可见,  $H_{[i]}$  和  $H_{[b]}$  之间的硬泡形成区 HB 随  $T$  的升高将收缩而消失, 表明存在着一个临界温度  $T_0$ , 当  $T > T_0$  时, 硬磁泡不再形成. 对 5# 样品,  $T_0 = 93 \pm 1^\circ\text{C}$ , 其余样品的  $T_0$  值列于表 1. 很明显, 这里的  $T_0$  是和文献[1,2]中的所谓特征温度  $T_H$  相对应的. 而图 1(c) 的  $(\Delta H)_{\max}-T$  曲线则分别相应于文献[1]中的  $\Delta H-T$  曲线及文献[2]中的  $\Delta H/H_0-T$  曲线.

2. 然而, 由于采用了一次脉冲偏场法, 从图 1(a), (b), (d) 可以清楚地看到随  $T$  的升高, 硬磁泡的形成, 即条畴壁中 VBL 群体的形成有两个明显不同的阶段, 它们的分界温度为  $T_{01}$ . 对于 5# 样品,  $T_{01} = 75 \pm 2^\circ\text{C}$ . 其余样品的  $T_{01}$  值列于表 1.

3.  $T < T_{01}$  阶段  $H_{[i]}$  和  $H_{[b]}$  随  $T$  升高近乎平行地下降, 硬泡形成区宽度几乎不变. 由图 1(d) 还可见, 在整个测量温度范围内  $H_{[d]}$  近乎线性下降约 15 Oe, 因而在不同温度下所用的  $H_{b0}$  也同步下降. 但在  $T < T_{01}$  温区内,  $H_{[i]} = H_{b0} + H_{pi}$  随  $T$  升高而下降的斜率明显地大于  $H_{[d]}$  的, 这表明当  $T$  升高后, 在一次脉冲偏场作用下, 条畴壁中 VBL 群体的形成可能在较小的  $H_{pi}$  下实现. 另一方面,  $H_{[b]} = H_{b0} + H_{p0}$  的平行下降则表明  $H_{p0}$  随  $T$  升高也应明显减小. 该温区内  $H_{pm}$  的下降(图 1(b))则和  $H_{[i]}$  及  $H_{[b]}$  相对应.

文献[4]中曾在一个典型的 YSmCa 样品上用双重曝光照相实验揭示出一次脉冲偏场作用下软畴段的运动形式大致可分六种: 小摆; 中摆; 大摆; 弓缩; 伸长和伸直及整体运动. 前三种是畴段端部的摆动, 简称“端摆”, 指的是在脉冲偏场作用下畴段的一端摆动或两端同时摆动, 但在摆动的同时畴段长度有所缩短. 按摆幅大的一端的摆幅与畴段宽度之比, 端摆大致可分为三类: 0—2, 2—4 及大于 4, 分别相应于“小摆”, “中摆”和“大摆”. “弓缩”定义为弓形畴弯部明显收缩, 畴段长度又减小的运动. “伸长和伸直”指畴段有明显的伸长或者在趋于伸直的同时有所伸长的运动. “整体运动”则指整个畴段发生了旋转, 位移等运动. 文献[4]还发现, 室温下与软畴段的硬化相联系的主要的运动形式是弓缩和中摆两种而软畴段不能硬化的运动形式主要是伸长和伸直, 小摆及整体运动三种.

在室温至  $T_{01}$  温区内  $H_{[i]}$  和  $H_{[b]}$  的平行下降及  $P_{\max}$  几乎不变(图 1(a))等事实使我们有理由推论, 在该温区内 VBL 群体形成的情形相同, 即硬泡形成与软畴段运动形式的关系相同. 为了证实这一点, 我们选取磁畴照相反差较好的 1# 样品作了双重曝光照相实验. 该样品  $T_{01} = 65^\circ\text{C}$ , 因而选照相温度  $T = 40^\circ\text{C}$ , 处于室温至  $T_{01}$  温度中央. 结果如图 3 所示. 由图 3(a) 可见, 形成硬泡的主要运动形式是中摆(39.6%)和弓缩(33.3%), 两者合计占约 73%, 图 3(b) 则表明软畴段不能硬化的运动形式主要是整体运动(27.4%), 小摆(26.8%)及伸长和伸直(23.2%)三种, 合计约占 77%. 这个结果与 2# 样品室温下的结果(文献[4]图 7)定性上完全相同, 只是各运动形式占的比例大小稍有消长.

