

⑤ 359-363

微型 NiFe 磁性薄膜元件中 Neel 畴壁极性的转变过程 *

余晋岳 朱军 周狄 禹金强 俞爱斌 蔡炳初
(上海交通大学信息存储研究中心国家教育部薄膜与微细技术重点实验室, 上海 200030)
魏福林
(兰州大学磁性材料研究所国家教育部应用磁学重点实验室, 兰州 730000)

摘 要 观察和分析了 $300\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m} \times 40\ \text{nm}$ 的 NiFe 磁性薄膜元件在难轴方向反磁化时磁畴结构转变, 特别是 Neel 畴壁从正极性壁 (N_+) 转变为负极性壁 (N_-) 的全过程. 磁畴结构的转变包含畴壁合并, 封闭畴转变、钩形畴转变及 Neel 畴壁极性转变等不可逆因素. 对畴壁极性转变的两种方式 (即 $N_+ \rightarrow N_-$ 直接转变及经由十字壁 (N_{ct}) 的 $N_+ \rightarrow N_{ct} \rightarrow N_-$ 间接转变) 进行了分析讨论. N_- 往往在元件末端新生封闭畴和正极性主畴壁的连结点成核, 然后向中间扩展. $N_+ \rightarrow N_{ct}$ 的转变是通过 N_+ 壁的数次分裂来实现的.

关键词 磁性薄膜元件, 反磁化, 磁畴, Neel 畴壁

中图法分类号 O482.51, TM276 文献标识码 A 文章编号 0412-1961(2000)04-0359-05

0484

THE TRANSITION PROCESS OF POLARITY OF NEEL DOMAIN WALLS IN SMALL MAGNETIC THIN FILM ELEMENT

TM27

YU Jinyue, ZHU Jun, ZHOU Di, YU Jinqiang, YU Aibin, CAI Bingchu
Information Storage Research Center, Thin Film and Microfabrication Key Laboratory of Education Ministry, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030
WEI Fulin
Research Institute of Magnetic Materials, Applied Magnetism Key Laboratory of Education Ministry, Lanzhou University, Lanzhou 730000

Correspondent: YU Jinyue, professor, Tel: (021)62932517, Fax: (021)62823631
Manuscript received 1999-07-21, in revised form 2000-01-24

ABSTRACT The transition process of domain structure, especially the total transition process of Neel wall from positive polarity wall (N_+) to negative polarity wall (N_-), during magnetization reversal along hard-axis direction in small NiFe magnetic thin film element has been observed and analysed. The length, width and thickness of the film are $300\ \mu\text{m}$, $40\ \mu\text{m}$ and $40\ \text{nm}$ respectively. The transition of domain structure involves some irreversible processes such as domain wall mergence, closure domain transition, hooklike domain transition and polarity transition of Neel wall. The two ways of transition of domain wall polarity, namely direct transition ($N_+ \rightarrow N_-$) and indirect transition ($N_+ \rightarrow N_{ct} \rightarrow N_-$) through cross-tie domain wall (N_{ct}), have been discussed in detail. Usually, the N_+ will nucleate at the linking point of newly emerged closure domain and positive polarity main domain wall, then extend to the center. The transition from N_+ to N_{ct} is realized through several splittings of N_+ . All the mentioned phenomena above have not been paid close attention and fully studied in the previous literature.

KEY WORDS magnetic thin film element, magnetization reversal, magnetic domain, Neel domain wall

自从 1955 年有人提出把 NiFe 磁性薄膜用作计算机

存储器件以来, 磁性薄膜已被应用于录音、录像、计算机的信息存储 (包括感应式磁头和磁阻式 (MR) 磁头) 及各种磁性传感器等领域中. 为了高密度信息存储的需要, 它的线度越来越小 ($100-10\ \mu\text{m}$ 以下), 但是它的信号响应为一系列不可逆跳跃 (Barkhausen 跳跃) 所困扰. 文献

