

垂直布洛赫线在畴段畴壁中的形成和消失

毛廷德 李靖元 樊世勇 刘英烈

(中国科学院物理研究所)

1982 年 3 月 26 日收到

提 要

在不同的直流偏场下,对脉冲偏场作用后的磁泡膜中的磁畴观测结果表明:磁泡膨胀时的分枝生长往往伴随有大量垂直布洛赫线(以下称 VBL)产生;它的正负与反向畴膨胀时所施加的直流偏场大小有确定关系;在幅度不太高的系列脉冲作用下畴端运动可使畴壁中形成大量 VBL;足够强的脉冲偏场可使 VBL 消失.

引 言

在测量磁泡外延膜的一些静态参数时,用脉冲偏场切割蜿蜒形条状畴是一种产生磁泡的可行方法.得到的一些畴段在直流偏场增加时,经历着收缩成泡,泡径缩小和磁泡破灭的过程.由此可以测得成泡场及缩灭场 H_{col} 等材料的性能参数.在未经离子注入的样品中,常能观察到 H_{col} 值的弥散. H_{col} 高的磁泡叫硬泡.不少人对硬泡现象进行了研究,认为硬泡的一些特征反映了畴壁中存在大量同号的 VBL (vertical bloch lines)^[1,2]. 局部水平布洛赫线的运动导致 VBL 的形成^[3,4], 常来说明磁泡或磁畴壁的动力学现象,但此时的 VBL 是正负成对的.至于同号 VBL 的形成机制目前尚不清楚.本文研究的是同号 VBL 的形成及其消失的现象.关于偏场条件(直流偏场 H_b 、脉冲偏场幅值 H_p 和脉冲宽度 τ_p 等)对形成的磁泡状态的影响已有过一些描述^[5,6].我们在比较宽的偏场条件范围,观察了 H_b , H_p 和 τ_p 对磁畴花样和畴壁中 VBL 的影响,总结出一些有关畴段端部畴壁运动情况下 VBL 产生和消失的实验规律,并进行了讨论.

实 验 和 结 果

本文实验中所用的主要样品是未经离子注入的、标称成份为 $\text{Y}_{1.9}\text{Sm}_{0.1}\text{Ca}_{1.0}\text{Fe}_{4.0}\text{Ge}_{1.0}\text{O}_{12}$ 的外延膜样品.观测设备是通常的磁泡静态观测设备.亥姆霍兹线圈产生直流偏场 H_b , 扁平小线圈产生脉冲偏场(脉冲前沿小于 $0.1\mu\text{s}$), 脉冲偏场可以是单次脉冲,也可以是系列脉冲,其幅值为 H_p , 宽度为 τ_p . 选取一定的 H_b , 在此基础上施加 H_p , 在 H_p 结束后再观察小线圈范围内的磁畴花样,并测量其 H_{col} , 得到的主要结果和规律如图 1 所示.

1. 当 $H_b + H_p$ 高于曲线 a 时,得到的是伸向中心的条状畴.一种呈“辐射线”状,如图 2(a) 和(b);另一种呈“辐射环”状,如图 2(c). 两类不同花样的出现只与 H_b 的大小