软畴段的硬化与其运动形式的关系表明畴壁运动速度是关系 VBL 群体形成的一个重要因素. 对于一平面 Bloch 壁, 在阶跃驱动场  $H$  (如脉冲偏场)作用下, 如果  $H$  小于

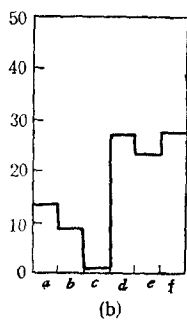
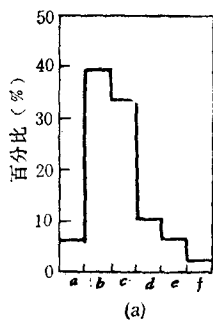


图3  $T = 40^\circ\text{C}$  时, 1# 样品软畴段的六种主要运动形式在(a)硬磁泡(48个)(b), 软磁泡(190个)形成中的百分比  $a$  为大摆;  $b$  为中摆;  $c$  为弓缩;  $d$  为小摆;  $e$  为伸长和伸直;  $f$  为整体运动

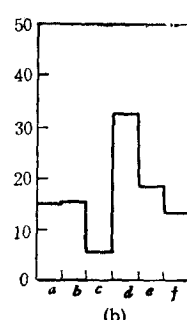
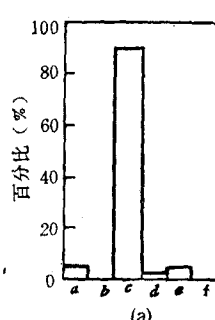


图4  $T = 74^\circ\text{C}$  时, 1#样品软畴段的六种主要运动形式在(a)硬磁泡(48个), (b)软磁泡(160个)形成中的百分比  $a$  至  $f$  的含义同图3

Walker 临界场  $H_{wc}(=2\pi M\alpha)$ , 则畴壁运动速度  $\dot{q}$  与  $H$  呈线性关系<sup>[8]</sup>

$$\dot{q} = \frac{\gamma\Delta_0}{\alpha} H, \quad (1)$$

式中  $\Delta_0$  为畴壁宽度参量,  $\gamma$  为旋磁比,  $\alpha$  为 Gilbert 阻尼常数. 在  $H$  大于  $H_{wc}$  的高驱动情形下, 畴壁中磁化矢量绕  $H$  进动, 在  $h = H/H_{wc}$  足够大时, 且在高  $Q$  近似下, 平均畴壁速度<sup>[8]</sup>

$$\langle \dot{q} \rangle = \frac{\alpha\gamma\Delta_0}{1+\alpha^2} H \approx \alpha\gamma\Delta_0 H. \quad (2)$$

对于含有大量 VBL 的平面 Bloch 壁, 在高  $Q$  近似下, 畴壁运动速度<sup>[8]</sup>

$$\dot{q} = \frac{\alpha\gamma\Delta_0}{1+\alpha^2} H \approx \alpha\gamma\Delta_0 H. \quad (3)$$

该式与不含 VBL 的畴壁在高驱动场下的平均畴壁速度(2)式相同.

对于我们的实验, 例如 5# 样品, 是 YSmLu Ca 材料,  $\alpha$  一般在 0.01 和 0.1 之间<sup>[9]</sup>, 因而在整个测量温度范围内所用的脉冲偏场  $H_p \approx 10-90\text{Oe}$  (见图 1(d)) 一般都大于  $H_{wc}$ . 又小于(2)式成立所需驱动场, 所以严格说来(1)和(2)式都不适用. 再者, 软畴段在一次脉冲偏场作用下经历了一个 VBL 从无到有的过程, 故(3)式也不能采用. 实际情况还要复杂得多: 我们的实验对象是软畴段而不是平面畴壁, 而且软畴段不但受  $H_p$  的作用, 还受扁平小线圈中偏场梯度的作用及畴段间的相互作用. 尽管如此, 畴壁速度(1)一(3)式的共同特点是畴壁速度正比于  $\Delta_0$ , 这一点可以作为我们定性解释  $T < T_0$  阶段的依据.

考虑到特征长度  $l = \sigma_0/(4\pi M^2)$ , 畴壁能密度  $\sigma_0 = 4\sqrt{AK_u}$ , 品质因数  $Q = K_u/(2\pi M^2)$ , 则畴壁宽度参数

$$\Delta_0 = \sqrt{A/K_u} = l/(2Q), \quad (4)$$

式中  $A$  为交换常数. 从图 2 可见,  $l$  和  $Q$  值在整个测量温区中都随  $T$  上升单调下降, 但  $Q$  比  $l$  下降得快, 因而  $\Delta_0$ , 进而畴壁运动速度都随  $T$  上升而单调增大. 实际上, 图 1(d) 的磁泡动态消灭场  $H_{[a]}$  的温度关系曲线形象地表现了这一点: 畴壁速度越快, 动态消灭所

需脉冲偏场就越小,故  $H_{[a]}$  随  $T$  升高而下降. 正因为畴壁运动速度增大,所以在较高的温度下,较小的  $H_p$  就能使软畴段产生幅度较大的中摆和弓缩等导致 VBL 形成的运动,故  $H_{[i]}$  较小;另一方面,使软畴段发生不能形成 VBL 的整体运动,大摆和伸长伸直等大大幅度运动所需的  $H_p$  也较小,故  $H_{[b]}$  较小. 总之,在室温至  $T_{01}$  温度区间内  $H_{[b]}$ ,  $H_{[i]}$  与  $H_{[a]}$  近乎平行下降表明了畴壁运动速度是个关键因素.