* 收到初稿日期: 1999-07-21, 收到修改稿日期: 2000-01-24

作者简介: 余晋岳, 男, 1940 年生, 教授

[1—6] 表明, 薄膜元件输出信号中的噪声主要来源于它的两种畴壁活动过程: 其一是反磁化开始阶段畴壁数的突然减少; 其二是 Neel 畴壁极性状态的不可逆转变, 即 N_- 成核和扩展, 后者构成 Barkhausen 噪声的主要物理原因, 然而对畴壁极性转变的具体过程并不清楚。

本文在全面观察薄膜元件在难轴方向反磁化时磁畴结构转变过程的同时, 着重分析, 研究了它的 Neel 畴壁极性转变的全过程。

1 实验方法

用真空溅射技术 (溅射机型号 LH-600) 将 40 nm 厚度的 NiFe (其成分 (质量分数, %) 为: Ni 81, Fe 19) 薄膜沉积在玻璃衬底上, 然后成形为 magneto-resistive (即 MR) 传感元件, 它的纵向 (传感电流方向) 沿易轴, 纵向长度为 300 μm ; 横向 (即难轴方向) 的高度为 40 μm 。两个引线从元件中心有效部位引出, 由于工艺需要, 它的成分、厚度和传感器相同。准静态的均匀磁场加在难向, 在光学显微镜下用磁性液体 (magnetic fluids, 也称磁性流体) 粉纹技术 [7] 观察磁畴, 采用水基磁性液体作为显示剂, 但是必须用去离子水稀释 4—10 倍, 磁畴图像除照片外均是从光镜显示屏上直接描制的, 其中磁畴中的箭头注明磁畴的磁化方向, 畴壁上的箭头代表了 Neel 畴壁的极性方向。

2 结果与分析

2.1 能量分析

元件中总磁性自由能应包含外磁场能、感生各向异性能、畴壁能、退磁能等, 在单位体积中畴壁能的表达式为

$$E_\gamma = \gamma SD \quad (1)$$

式中, γ 是畴壁能面密度; S 是以单位体积计的总畴壁长度; D 是膜厚。

退磁能 E_m 是由元件边缘和末端以及元件中磁化不连续处的磁荷产生的退磁场引起的, 如元件呈单畴态, 它在纵向和横向的退磁因子为 N_L 和 N_T , 则纵向和横向的退磁能分别为

$$E_{m,L} = (1/2)\mu_0 N_L M_s^2 \sin^2 \varphi_0 \quad (2)$$

$$E_{m,T} = (1/2)\mu_0 N_T M_s^2 \cos^2 \varphi_0 \quad (3)$$

式中, μ_0 是真空磁导率, M_s 是自发磁化强度, φ_0 是磁化方向与难轴的交角, 与易轴的交角是 θ 。

元件的总退磁能

$$E_m = E_{m,L} + E_{m,T} \quad (4)$$

但由于元件不是椭球体, 它的退磁因子和退磁能在各个位置是不均匀的, 例如, 在两末端, 它的横向退磁场和退磁

能会比中间部位小得多, 如果元件为多畴结构, 则 E_m 迅速下降, 然而磁畴不可能达到理想的磁通闭流结构, 元件边缘的磁荷会产生退磁场, 磁化在跨越畴壁时的不连续处的磁荷也产生杂散磁场, 它们在元件内部仍形成不均匀分布的退磁能, 若磁畴在磁化方向上取伸长的形状, 这一退磁能可以减低。

由于磁致伸缩 λ_s 极小, 磁弹性能可忽略不计。

在外场 H 变化时, 磁畴结构和畴壁状态的变化过程是以上各项能量产生新的平衡的结果。

2.2 磁畴结构的转变过程

观察表明, 样品在难向的反磁化是曲折状非一致转动过程 [1,2,6]。在形成曲折状畴以后, 畴壁两边磁化矢量各以顺、逆时针方向反向转动, 其交角 (畴壁角) φ_w 从 $0^\circ \rightarrow 180^\circ \rightarrow 360^\circ$ 转变, 图 1 即为一实例, 首先, 当磁场 H 从正向饱和值下降时, 纹波状畴形成 (图 1a), 这是传感器两端磁荷引起的纵向退磁效应的结果。