有关而与 τ_p 无关。它们的共同特点是当 H_b 增大反向畴收缩时, 在小线圈的范围内没有孤立畴段得不到磁泡, 如图 2(d), (e) 和 (f) 所示。

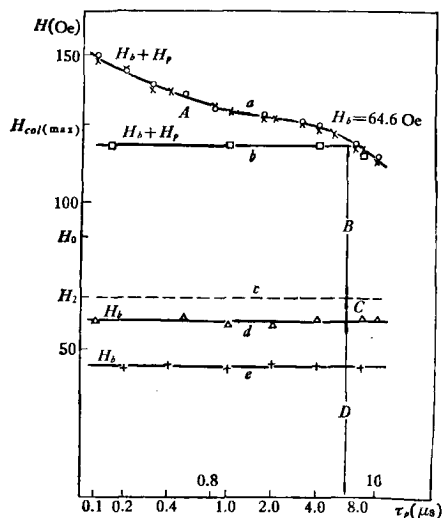


图 1

$H_b + H_p$ 高于曲线 a 时 H_p 结束后形成“辐射”花样的磁畴(图 2), 低于曲线 a 时形成“枝状”花样(图 3)。曲线上 $\times$ 表示未加 H_p 时磁畴花样为蜿蜒畴(通常畴壁中不含 VBL) 所测得的数据点; $\circ$ 为很多硬畴段时得到的数据点。 $H_b + H_p$ 中的 H_b 减小时曲线 a 稍向下平移, 为了简洁起见, 这里只给出了 $H_b = 64.6 \text{ Oe}$ 时的曲线。样品的成份为: $\text{Y}_{1.5}\text{Sm}_{0.1}\text{Ca}_{1.0}\text{Fe}_{4.0}\text{Ge}_{1.0}\text{O}_{12}$

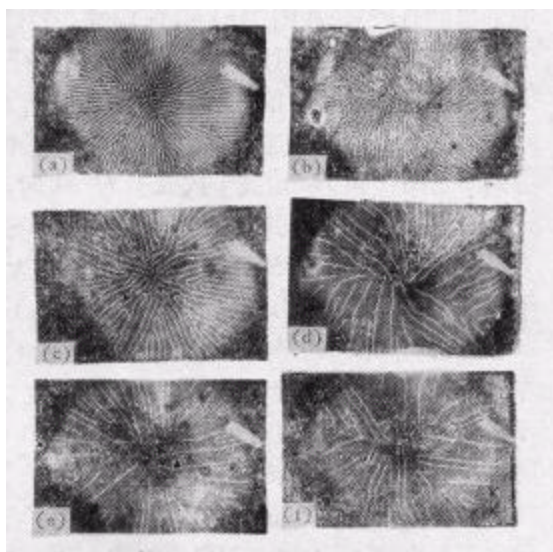


图 2

(a) 对应于 $H_b \approx 15 \text{ Oe}$; (b) — 45 Oe ; (c) — 62 Oe 再叠加 $-H_p$, 当 $H_b + H_p$ 高于曲线 a 时, H_p 结束后形成的磁畴花样; 增大直流偏场反向畴收缩时磁畴花样的变化分别为 (d), (e) 和 (f)

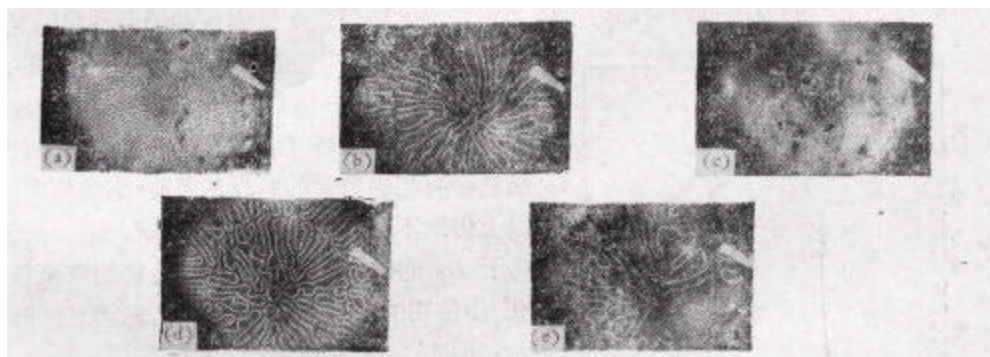


图 3

(a) 对应于 $H_b \approx 15 \text{ Oe}$ ($< H[d]$), 再叠加 $-H_p$, 当 $H_b + H_p$ 低于并接近于曲线 a , H_p 结束后得到的磁畴花样; (b) 和 (c) 是直流偏场增大时磁畴花样的变化; (d) 对应于 $H_b = 62 \text{ Oe}$ ($> H[d]$) 时, H_p 结束后的磁畴花样; (e) 为直流偏场增大时磁畴花样的变化

施加 H_p 以前畴段的缩灭场可以有很大的区别, 正常泡的缩灭场 $H_0 = 88.5 \pm 0.5 \text{ Oe}$, 硬泡缩灭场的最大值 $H_{\text{col(max)}} = 126 \text{ Oe}$ 。这种畴段状态的区别对 a 线的测量结果没有影响, 如图 1。

2. 总偏场 $H_b + H_p$ 低于并接近于曲线 a 时, 脉冲结束之后得到的是“多枝状”磁畴花样(如图 3(a)) 或“单枝状”磁畴花样(如图 3(d)), 与外部磁畴无任何连结。两种花样的出

