

面内磁场对硬磁泡形成的影响

韩宝善 凌吉武 李伯臧
(中国科学院物理研究所)

聂向富 唐贵德
(河北师范大学物理系)
1985年1月29日收到

提 要

实验研究了面内磁场对一次脉冲偏磁场作用下外延石榴石薄膜中硬磁泡形成的影响。发现存在一个使硬磁泡不再形成的临界面内磁场 H_{in}^0 , 它与材料参量有关。通过实验, 运用面内磁场对条状畴的作用和枝状畴的形成, 定性解释了软硬磁泡形成的分界场 H_{cb} 随面内磁场增大、快降以及缓降这三个物理过程。

引 言

在面内磁场 (in-plane field, 以下记作 H_{in}) 的作用下, 磁畴和畴壁的静态和动态性质, 会发生很大的变化, 所以在磁泡材料和器件的研制中, 施加面内场是一个重要的手段。

Dorleijn 等人^[1]的计算表明, 外延石榴石磁泡膜的畴壁能, 随 H_{in} 的增大而减小; 在同一 H_{in} 下, 平行于 H_{in} 的畴壁的能量总比垂直于 H_{in} 的畴壁小。这反映了磁泡膜中条状畴总倾向于沿 H_{in} 排列的实际情况。 H_{in} 还影响畴壁运动的速度。石榴石膜中单个直畴壁的运动速度^[2], 磁泡畴壁的径向速度^[3]以及在梯度磁场中的传输速度^[4]在 H_{in} 中都有显著的提高。不仅如此, H_{in} 还影响畴壁内磁化矢量的构型, 从而对磁泡的状态有着强烈的影响^[5-7]。对于畴壁内有大量同号垂直布洛赫线 (vertical Bloch line, 以下记作 VBL) 的高 S 数的硬畴段和硬磁泡, H_{in} 同样有强烈的影响。本实验室曾简短报道过在小于 200Oe 的 H_{in} 中硬磁泡形成规律的变化^[1]。该文实际上导出了两方面的研究工作, 即 H_{in} 对畴壁中已有的 VBL 结构的静态消除以及 H_{in} 对畴壁中 VBL 形成的影响和抑制。在前一方面, 文献[8]已给出不少实验结果, 而后一方面, 正是本文的目标。我们在一些不同的磁泡样品上详细研究了 H_{in} 对一次脉冲偏磁场 (垂直于膜面) 作用下硬磁泡形成^[1]的影响。由于实验结果完全相似, 所以本文只给出典型样品 1# 的结果, 并作了定性的解释。

1) 李靖元, 韩宝善, 私人通讯。

实 验 方 法

1[#]样品是标称成分为 $(\text{YSmCa})_3(\text{GeFe})_5\text{O}_{12}$ 的(111)晶面外延磁泡膜, 未经离子注入, 膜厚 $h = 7.6\mu\text{m}$, 室温下泡径 $d = 7.6\mu\text{m}$, 特征长度 $l = 0.94\mu\text{m}$, 饱和磁化强度 $4\pi M_s = 143\text{G}$, 单轴各向异性常数 $k_u = 5.83 \times 10^3 \text{erg/cm}^3$ [10].

面内磁场 H_{in} 由电磁铁产生. 实验中, 使样品的某一 $\langle 110 \rangle$ 晶向与 H_{in} 平行. 然后, 在某一 H_{in} 下, 对处于固定直流偏磁场 H_{b0} 下的起始定向畴段, 施加脉冲宽度 $\tau_p = 0.5\mu\text{s}$ 的不同强度 H_p 的一次偏场脉冲. 再撤去 H_{in} , 观察硬泡形成情况. 象文献[9]那样测定硬泡形成的阈值场 $H_{[i]}$ 以及软硬磁泡形成的分界场 $H_{[b]}$. 它们随 H_{in} 的变化曲线, 则反映 H_{in} 对畴壁中 VBL 形成的影响.

实 验 和 讨 论

1. H_{in} 对一次脉冲偏场作用下硬泡形成的影响

实验测得的样品 1[#] 的 $H_{[i]}$, $H_{[b]}$ 连同磁泡动态消灭场 $H_{[a]}$ [9] 与 H_{in} 的关系曲线如图 1 所示.

