

脉冲偏场作用下石榴石磁泡薄膜中 布洛赫线的形成^{*}

胡云志 孙会元[†]

(河北师范大学物理科学与信息工程学院, 石家庄 050016)

(2008 年 3 月 14 日收到, 2008 年 4 月 29 日收到修改稿)

实验研究了石榴石磁泡薄膜中不同脉冲宽度下产生的硬磁畴的动态特性. 结果表明: 由零偏场下产生的枝状畴收缩而成的哑铃畴均逆时针转动, 与产生枝状畴时所用的脉冲偏场的脉冲宽度无关. 而固定直流偏场下由软畴硬化而成的哑铃畴的转动状态, 则与所用的硬化脉冲偏场的脉冲宽度有关. 低脉冲宽度下硬化成的哑铃畴均逆时针转动, 随硬化脉冲宽度的升高, 出现混合转动向顺时针转动的过渡. 由此揭示了直流偏场和脉冲偏场在石榴石磁泡薄膜中形成正、负垂直布洛赫线的作用.

关键词: 磁畴, 磁泡, 垂直布洛赫线

PACC: 7570K

1. 引 言

1972 年, Tabor 等^[1]发现了硬磁泡并建立了相应的畴壁结构模型, 认为在它们的畴壁中存在大量同号的垂直布洛赫线 (vertical Bloch line, 简记为 VBL). 1973 年, Slonczewski 等^[2]发现了哑铃畴, 认为哑铃畴畴壁中含有比普通硬磁泡 (ordinary hard bubble, 简记为 OHB) 更多的 VBL. 在此基础上人们又对哑铃畴进行了详细的研究, 发现哑铃畴在直流偏场的作用下有两种缩灭形式^[3,4]. 一种是先变成泡再缩灭, 这种哑铃畴被称为第 I 类哑铃畴 (first kind of dumbbell domain, 简记为 I D), 另一种是以哑铃状缩灭, 这种哑铃畴被称为第 II 类哑铃畴 (second kind of dumbbell domain, 简记为 II D). 从而, 硬磁畴的家族被分为 OHB, I D 和 II D 三类. 1999 年, 人们从实验上证明了三类硬磁畴 (OHB, I D 和 II D) 具有相同的畴壁结构^[5], 它们畴壁中的 VBL 数目从 OHB, I D 到 II D 依次增加.

1983 年, Konishi^[6]在磁泡存储技术的基础上提出了超高密度固态布洛赫线存储器 (Bloch line memory, 简记为 BLM) 方案. BLM 是以条状磁畴畴壁

中的负 VBL 对作为信息的载体, 以负 VBL 对的有无来体现信息的“1”和“0”. 目前, 已能够通过磁力显微镜观察到硬磁材料中的 VBL, 而对于软磁材料, 还不能直接观察到其中的 VBL. 从宏观角度看磁畴的尺度很小, 从微观角度看磁畴的尺度很大, 对这种中间尺度的理论计算非常困难. 因此, 研究石榴石磁泡薄膜条状磁畴畴壁中 VBL 链的性质, 无论是对 BLM 的研制, 还是对磁畴壁物理的发展, 都是非常重要的.

关于脉冲偏场作用下畴壁中含有大量同号 VBL 的硬磁畴的研究, 已有了一系列的工作^[7-12]. VBL 的存在直接影响着硬磁畴的动态特性, 而磁畴的动态特性是 VBL 性质的外在反映, 因此, 对磁畴的动态特性的研究就显得尤其重要.

对硬磁畴的动态特性已经有了一些研究^[13,14], 发现哑铃畴在脉冲偏场的作用 (为了便于区分, 我们称此处的脉冲偏场为“旋转脉冲偏场”) 下会像风车一样转动, 同时还得到了转动方向与旋转脉冲偏场的关系. 转动状态与产生硬磁畴时的脉冲偏场 (我们称此处的脉冲偏场为“硬化脉冲偏场”) 的关系还没有得到具体的结果. 为此, 本文研究了哑铃畴的转动状态与硬化脉冲偏场的关系, 得到了一些有价值的结果, 并对实验现象给出了合理的解释.