现只与 H_b 的大小有关, $H_b < H[d]$ (图 1 中水平线 d 对应的直流偏场) 时形成“多枝畴”, $H_b > H[d]$ 时则形成“单枝畴”. 前者收缩成非常硬的泡, 或者只能收缩为畴段 (有时带有简单的分枝), 如图 3(b) 和 (c), 并在较高的 H_b 值 ($\sim 106\text{Oe}$) 以畴段的形式破灭. 后者的情况, 仔细检查可以看出, 中间的磁畴花样只有两个端点, 只是由于畴段的弯曲形成, 无任何枝叉, 即所谓“单枝畴”. 直流偏场增大时收缩为正常泡.

3. 上述磁畴花样还可以由下述方式复制. 选定某 H_b 值, 扁平小线圈也通以直流电流并瞬时切断. 当 H_b 值高于或低于 $H[d]$ 时, 调节小线圈的电流, 使小线圈范围内只保留一个磁泡, 然后突然切断电流, 即用快速退磁的方法^[7], 可以分别得到类似于图 3(d) 或图 3(a) 的磁畴花样. 若流经小线圈的电流较大, 磁泡全部破灭, 则在切断电流后, 当 H_b 高于或低于 $H[d]$ 时将分别得到类似于图 2(c) 或图 2(a) 和 (b) 的磁畴花样.

4. 当 H_b 增大时“多枝畴”缩成硬畴段 (图 3(c)), 在小幅度系列脉冲的作用下将像风车一样地旋转^[8,9]. 旋转方向与产生这种磁畴花样时所选择的 H_b 值有关. 当 H_b 高于水平线 e 时; 硬畴段按顺时针方向旋转, 而 H_b 低于水平线 e 时则按反时针方向旋转. 由顺时针旋转到反时针旋转 H_b 的过渡范围小于 2.0Oe .

在另外几个 $(\text{YSmCa})_3(\text{FeGe})_2\text{O}_{12}$ 的样品中, 一种 $(\text{YEuEr})_3(\text{FeGa})_2\text{O}_{12}$ 的样品中都得到了与上述 1—4 完全相似的规律; 另一种 $(\text{YSm})_3(\text{FeGa})_2\text{O}_{12}$ 的样品中得到与 1—3 相似的规律.

5. 当 H_b 在区域 C 内, $H_b + H_p$ (这里的 H_p 为系列脉冲) 在区域 A 内, 脉冲结束后得到的全部是可以缩为正常泡的畴段; 若 $H_b + H_p$ 低于水平线 b 落在区域 B 内则出现硬泡, 这是文献[6]的主要结果. 在该文中曾提到 H_b 不能太低, 本文的实验结果表明 H_b 的下限就是 $H[d]$.

6. 按照上面的方法得到全部可以缩为正常泡的畴段. 如果固定偏场条件 (H_b , H_p 和

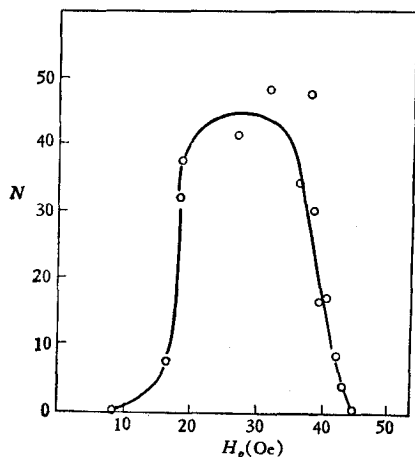


图 4 “硬化”后在 $H_b > H_2$ 时哑铃畴的数量 N 与“硬化”时使用的脉冲幅度 H_p 的关系曲线
“硬化”条件为: $H_b = 60.8\text{Oe}$, 系列脉冲宽度 $\tau_p = 0.2\mu\text{s}$, 频率 $f = 50\text{Hz}$, 作用时间 $\sim 5\text{sec}$

τ_p) 每次操作所得到的畴段数大致是相同的. 再把 H_b 选定在另一值 (不一定在 C 区内) 并加以小幅度系列脉冲磁场 (以下称这一过程为“硬化”), 结果会有相当数量的畴段在条畴-泡畴转变场 H_2 以上仍缩不成泡而以哑铃的形式存在, 并在明显高于 H_0 的磁场破灭. 这种哑铃畴的数量与“硬化”中使用的脉冲幅度 H_p 有关, 两者之间的关系示如图 4.