由于引线不规则形状 (它与传感器联结处为三角形)

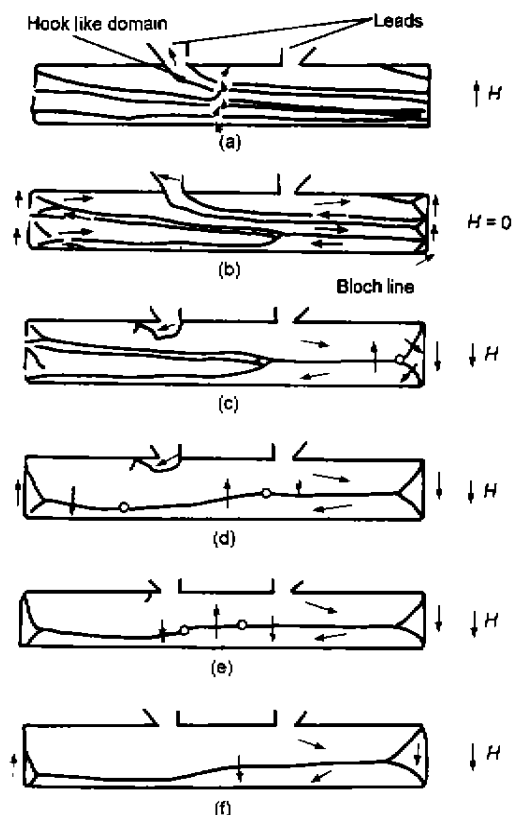


图 1 磁畴结构转变以及 Neel 畴壁极性的直接转变 ($N_+ \rightarrow N_-$) 过程

Fig.1 The transition process of magnetic domain structure and the direct transition ($N_+ \rightarrow N_-$) process of polarity of Neel domain wall

(a) $\uparrow H=800$ A/m (b) $H=0$ (c) $\downarrow H=-300$ A/m
(d) $\downarrow H=-480$ A/m (e) $\downarrow H=-560$ A/m
(f) $\downarrow H=-800$ A/m

的影响,引线中的畴为了降低静磁能,往往伸长并衍生到传感器有效部位并和纹波状畴连接起来,形成特殊的长钩形畴.在方向向上的正向磁场作用下形成的畴壁是极性向上的正极性 Neel 壁 (N_+)(图 2a).

如壁两边磁化交角 $\varphi_w=180^\circ(\varphi_0=90^\circ, \theta=0)$ 时的畴壁能面密度为 $\gamma(180^\circ)$, 则当 θ 为任意值时, 有^[8]