由图 1 可见, 硬泡形成的阈值场 $H_{[i]}$ 在 H_{in} 小于 40Oe 时下降不多, 在 40—80Oe 之间下降较快, 后来又不随 H_{in} 改变. 值得注意的是软硬磁泡形成的分界场 $H_{[b]}$. 它随 H_{in} 的增大, 开始基本不变, 后又上升至和 $H_{[a]}$ 线重合, 然后出现快降和缓降两个阶段, 最后又快降至与 $H_{[i]}$ 相交. $H_{[b]}$ 的这种变化使 $H_{[b]}$ 与 $H_{[i]}$ 之间的硬泡形成区 HB 隆起, 并在 $H_{[a]}$ 与 $H_{[b]}$ 之间造成了两个分离的软泡形成区 SB1 和 SB2, 明显地反映了 H_{in} 对硬泡形成的影响. $H_{[b]}$ 与 $H_{[i]}$ 的交点 (即 HB 区的终点) 相应的面内场, 就是使硬磁泡不再形成, 畴壁中 VBL 的缠绕受到完全抑制的临界面内场 H_{in}^0 . 它与材料参量有关, 对样品 1[#], $H_{in}^0 = 380\text{Oe}$.

此外, 我们还发现, 当 H_{in} 大于 100Oe 时, 如固定 H_{in} 而增大 H_p , 当 H_p 达到某值 H_{pf} 时, 在一次脉冲偏场作用后会出现枝状畴, 如图 2 照片所示. 枝状畴生长场 $H_{[f]} (= H_{pf} + H_{b0})$ 与 H_{in} 的关系曲线见图 1. 可见在硬泡区 HB 内 $H_{[f]}$ 线与 $H_{[b]}$ 线的快降

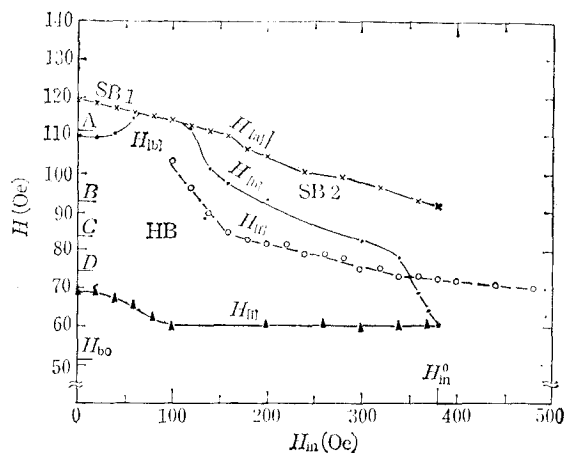


图 1 硬泡形成的阈值场 $H_{[i]}$, 软硬磁泡形成的分界场 $H_{[b]}$ 以及磁泡动态消灭场 $H_{[a]}$ 与面内场 H_{in} 的关系曲线. 虚线为枝状畴生长场 $H_{[f]}$ (H 为总偏磁场, 样品 1[#], $\tau_p = 0.5\mu\text{s}$, $H_{b0} = 51.3\text{Oe}$, 室温)