7. 按照实验 2 的方法首先获得一“多枝畴”, 把 H_b 增到比 H_2 稍大一些的值, 形成一个硬畴段. 在此基础上加一幅度为 H_p 的单次脉冲 ($H_b + H_p < H_{\text{col}}$), 其前后沿都为 10^2ms 量级, 也就是使这一硬畴段准静态的压缩和膨胀. 经过 50 次以上的脉冲后硬畴段的长度有所缩短, 但不消灭. 如果把 H_p 的前沿缩短到小于 ms 量级, 则经过几次这样的脉冲便可使这一硬畴段缩短、成泡和破灭. 在个别情况下一次脉冲可以完

成这种变化. 无论正向脉冲(压缩)还是反向脉冲(膨胀)都能使硬畴段缩灭. 图 5(a) 和 (b) 分别是正向和反向脉冲次数与硬畴段缩灭过程的关系曲线.

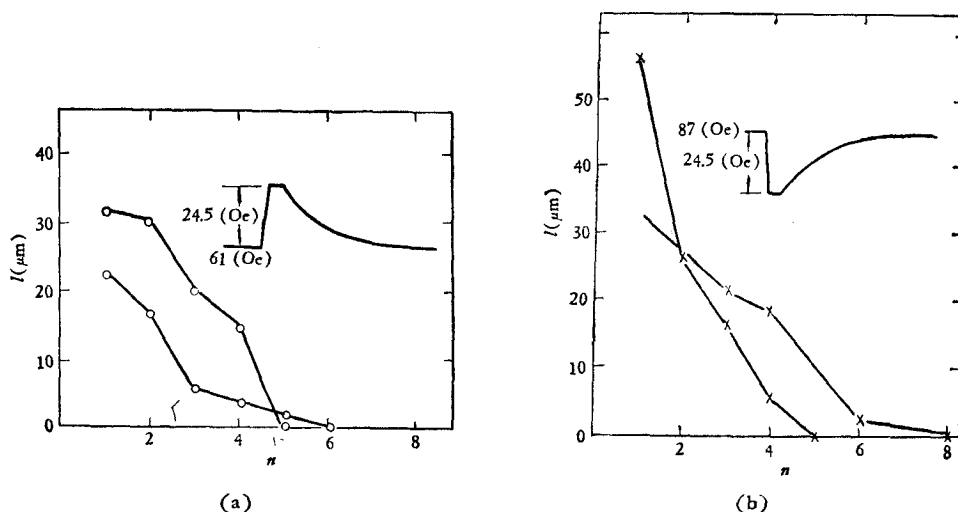


图 5 两个硬畴段经 n 次正(a)或负(b)脉冲作用后其长度 l 变小、成泡和缩灭的变化过程
 $l > 9 \mu\text{m}$ 呈硬畴段; $l < 9 \mu\text{m}$ 呈泡畴

讨 论

1. 图 1 中曲线 a 是依照磁畴花样来确定的. 扁平小线圈通以直流电流的实验 3 已准确地复制了这些磁畴花样, 说明当 $H_b + H_p$ 高于曲线 a 时, H_p 结束前小线圈内的反向磁畴已完全缩灭; 当 $H_b + H_p$ 低于并接近于曲线 a 时, H_p 结束后小线圈范围内保留了个别未缩灭的磁泡. 因此曲线 a 代表磁泡刚刚缩灭所需要的最低总偏场.

2. 畴段“硬化”实验 6 是具有启发性的, 说明当脉冲偏场 H_p 的幅度值在某一定范围时, 畴壁内积聚的 VBL 最多, 能观察到大量“哑铃畴”. H_p 减小或增大, “哑铃畴”的数目都呈现减少的趋势. 显然, H_p 的大小要影响畴段端部的运动速度. 在偏光显微镜下也可观察到, 畴段端部在系列脉冲偏场作用下颤动, 其幅度随脉冲幅度的增加而增大. 因此实验 6 表明, 畴端速度是影响 VBL 形成或消失的重要因素. 其基本规律是: 低速的畴端运动不会产生 VBL; 当速度较高时就要产生 VBL; 但速度更高时, 畴端运动会使 VBL 消失. 本文实验表明 VBL 在高速畴端运动中的消失现象和已报道的硬泡在高速传输运动中的 VBL 消失现象^[10]有相似之处.