$$\gamma(\theta) = \gamma(180^\circ)(1 - \sin \theta)^2 \quad (5)$$

随 H 从正值减小至 0 并在负向上升, 磁化转动, θ

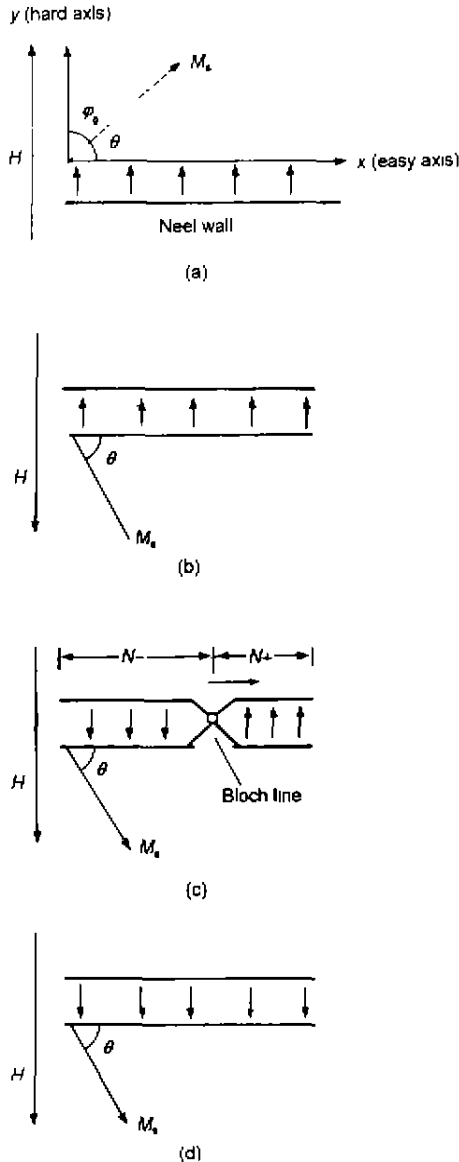


图 2 Neel 壁极性转变过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of transition process of Neel wall polarity

- (a) N_+ wall in positive magnetic field
- (b) N_+ wall in negative field
- (c) transition from N_+ to N_- wall and movement of Bloch line
- (d) N_- wall in negative field

从正值(图 2a)到 0 又成负值(图 2b)增大, $\gamma(\theta)$ 值不断增大, 表现为粉纹浓度不断加强. 高的畴壁密度使 E_γ 很大, 畴壁合并就不可避免. 这种合并往往采用三合一方式(图 1b, c 及图 3). 随着合并点 P 从一端运动到另一端, 三条畴壁合并为一条, 四个畴合并为两个. 合并点附近有一小的菱形畴, 其磁化在难轴方向, 是为了使磁通闭合以降低静磁能而出现的(图 3). 图 4 是三合一式畴壁合并的另一实例照片.

这种合并往往从末端及与引线连结处等畴壁密度最高的部位开始. 值得注意的是, 随着磁化转动到反向, 缩短了的钩形畴的伸出方向从右边不可逆地突变到左边(图 1c). 畴壁合并完成后, 元件中只剩下一条主畴壁, 并和两端的封闭畴形成磁通闭流结构(图 1d). 右端封闭畴的磁化和外场 H 方向一致, 随反向场 H 的增大而扩大; 左端封闭畴的磁化和外场 H 反向, 逐步在缩小(图 1e, f). 到 $H=-1100$ A/m 时, 各畴的磁化都转动到和外场近于一致的方向, 畴壁消散.

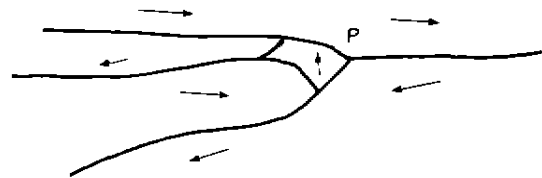


图 3 三合一式 Neel 畴壁合并示意图

Fig.3 Schematic diagram of Neel walls mergence from three walls into one (the merging point P moves toward left)

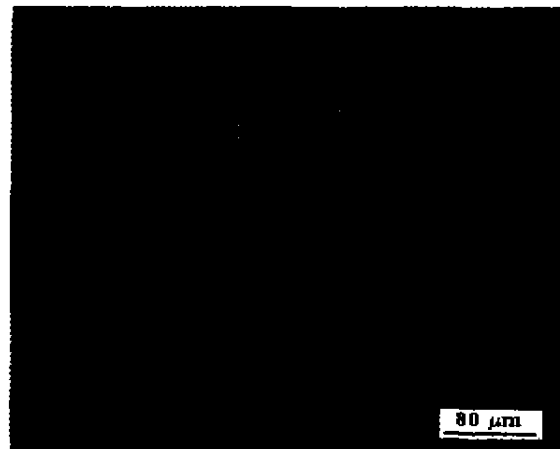


图 4 三合一式畴壁合并正在进行

Fig.4 The mergence from three domain walls into one is taking place in MR element