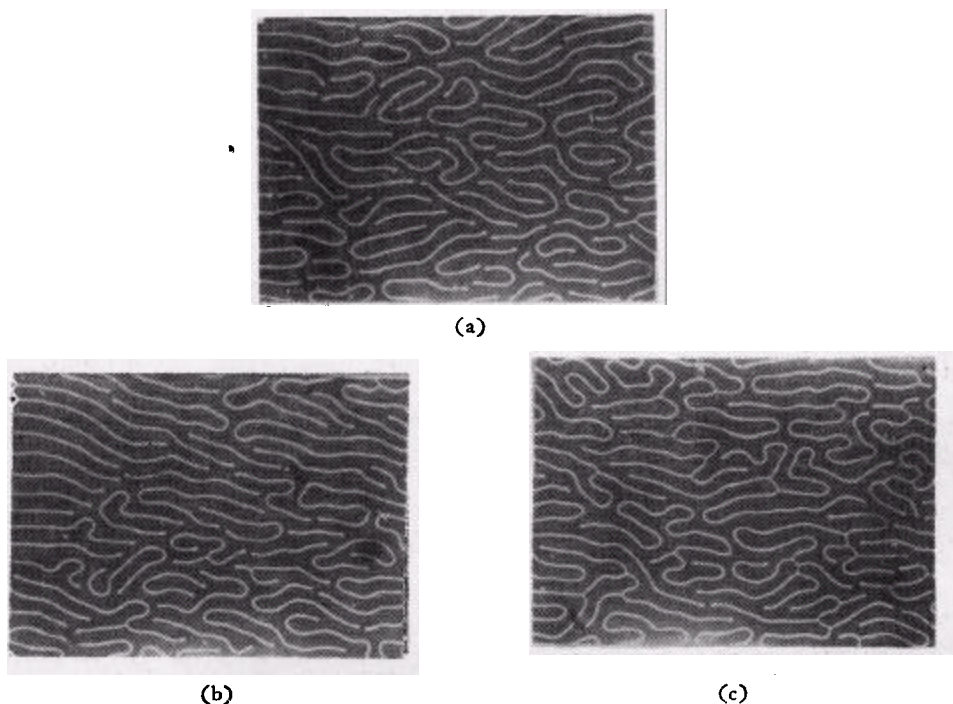


图2 $H_{in} = 200\text{Oe}$ 时, (a) $H_p = 0$, 为起始定向软畴段; (b) $H_p = 31.3\text{Oe}$, 稍大于 $H_{pf}(30.1\text{Oe})$, 出现两条枝状畴; (c) $H_p = 39.4\text{Oe}$, 大量枝状畴出现, 这时相应的总偏场虽仍在 HB 区, 但已十分接近 SB2 区 (H_{in} 与照片底边大致平行, 样品 1*, $\tau_p = 0.5\mu\text{s}$, $H_{bo} = 51.3\text{Oe}$, 室温)

和缓降段的走向大致相同。

为了深入了解 HB 区内的情况, 测定了在几个固定的 H_p 下硬泡形成几率 P 随 H_{in} 的变化, 示于图 3。所选的 4 个典型 H_p 值为 $A(H_p = 60.2\text{Oe})$, $B(41.7\text{Oe})$, $C(32.4\text{Oe})$ 和 $D(23.2\text{Oe})$, 已在图 1 的总偏场 H 轴上标出。

由图 3 可见, A 和 D 两曲线在 $H_{in} < 140\text{Oe}$ 范围内都有 P 峰。考虑到正是在这个范围内, HB 区因 $H_{[b]}$ 线的隆起以及 $H_{[i]}$ 线的下降而扩大, 因而我们认为可以通过 A, D 曲线的 P 峰的分析来探索 $H_{[b]}$ 线上升和快降段的物理原因。与文献[9]一样, 我们也用双重曝光照相法研究畴段硬化与其运动形式的关系。用这个方法时较低的 H_p 值比较合适, 因而我们将重点研究 D 曲线的 P 峰。

2. 关于 $H_{[b]}$ 线上升段和急降段 ($H_{in} < 140\text{Oe}$) 的讨论

1) 畴段运动形式随 H_{in} 的变化

在图 3 的 D 曲线上, 我们选择了处于峰底或峰顶的三个 H_{in} 值, 即 40, 80 和 120 Oe 拍摄了定向软畴段在一次脉冲偏场作用前后畴形的双重曝光照片共 95 幅。分别统计了这三个 H_{in} 下各约 200 条畴段的各种运动形式。几种主要的运动形式^[9]的比例随 H_{in} 的变化如图 4 所示。

由图 4 可见, 当 H_{in} 从 40 Oe 经 80 Oe 增至 140 Oe 时, 畴段端部的小摆比例先增加约 6%, 后又下降 2%。畴端的适中程度的摆动(中摆)前一段下降不多, 后一段下降 4%。

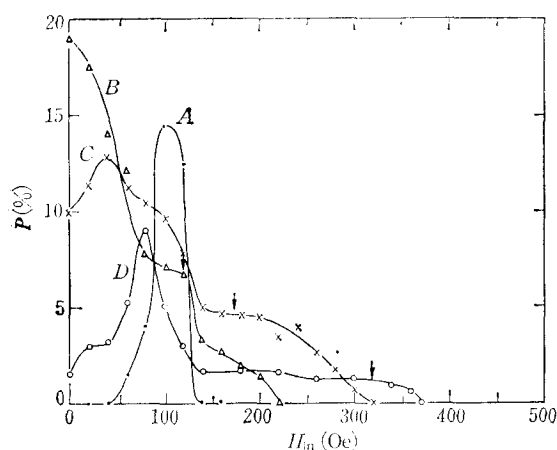


图3 典型脉冲偏场强度 H_p 下硬磁泡形成几率 P 随 H_{in} 的变化 A, B, C, D 四条曲线相应的 H_p 分别为 60.2; 41.7; 32.4 和 23.2 Oe (样品 1#, $\tau_p = 0.5 \mu s$, $H_{b0} = 51.3$ Oe, 室温)