* 国家自然科学基金 (批准号: 10274018) 和河北师范大学博士基金 (批准号: 12006B10) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: huiyuansun@126.com

2. 实验方法

实验所用的样品为未经离子注入的(111)面液相外延石榴石磁泡薄膜,1—3号样品的标称成分为 $(\text{YSmCa})_3(\text{FeGe})_3\text{O}_{12}$,4号样品的标称成分为

$(\text{YLuBi})_3(\text{FeGe})_3\text{O}_{12}$.室温下样品的静态参数和特征偏场见表1,其中 h 为薄膜厚度, l 为特征长度, K_u 是单轴各向异性常数, $4\pi M_s$ 为饱和磁化强度, H'_{sb} 为条泡转变标准场, H'_0 为硬泡标准场, $(H_0)_{\parallel D, \min}$ 为第二类哑铃畴的最小崩灭场.由于在上述样品中观察到了相同的现象,故本文仅以1号样品为例进行讨论.

表1 室温下样品的基本静态参数

样品编号	$h/\mu\text{m}$	$l/\mu\text{m}$	$K_u/10^5 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}$	$4\pi M_s/10^{-4} \text{ T}$	$H'_{sb}/\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$	$H'_0/\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$	$(H_0)_{\parallel D, \min}/\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$
1	5.6	0.99	3.47	120.0	3302.5	4026.6	5252.1
2	6.5	0.94	5.53	135.9	4297.2	5148.7	6127.5
3	7.6	0.84	4.19	141.0	5172.5	6127.5	7162.0
4	4.7	0.69	15.9	202.0	6231.0	7560.0	7798.6

2.1. 固定直流偏场法产生的哑铃畴转动状态

从固定直流偏场法^[9]出发,考察硬化脉冲宽度对形成VBL的影响.实验步骤如下:

(1)在固定直流偏场 H_{10} 下,施加脉冲偏场,得到一组软畴段,典型照片如图1所示.再施加系列硬化脉冲偏场将软畴段硬化为硬磁畴,如图2所示.

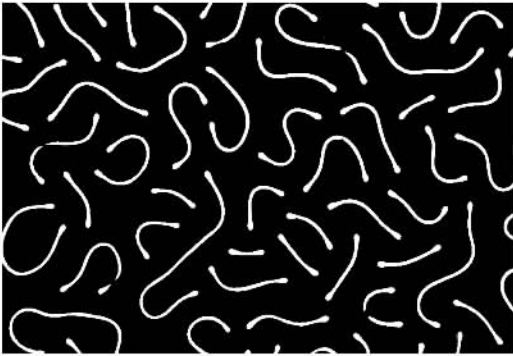


图1 固定直流偏场法产生的一组软畴段 $H_{10} = 4177.8 \text{ A/m}$

(2)升高 H_b 至条泡转变标准场 H'_{sb} ,施加一定幅度的旋转脉冲偏场,硬磁畴就会像风车一样转动起来,如图3所示.观察并统计顺时针旋转(实际转动方向)的硬磁畴数目,并记录结果.

(3)固定硬化脉冲幅度 H_p^h 和硬化脉冲次数 n_p^h ,改变硬化脉冲宽度 τ_p ,重复以上实验,最后得到了固定直流偏场 H_{10} 下硬磁畴顺时针旋转概率 p 随硬化脉冲宽度 τ_p 的变化关系.

2.2. 低直流偏场法产生的哑铃畴转动状态

从低直流偏场法^[11,12]出发,考察直流偏场对枝



图2 施加硬化脉冲后得到的硬磁畴 $\tau_p^h = 1 \mu\text{s}$, $H_p^h = 2387.3 \text{ A/m}$, $n_p^h = 200$

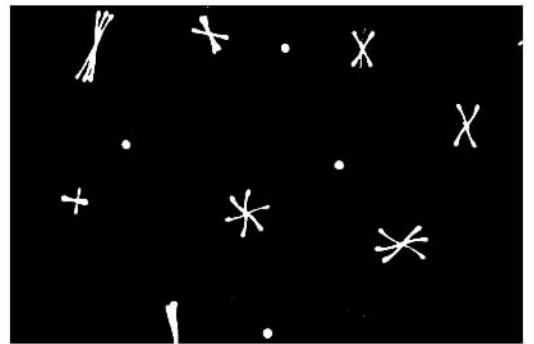


图3 施加旋转脉冲后三次曝光得到的硬磁畴照片 $H'_{sb} = 5172.5 \text{ A/m}$, $\tau_p^h = 0.5 \mu\text{s}$, $H_p^h = 7957.8 \text{ A/m}$

状畴中VBL的影响.实验步骤如下:

(1)在直流偏场 H_b 为零时,固定硬化脉冲幅度 H_p^h 和硬化脉冲次数 n_p^h ,施加脉冲宽度为 τ_p^h 的硬化脉冲,得到能缩为硬磁畴的枝状畴,典型照片如图4

所示.