2.3 Neel 畴壁极性的直接转变 ($N_+ \rightarrow N_-$) 过程

虽然在畴壁合并后, 畴壁密度降低, 但是磁场和磁化从正向改变到反向时, 正极性 N_+ 壁在能量上仍很不利(图

2b). 如畴壁极性反转, N_+ 转化为 N_- 壁(图 2d), 则从式 (5) 可得出, 其能量可降低 $\Delta\gamma(\theta) = 4\gamma(180^\circ)|\sin \theta|$. 这种转变有 $N_+ \rightarrow N_-$ 直接转变和经十字壁 (N_{ct}) 的 $N_+ \rightarrow N_{ct} \rightarrow N_-$ 间接转变两种形式, 图 1 属于前一种形式. 可以看到 Bloch 线 (一圆形小亮点) 先在右端后在左端形成 (图 1c), 通过 Bloch 线向中心部位走走停停的不可逆运动, N_- 壁段从两端向中心扩展 (图 1d, e), 最后 N_+ 壁段完全被吞没 (图 1f). 由于在产生 $N_+ \rightarrow N_-$ 变化的壁段, 畴壁极性强度变弱, 粉纹浓度变淡, 淡化了的壁段从两端向中间不连续地扩展, 浓粗的壁段被缩短直至消失.

图 5 特别描述了传感器右端封闭畴的转化过程. 原来在正向场作用下形成的封闭畴内磁化方向向上, 和纹波畴形成闭流结构 (图 5a, 图 1b). 在反向场的作用下, 封闭畴的转变是通过新生封闭畴 (磁化方向向下) 的扩大及原始封闭畴的缩小和消失实现的 (图 5b,c).

新生封闭畴长大后, 和传感元件中唯一的主畴壁连接起来, 形成新的闭流系统 (图 5d, 1c). 从图 5d 可知, 由于新生封闭畴的磁化方向在难轴反向, 与它同时产生的畴壁极性也是近于反向的, 而主畴壁还保持着正极性, 所以新生封闭畴和主畴壁的连接点必然是 N_- 壁段的成核点. 在实验观察中可以看到一个淡淡的圆形亮点, 说明 Bloch 线在此形成, 此即 Neel 壁极性转变首先从这一端开始的原因. 在图 1 中, 左端封闭畴的磁化方向始终向上, 它的畴壁极性亦近于向上. 在畴壁合并过程中两个封闭畴合并成一个 (图 1c, d), 并在反向场作用下逐步缩小, 它的畴壁极性和主畴壁原来的极性一致, 因此 N_- 壁的成核因

难要晚于右端. 不管怎样, N_- 的成核往往是从两端发生的, 这是因为两端的难向 (横向) 退磁场比中间小. 反向磁场的实际值比中间要大.

2.4 Neel 畴壁极性的间接转变 ($N_+ \rightarrow N_{ct} \rightarrow N_-$) 过程

如果 N_- 的成核和扩展在外场 $H=0$ 附近发生, 畴壁极性转变往往采用 $N_+ \rightarrow N_{ct} \rightarrow N_-$ 的间接形式. 这是因为零场附近, 畴壁极性正负交替的十字壁结构的静磁能低. 在反向场增大时, 又以 N_- 壁能量最低, N_{ct} 才转变为 N_- 壁.