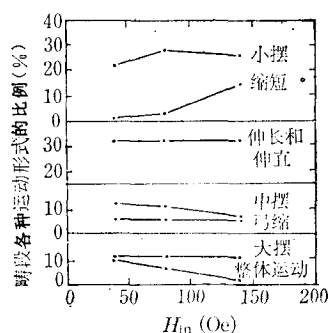


图4 在 $H_p = 23.2$ Oe 的一次脉冲偏场作用下, 畴段的运动形式的比例与 H_{in} 的关系 (样品 1#, $\tau_p = 0.5 \mu s$, $H_{b0} = 51.3$ Oe, 室温)

畴段的伸长和伸直, 畴段弯曲部的弓缩及畴端的大摆动(大摆)的比例都几乎不变; 而畴段的整体运动却直线下降。至于“缩短”, 指的是畴端在脉冲偏场作用下无摆动地收缩。在 $H_{in} > 80$ Oe 时, “缩短”的比例增加很快。实验中发现“缩短”一般不能使软畴段硬化, 这是因为畴端收缩只能产生正负成对的 VBL, 并不改变畴段状态的缘故^[11]。上述畴段运动形式的变化都可以用 H_{in} 对条状畴的作用来解释。

2) 硬磁泡的形成与畴段运动形式的关系

由图 3 可以看到, 整个 D 曲线的硬泡形成几率 P 都不大, 峰值只有 9%, 所以在上面提及的 95 幅双重曝光照片中, 只有 259 条硬化了的畴段。分析和统计了它们的运动形式, 结果示于图 5。图 5 清楚地表明 H_{in} 在 40 至 140 Oe 范围内时, 软畴段硬化的主要运动形式是小摆 (47%), 伸长和伸直 (23%) 以及弓缩和中摆 (19.7%)。这和 $H_{in} = 0$ 的情形^[9]有很大的不同, 明显地反映了 H_{in} 的作用。

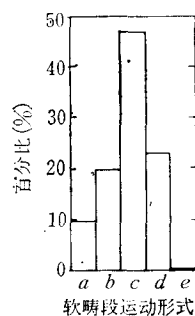


图5 $H_p = 23.2$ Oe, $H_{in} = 40; 80; 140$ Oe 时, 在 259 个硬畴段的形成中, 软畴段的几种运动形式所占的比例 图中 a 为大摆, b 为中摆和弓缩, c 为小摆, d 为伸长和伸直, e 为整体运动

3) 对图 3 $P-H_{in}$ 曲线的解释

综合上述 1) 和 2) 的结果, 我们认为正是畴段运动形式随 H_{in} 的变化导致了硬泡形成几率随 H_{in} 的变化. 例如, 当 H_{in} 从 40Oe 增至 80Oe 时, 图 3 中 D 曲线 P 值的 5.7% 的上升大致可用小摆比例增大 6% 来解释; 而 H_{in} 从 80Oe 增至 140Oe 时, P 值的 6.9% 的下降大致上又和小摆比例减小 2% 以及中摆比例减小 4% 相一致. 至于图 3 中的 A , B 和 C 曲线, 同样可作类似的分析和解释. 总之, 可以合理认为, 在 $H_{in} < 140\text{Oe}$ 范围内 $H_{[b]}$ 线的隆起的物理原因是 H_{in} 对条状畴的作用使有利于在畴壁中形成 VBL 的畴段运动形式的比例有所增加.

类似地还可以解释在小于 100Oe 的 H_{in} 作用下 $H_{[i]}$ 的下降(见图 1). 当 $H_{in} = 0$ 时, 由于小摆难以产生硬泡, 所以 $H_{[i]}$ 较高^[9]. 然而, 图 4 和 5 告诉我们, 当 $H_{in} > 40\text{Oe}$ 时, 小摆比例增大, 而且成为形成硬泡的主要运动形式, 因而导致 $H_{[i]}$ 的下降.

从图 3 可见, 从 140Oe 到 320Oe, D 曲线的 P 很小, P 的变化也很小, 稳定在 1—2% 的很小的比例上. 可以合理地推论, 在这个 H_{in} 的范围内, 由于 H_{in} 对条畴作用大为增强, 使得畴段的运动形式和产生硬泡的运动形式都基本上稳定. 然而, 当 $H_{in} > 320\text{Oe}$ 时, P 却较快地下降至零. 有趣的是, 从图 1 可见, 当 $H_p = 23.2\text{Oe}$ 时, 发生枝状畴生长的面内场正好是 320Oe. 我们把 $H_{in} = 320\text{Oe}$ 在 D 曲线上以 $\downarrow$ 标出. 同样我们把相应于枝状畴生长的面内场也在图 3 的 B 和 C 曲线上标出. 很清楚, B 和 C 曲线上也有类似的情况, 当 H_{in} 大于 $\downarrow$ 指示的面内场时, P 都有较快的下降. 鉴于上述事实, 再考虑到图 1 中 $H_{[i]}$ 曲线大致上和 $H_{[b]}$ 的缓降段平行, 我们认为对于样品 1#, H_{in} 在 140—340Oe 的范围内, $H_{[b]}$ 的缓降是枝状畴形成的反映.