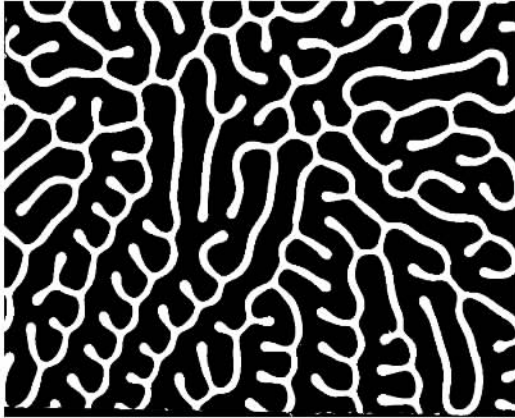


图 4 缩为硬磁畴的枝状畴

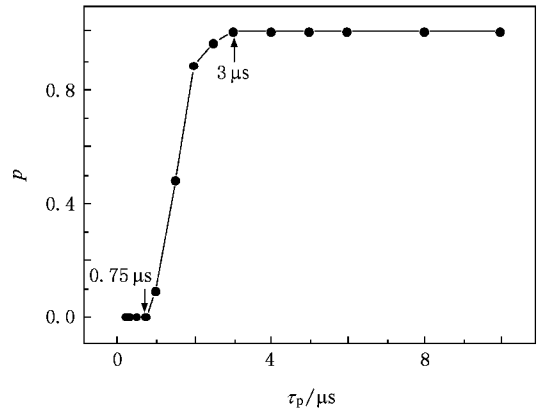


图 5 固定直流偏场法产生的硬磁畴顺时针旋转概率 p 与硬化脉冲宽度 τ_p 的关系

(2) 升高 H_b 至条泡转变标准场 H'_{sb} , 施加一定幅度的旋转脉冲偏场, 硬磁畴就会像风车一样转动起来(图 2 和图 3), 观察并统计顺时针旋转(实际转动方向)的硬磁畴数目, 并记录结果.

(3) 改变硬化脉冲宽度 τ_p , 重复以上实验, 最后得到零偏场下硬磁畴的顺时针旋转概率 p 随硬化脉冲宽度 τ_p 的变化关系.

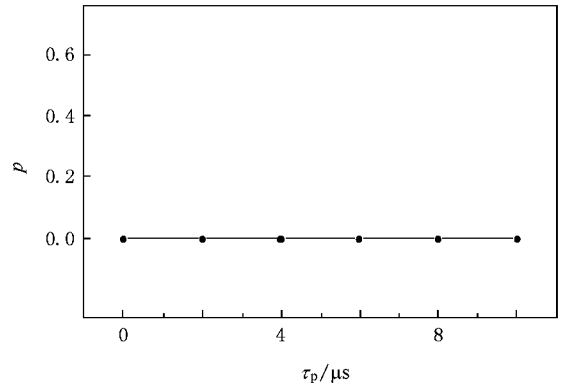


图 6 低直流偏场法产生的硬磁畴顺时针旋转概率 p 与硬化脉冲宽度 τ_p 的关系 $H_b = 0 \text{ A/m}$

3. 实验结果及讨论

固定直流偏场法产生的哑铃畴的转动状态与硬化脉冲偏场的脉冲宽度的关系如图 5 所示. 从图 5 可以看到, 对于系列脉冲法下形成的硬磁畴而言, 当硬化脉冲为窄脉冲时, 亦即当 $\tau_p < 0.75 \mu\text{s}$ 时, 硬磁畴为逆时针转动, 随着脉冲宽度的增加, 出现部分顺时针旋转的硬磁畴, 表现为混合转动区域; 当脉冲宽度 $\tau_p > 3 \mu\text{s}$ 时, 硬磁畴均顺时针转动.