图 6 为一实例. 元件中只有一条主畴壁, 它开始是正极性的一个壁段. 在 $H=0$ 时, 新生封闭畴在元件右上角形成, 在与主畴壁连接处, N_- 成核点同时出现 (6a). 由于反向场开始作用, Bloch 线向中心运动一段不大的距离 (图 6b, 2 壁段) 后, 在元件右边突然出现 4 个十字形辅助壁, 说明右边已裂变为 N_+ 和 N_- 相间 (表现为畴壁粉纹线浓淡相间) 的十字壁 (图 6c, 10 壁段). 然后才是元件左边的畴壁部分分裂, 同时出现 5 个十字辅助壁, 但在同一刻右边有一个 N_+ 壁段被两边的 N_- 壁段吞没, 结果整个主畴壁成为 N_+ 和 N_- 相间 (浓淡相间) 的十字壁 (图 6d, 18 壁段). 到 $H=-370$ A/m, 各 N_+ 段被 N_- 所吞没, 主畴壁又成为极性向下的单极性壁段 (图 6e, 1 壁段). 直至 $H=-1040$ A/m, 反磁化非一致转动接近完成, 畴壁消散. 对元件的多次观察都有同样结果, 由于新生封闭畴和 N_- 的成核发生在右端, 故主畴壁的 $N_+ \rightarrow N_{ct}$ 转变是通过从右至左畴壁极性的两次分裂来完成的.

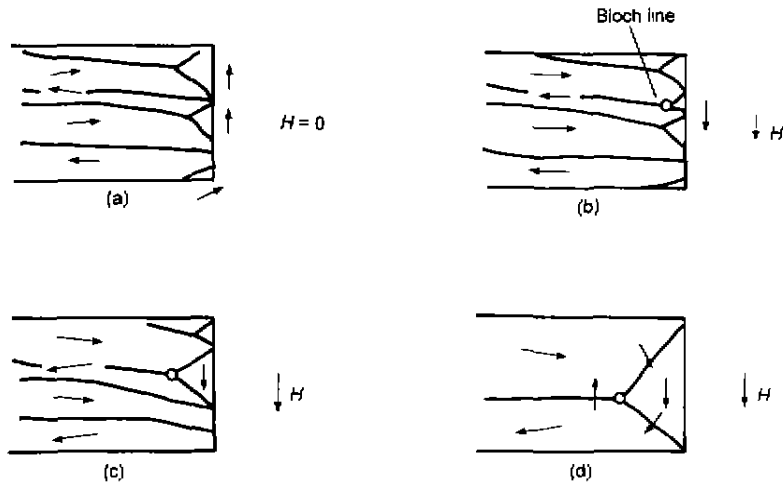


图 5 封闭畴转变过程和 Bloch 线的形成
 Fig.5 Closure domain transition process and the formation of Bloch line
 (a) $H=0$ (b) $\downarrow H=-240$ A/m
 (c) $\downarrow H=-290$ A/m (d) $\downarrow H=-320$ A/m