到目前为止, 我们已对图 1 中软硬磁泡形成的分界场 $H_{[b]}$ 的上升、快降及缓降这三段作了定性的解释. 至于 $H_{[b]}$ 曲线的第四段, 即 $H_{in} > 340\text{Oe}$ 时 $H_{[b]}$ 的快降过程, 尤其是硬磁泡不再形成的临界面内场 H_{in}^0 的物理意义还有待于解释. 有关的理论分析工作正在进行中.

结 论

在外延石榴石磁泡膜上, 实验研究了面内磁场 H_{in} 对一次脉冲偏磁场作用下硬磁泡形成的影响, 结果如下:

1. 实验表明, 硬泡形成区的上界, 即软硬磁泡形成的分界场 $H_{[b]}$ 随面内场 H_{in} 的增加有上升、快降、缓降及最后快降四个过程. 而硬泡形成区的下界, 即硬泡形成的阈值场 $H_{[i]}$ 在较小的 H_{in} 下, 随 H_{in} 的增加而下降, 以后维持不变. 发现存在一个临界面内场 H_{in}^0 , 当 $H_{in} > H_{in}^0$ 时, 不再有硬磁泡产生, 即畴段畴壁中 VBL 的形成受到完全的抑制. H_{in}^0 与材料参量有关.

2. 面内场中, 在脉冲偏场 H_p 作用下形成硬泡的畴段的主要运动形式和 $H_{in} = 0$ 的情形有很大差别, 而且随 H_{in} 的增加, 畴段的各种运动形式的比例也会变化. 通过 H_{in} 对条状畴作用的分析解释了这种变化的原因. 我们认为, 正是这种变化引起了 H_p 固定时硬泡形成几率 $P-H_{in}$ 曲线的起伏, 也导致了 $H_{[b]}$ 线随 H_{in} 增大的上升和快降过程. 至于

H_{fb} 线的缓降过程则可以用枝状畴的形成来解释。

参 考 文 献

- [1] J. W. F. Dorleijn *et al.*, *Philips Res. Repts.*, **28**(1973), 133.
- [2] F. H. Deleeuw, *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-9** (1973), 614.
- [3] R. M. Josephs and B. F. Stein, *AIP Conf. Proc.*, **18**(1974), 227.
- [4] D. C. Bullock, *AIP Conf. Proc.*, **18**(1974), 232.
- [5] P. Dekker and J. C. Slonczewski, *Appl. Phys. Lett.*, **29**(1976), 753.
- [6] T. J. Beaulieu *et al.*, *AIP Conf. Proc.*, **34**(1976), 138.
- [7] B. R. Brown and T. L. Hsu, *Appl. Phys. Lett.*, **29**(1976), 813.
- [8] 李靖元、于志弘、韩宝善、张寿恭, 物理学报, **34**(1985), 248.
- [9] 韩宝善、聂向富、唐贵德、奚卫, 物理学报, **34**(1985), 1396.
- [10] 韩宝善、李伯斌、聂向富、唐贵德, 物理学报, **34**(1985), 155.
- [11] Y. Hidaka *et al.*, *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-19** (1983), 1841.

INFLUENCE OF IN-PLANE FIELDS ON THE FORMATION OF HARD BUBBLES

HAN BAO-SHAN LIN JI-WU LI BO-ZANG

(Institute of Physics, Academia Sinica)

NIE XIANG-FU TANG GUI-DE

(Department of Physics, Hebei Teacher's University, Shijiazhuang)

ABSTRACT

The influence of in-plane fields on the formation of hard bubbles in epitaxial garnet films by using single-pulse bias field was investigated in some detail. A critical in-plane field H_{in}^0 which is related to the parameters of bubble films, was discovered. When $H_{\text{in}} > H_{\text{in}}^0$, formation of hard bubbles no longer occurs. Three physical processes, i.e. the increase, quick decrease and slow decrease of the demarcation field for soft and hard bubble formation H_{fb} with in-plane fields can be qualitatively interpreted in terms of the effect of in-plane field on stripe domains, as well as the formation of multifingered domains.