3. 在正脉冲偏场作用下, 除了可能出现磁畴被切割的过程外, 畴段总是要收缩. 当总偏场高于曲线 a 时, 畴段经历缩短、成泡和泡径缩小以致破灭等整个程序. 当脉冲幅度较小时, 只有畴段的缩短过程.

在定性地说图 1 中水平线 b 的意义时, 我们引用讨论 2 中的推论, 即 VBL 的形成或消失与畴壁速度有关. 我们认为在畴端运动中存在两个临界速度, 分别标为 $V_{\text{产生}}$ 和 $V_{\text{消失}}$, 后者的数值明显地大于前者. 当速度小于 $V_{\text{产生}}$ 时, 畴端运动不产生 VBL; 当速度大于 $V_{\text{产生}}$ 并小于 $V_{\text{消失}}$ 时, 畴端运动形成 VBL; 当速度大于 $V_{\text{消失}}$ 时, VBL 消失.

实验中观察的是大量畴段组成的群体,各畴端的运动速度有差别,而且各畴端在运动过程中的速度也会改变,但总体来说,畴端速度随总偏场增大而增大.水平线 b 相应的总偏场值 $H[b]$ 正是把畴端运动最低速度提高到 $V_{\text{消失}}$ 所需的最低总偏场值.当总偏场低于此值时,部分畴端运动速度低于 $V_{\text{消失}}$,就有 VBL 形成,所以是个临界值.

在测定水平线 b 时,使用的脉冲幅度比较大,畴端运动经历的时间比较短.对于实验中所使用的各种宽度的脉冲磁场,畴端运动有大致相同的过程,即在脉冲偏场作用下,畴段都能收缩成泡.同时由于畴段运动速度主要取决于总偏场的大小,因此导致 b 线是一条水平线,即临界值 $H[b]$ 与 τ_p 无关.

然而到达曲线 a 还要经历泡径缩小及破灭的过程,除与 H_p 有关外还受脉冲宽度 τ_p 的影响,因此曲线 a 随 τ_p 的增大而下降.很显然当 $\tau_p \rightarrow \infty$ 时 $H_b + H_p \rightarrow H_0$.

在 $H_b + H_p$ 低于并接近于曲线 a 的情况下,脉冲结束后反向畴自由膨胀,这时的偏场阶跃已不能再认为是 H_p ,因为此时的反向畴是处于一种接近破灭的磁泡状态,相当于偏场稳定在接近 H_0 的状态,所以此时的偏场阶跃应由 $H_0 - H_b$ 确定. H_0 是一确定值,畴端运动情况决定于 $H_0 - H_b$,可见在膨胀过程中 H_b 对 VBL 的形成起重要作用.在由磁泡膨胀扩大成条状畴的过程中,畴端运动速度 V_w 有一个由大到小的分布,但是当 $H_b > H[d]$ 时,在膨胀过程中即使畴端运动速度最大的时候仍达不到 $V_{\text{产生}}$;而当 $H_b < H[d]$ 时,则会出现有一段过程的 $V_w > V_{\text{产生}}$,因此常常有 VBL 产生. τ_p 虽不同,只要都是接近于曲线 a ,膨胀过程的初态都是接近破灭的磁泡状态,所以得到的水平线 d 是一条与 τ_p 无关的水平线.

$H_b + H_p$ 在 A 区都是缩成泡的状态,只是泡径大小不同.脉冲结束后膨胀过程的情况与 $H_b + H_p$ 接近于 d 线的情况相似.在实验 5 中我们给出全部可以缩成正常泡的畴段时 H_b 的下限为 $H[d]$,其原因也就在于此.因为在此情况下 $H_b + H_p > H[b]$ 可使所有 VBL 消失,而当 H_p 结束后 $H_b > H[d]$ VBL 又不产生,这样就保证了可以形成全部可以缩为正常泡的畴段.

4. 由实验 7 可知,无论是膨胀或压缩过程的高速畴端运动都可以使 VBL 消失,即 VBL 的消失与畴壁的运动方向无关.