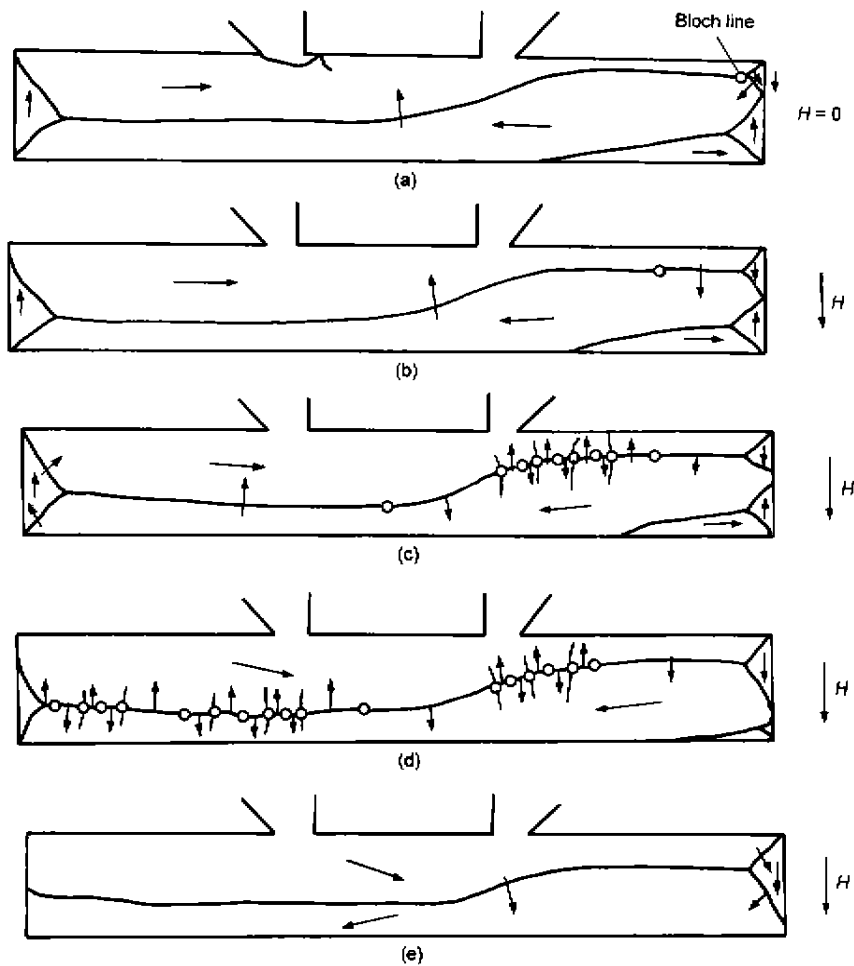


图 6 Neel 畴壁极性的间接转变 ($N_+ \rightarrow N_{ct} \rightarrow N_-$) 过程

Fig.6 The indirect transition ($N_+ \rightarrow N_{ct} \rightarrow N_-$) process of polarity of Neel wall

(a) $H=0$, main wall is one segment (b) $\downarrow H=-110$ A/m, two segments (c) $\downarrow H=-130$ A/m, ten segments
(d) $\downarrow H=-260$ A/m, eighteen segments (e) $\downarrow H=-370$ A/m, one segment

3 结论

在磁性薄膜元件的反磁化过程中, 磁畴结构的转变包含有畴壁合并、封闭畴转变、钩形衍生畴转变以及畴壁极性转变等不可逆因素, 它们构成 Barkhausen 噪声的物理根源. Neel 壁极性转变是一个很重要的因素.

Neel 壁极性转变的先决条件是 N_- 壁的成核, 成核最容易发生在末端新生封闭畴和主畴壁的连接点. 在没有新生封闭畴的另一端, 由于难向退磁场小, 反向场大, 也会产生 N_- 核, 但比前者明显滞后.

畴壁极性转变有两种类型: $N_+ \rightarrow N_-$ 的直接转变, 往往发生在有一定强度的反向场作用的条件下, 图 1 中产生转变的磁场范围 $H = -300 \sim -800$ A/m; $N_+ \rightarrow N_{ct} \rightarrow N_-$ 的间接转变则发生在零场附近, 图 6 中产生此转变的磁场范围 $H = 0 \sim -370$ A/m.

参考文献

- [1] Decker S K, Tsang C. *IEEE Trans Magn*, 1980; MAG 16: 643
- [2] Tsang C, Decker S K. *J Appl Phys*, 1981; 52: 2465
- [3] Tsang C, Decker S K. *J Appl Phys*, 1982; 53: 2602
- [4] Tsang C. *J Appl Phys*, 1984; 55: 2226
- [5] Ye W C, Yu J Y, Cai B C. *J Appl Phys*, 1996; 79: 6048
- [6] Yu J Y, Zhou Y, Song B Q, Ye W C, Zhang H. *J Appl Sci*, 1996; 14: 318
(余晋岳, 周勇, 宋柏泉, 叶伟春, 张宏. 应用科学学报, 1996; 14: 318)
- [7] Yu J Y, Zhang M S, Zhou D, Zhang J L, Zhang H, Wei F L. *Met Phys Examnat Test*, 1998; (1): 34
(余晋岳, 张明生, 周狄, 章吉良, 张宏, 魏福林. 物理测试, 1998;(1): 34)
- [8] Prutton M. *Thin Ferromagnetic Films*. London: Butterworths, 1964: 45