图 6 给出了低直流偏场法^[11, 12]产生的哑铃畴的转动状态与硬化脉冲偏场的脉冲宽度的关系. 从图 6 可以看出, 对于零偏场下由枝状畴收缩而成的哑铃畴, 其转动状态与硬化脉冲宽度无关, 均为逆时针转动.

由以上所述可知, 不同实验方法产生的硬磁畴的动态特性与硬化脉冲宽度的关系不同. 那么为什么会出现这样的结果呢? 下面我们从直流偏场和脉冲偏场对磁畴的作用出发, 给出解释.

对于所有的硬磁畴, 随着直流偏场 H_b 的逐渐

升高, 长度逐渐缩短, 直至缩灭的过程^[7], 亦即直流偏场 H_b 对磁畴起径向压缩的作用. 而脉冲偏场对于磁畴的作用可分为上升沿和下降沿, 如图 7 所示. 上升沿导致偏场升高, 与 H_b 的作用相同, 也起进一步径向压缩的作用; 脉冲偏场的下降则开始降低偏场, 将引起磁畴的膨胀作用.

当 H_b 为零时, 脉冲偏场的上升沿达到 H_p , 下降沿从 H_p 下降到零. 当 $H_b = H_{bl}$ 时, 脉冲偏场的上升沿达到 $H_p + H_{bl}$, 下降沿从 $H_p + H_{bl}$ 下降到 H_{bl} . 随着直流偏场的升高, 上升沿达到越来越高的位置, 即对磁畴的压缩程度越来越大; 而下降沿落回的位置也越来越高, 即越来越不能使磁畴充分膨胀. 所以, 我们合理推断出, 随着直流偏场的升高, 上升沿起的作用越来越强, 而下降沿起的作用越来越弱.

从图 5 可以看到, 对于系列脉冲法下形成的硬

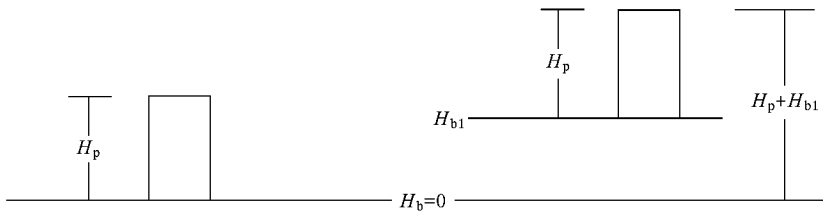


图7 直流偏场与硬化脉冲的作用示意图

磁畴而言,当硬化脉冲为窄脉冲时,亦即当 $\tau_p < 0.75 \mu\text{s}$ 时,硬磁畴为逆时针转动,与直流偏场 H_b 为零时的枝状畴形成的硬磁畴转动方向相同.对于脉冲偏场是窄脉冲的情况,我们认为脉冲幅度还没有达到最大就开始下降,上升沿不能充分发挥作用,因此此时是下降沿起主要作用.随着脉冲宽度的增加,出现顺时针旋转的硬磁畴,我们认为随着脉冲宽度的增加,脉冲幅度的实际值也逐渐增大,脉冲偏场的上升沿的作用开始体现出来.当脉冲偏场的上升沿起主要作用时,硬磁畴全部顺时针转动.

如图6所示,对于直流偏场 H_b 为零时形成的硬磁畴,均为逆时针转动,亦即无论产生枝状畴的脉冲宽度是多大,此时由枝状畴收缩而成的硬磁畴均为逆时针转动.由于此时的枝状畴是由磁畴膨胀过程中形成的,亦即主要是脉冲场在下降的过程中形成的,因而我们可以合理推断脉冲偏场的下降沿起主要作用时形成的硬磁畴全部逆时针转动,对应负

VBL链的形成.