5. 反向磁畴的扩大有两种形式,一种是分枝生长扩大(图 2(b)和图 3(a)),一种不分枝只是畴端伸长或增多弯曲部分(图 2(c)和图 3(d)).由实验 1 和 2 以及大量的观察,我们的结论是:在未经离子注入的磁泡膜中分枝磁畴的生长往往伴随有 VBL 的产生.梳状畴^[11]含有大量的分枝,畴壁中包含有大量的 VBL 也是一个典型的例证.

6. 由图 1 可以看到,当 τ_p 增大到某值时, a 线和 b 线汇合.脉冲宽度大于该交点时就不能得到全部可以缩为正常泡的畴段,这说明产生正常泡的条件也受到 τ_p 的限制.由曲线可以看出 τ_p 越小产生软泡的 $H_b + H_p$ 的范围越宽.

7. 直流偏场以水平线 c 线为界形成正负不同的 VBL,其原因尚待进一步的探讨.

结 论

1. 脉冲偏场作用下的畴端运动,畴端速度决定 VBL 的形成或消失:畴端速度较低

时, VBL 不会形成;畴端速度较高时,有 VBL 形成;畴端速度更高时, VBL 消失

2. 在较低偏场下的磁泡膨胀是分枝生长,由于包含数目较多的畴端,而且畴端速度较高,常常形成大量 VBL。分枝畴随着直流偏场提高收缩为硬畴段,在小幅度系列脉冲作用下可以有不同的旋转方向。偏场高于某值时得到的分枝畴,其硬畴段顺时针旋转,偏场低于该值时得到的分枝畴,其硬畴段逆时针旋转,可见直流偏场对 VBL 的正负号有影响。

3. 根据畴端运动速度决定 VBL 的形成或消失的观点,定性地解释了在系列脉冲偏场作用下,直流偏场和脉冲偏场对畴段或较复杂磁畴花样是否包含 VBL 的影响。

在施加正脉冲偏场时,得到不包含 VBL 的畴段的必要条件是,压缩时的畴端高速运动和膨胀时的畴端低速运动。

参 考 文 献

- [1] J. C. Slonczewski, A. P. Malozemoff and O. Voegli, *AIP. Conf. Proc.*, **10**(1972), 458.
- [2] T. Kobayashi, H. Nishida and Y. Sugita, *J. Phys. Soc. Japan*, **34**(1973), 555.
- [3] F. B. Hagedorn, *J. Appl. Phys.*, **45**(1974), 3'29.
- [4] A. P. Malozemoff and J. C. Slonczewski, *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-11**(1975), 1091.
- [5] H. Nishida, T. Kobayashi and Y. Sugita, *AIP. Conf. Proc.*, **10**(1972), 493.
- [6] 刘英烈等, *物理学报*, **29**(1980), 241.
- [7] W. J. Tobor, A. H. Bobeck, G. P. Vella-Coleiro and A. Rosenewaly *Bell. Syst. Tech. J.*, **51**(1972), 1427.
- [8] J. C. Slonczewski, A. P. Molozemoff and O. Voegli, *AIP. Conf. Proc.*, **10**(1972), 472.
- [9] F. G. West and D. C. Bullock *AIP. Conf. Proc.*, **10**(1972), 483.
- [10] R. W. Patterson *AIP. Conf. Proc.*, **24**(1974), 608.
- [11] R. Wolff and J. C. North *Bell. Syst. Tech. J.*, **51**(1972), 1436.

GENERATION AND ANNIHILATION OF VERTICAL BLOCH LINES IN STRIP DOMAIN WALLS

MAO TING-DE LI JING-YUAN FAN SHE-YONG LIU YING-LIE

(*Institute of Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

Magnetic domains in a magnetic bubble film have been observed in different bias fields after application of pulsed bias fields. The experimental results indicate that the formation of multifingered domains during the rapid expansion of bubbles is usually accompanied by the generation of a large amount of vertical Bloch lines (VBL). The sign of the VBL has a definite relation to the strength of the bias fields applied. On application of a series of bias pulses which are not very strong, the motion of strip domain heads leads to the generation of a large amount of VBL in the domain walls. The VBL will disappear when the pulsed bias fields are strong enough.