4.  $T_{01} < T < T_{02}$  阶段 在该温区,正如图 2 中  $l$ ,  $4\pi M$  及图 1(d) 中的  $H_{[a]}$  的温度曲线所反映的,畴壁运动速度仍随  $T$  增大,但图 1(d) 中的  $H_{[i]}$  和  $H_{[b]}$  曲线却很快分别上翘和下降,形成一个奶头状的 HB 区,它的终点即为临界温度  $T_{02}$ . 当  $T > T_{02}$  时,硬磁泡不再形成,即条畴壁中 VBL 不再形成. 与此相应的是图 1(a) 中  $P_{max}$  很快下降至零. 这些事实表明该温区中 VBL 群体形成的情形不同于  $T < T_{01}$  温区. 为了探知差别,在该温区中央也作了双重曝光实验. 对 1# 样品,  $T_{01} = 65^\circ\text{C}$ ,  $T_{02} = 80^\circ\text{C}$  因而选照相温度  $T = 74^\circ\text{C}$ , 其结果示于图 4. 与图 3 相比可见该温区的特点是软畴段的中摆不再能形成 VBL, 形成 VBL 的畴段运动形式几乎只有弓缩(89.6%). 事实上,因弓缩而形成硬泡的几率也随温度升高从 10% 很快下降至零,当  $T > T_{02}$  时,连弓缩也不再能形成 VBL.

## 四、结 论

本文通过一次脉冲偏磁场作用下外延石榴石磁泡膜条畴中 VBL 群体形成与温度关系全过程的实验研究,得到了下述结论:

1. 存在一个与材料参数有关的临界温度  $T_{02}$ , 当温度  $T > T_{02}$  时硬磁泡不再形成.  $T_{02}$  相应于文献[1,2]中的“特征温度”  $T_H$ .

2. 在室温至  $T_{02}$  的温区内,条畴壁中 VBL 群体形成即软畴段硬化有两个明显不同的阶段,它们的分界温度为  $T_{01}$ .

3. 在室温至  $T_{01}$  的温区内,导致 VBL 形成的软畴段的主要运动形式是弓缩和中摆,这和室温时的情形相同. 用畴壁运动速度随温度  $T$  上升而增大可以定性解释“硬泡形成的阈值场”  $H_{[i]}$  及“软硬磁泡形成的分界场”  $H_{[b]}$  随  $T$  的平行下降.

4. 在  $T_{01}$  至  $T_{02}$  温区中,  $H_{[i]}$  和  $H_{[b]}$  随  $T$  的变化不能用畴壁速度的增大来解释,而且导致 VBL 形成的软畴段运动形式只剩下弓缩一种. 当  $T > T_{02}$  时,连弓缩也不能形成 VBL.

作者感谢周永富和曹克定两位同志在建立加温设施上的帮助.

[1] R. D. Henry et al., *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-9** (1973), 514.

[2] K. Hoshikawa et al., *Japan J. Appl. Phys.*, **15** (1976), 387.

[3] S. Konishi, *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-19** (1983), 1838.

[4] 韩宝善、聂向富、唐贵德、奚卫, *物理学报*, **34**. (1985), 1396.

[5] 聂向富、唐贵德、凌吉武、韩宝善, *物理学报*, **35**. (1986), 338.

[6] 韩宝善、凌吉武、李伯斌、聂向富、唐贵德, *物理学报*, **35**. (1986) 130.

[7] 李靖元、于志弘、韩宝善、张寿恭, *物理学报*, **34**. (1985), 248.

[8] 刘英烈等, 磁泡, 科学出版社, (1986), 43—49页.

[9] B. Ferrand *et al.*, *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-23**, (1987), 3391.

## TEMPERATURE DEPENDENCE OF HARD BUBBLE FORMATION IN PULSE BIAS FIELDS

HAN BAO-SHAN XIU JIA-FA

(*Institute of Physics, Academia Sinica*)

NIE XIANG-FU SUN HUI-LING OUYANG FANG-LI TANG GUI-DE

(*Department of Physics, Hebei Normal University, Baoding*)

### ABSTRACT

The temperature dependence of VBL group formation in stripe domain walls of epitaxial garnet bubble films was investigated by means of the method of single-pulse bias field. A critical temperature  $T_{02}$  was found, which relates to the parameters of bubble films. When  $T > T_{02}$ , hard bubbles no longer form. It was also found that, when  $T < T_{02}$ , there are two different stages for VBL group formation. Their demarcation temperature is  $T_{01}$ . The experimental curves in the first stage have been qualitatively interpreted. And the difference of soft domain segment movements, which lead to their hardening, in the two stages has been revealed by means of the method of double exposure photography.