4. 结 论

实验研究了石榴石磁泡薄膜中不同脉冲宽度下产生的硬磁畴的动态特性.结果表明:由零偏场下产生的枝状畴收缩而成的哑铃畴均逆时针转动,与产生枝状畴时所用的脉冲偏场的脉冲宽度无关.而固定直流偏场下由软畴段硬化而成的哑铃畴的转动状态,则与所用的硬化脉冲偏场的脉冲宽度有关.低脉冲宽度下硬化而成的哑铃畴,均逆时针转动.随硬化脉冲宽度的升高,出现混合转动向顺时针转动的过渡.由此揭示了直流偏场和脉冲偏场在石榴石磁泡薄膜中形成正负布洛赫线的作用.分析认为,脉冲偏场的下降沿起主要作用时,形成的硬磁畴全部逆时针转动,对应负VBL链的形成;脉冲偏场的上升沿起主要作用时,形成的硬磁畴全部顺时针转动,对应正VBL链的形成.

- [1] Tabor W J, Bobeck A H, Vella-Coleiro G P 1972 *Bell Syst. Tech. J.* **51** 1427
- [2] Slonczewski J C, Malozemoff A P, Voegeli O 1973 *AIP Conf. Proc. Huntington* (Vol. 10) (Huntington: American Institute of Physics) p458
- [3] Han B S, Nie X F, Liu D P 1989 *Chin. Phys. Lett.* **6** 329
- [4] Nie X F, Tang G D, Han B S 1991 *J. Magn. Magn. Mater.* **95** 231
- [5] Sun H Y, Li Z Q, Hu H N, Nie X F 1999 *J. Magn. Magn. Mater.* **192** 419
- [6] Konishi S 1983 *IEEE Trans. Magn.* **19** 1838
- [7] Nie X F, Tang G D, Niu X D, Han B S 1990 *Acta Phys. Sin.* **39** 296 (in Chinese) [聂向富、唐贵德、牛秀德、韩宝善 1990 物理学报 **39** 296]

- [8] Han B S, Nie X F, Tang G D, Xi W 1985 *Acta Phys. Sin.* **34** 1396 (in Chinese) [韩宝善、聂向富、唐贵德、奚卫 1985 物理学报 **34** 1396]
- [9] Nie X F, Tang G D, Ling J W, Han B S 1986 *Acta Phys. Sin.* **35** 338 (in Chinese) [聂向富、唐贵德、凌吉武、韩宝善 1986 物理学报 **35** 338]
- [10] Sun H Y, Gu J J, Hu H N, Jia L Z, Feng S Z, Nie X F, Sun Y P 2005 *J. Magn. Magn. Mater.* **292** 281
- [11] Zhou Y, Zheng D J, Li D, Han B S 2000 *Chin. Phys. Lett.* **17** 52
- [12] Guo G X, Nie X F, Sun H Y, Hu H N, He W C 2003 *J. Magn. Magn. Mater.* **265** 269
- [13] Sun H Y, Nie X F, Tang G D 1993 *Chin. Phys. Lett.* **10** 623
- [14] West F G, Bullock D C 1973 *AIP Conf. Proc.* (Vol. 10) (Huntington: American Institute of Physics) p483



The formation of vertical Bloch line in the garnet bubble films subjected to pulsed bias field^{*}

Hu Yun-Zhi Sun Hui-Yuan[†]

(*College of Physics Science and Information Engineering ,Hebei Normal University ,Shijiazhuang 050016 ,China*)

(Received 14 March 2008 ; revised manuscript received 29 April 2008)

Abstract

We studied experimentally the dynamic characteristics of hard domains produced in the garnet bubble films at different pulse widths. The results show that the dumbbell domains contracted from multi-branched domains at zero static bias field rotate clockwise , independent of the pulse width of the pulsed bias field in which the multi-branched domains were produced. In the direct current fixed bias fields , soft domain segments harden and become dumbbell domains. How the dumbbell domains rotate is dependent on the pulse widths of the hardening pulsed bias field applied in the experiment. The results show that all the dumbbell domains rotate anticlockwise when the pulse width is narrow , and they rotate clockwise and anticlockwise simultaneously and then they all rotate clockwise as the width of hardening pulse becomes wider and wider. It reveals that the direct current bias field and pulsed bias field have great influence on the types of vertical Bloch line in the garnet bubble films .

Keywords : magnetic domain , magnetic bubble , vertical Bloch line

PACC : 7570K

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10274018) and the Foundation for Doctor of Hebei Normal University , China (Grant No. L2006B10).

[†] Corresponding author. E-mail huiyuansun@126.com