MFM 像の簡単な作図法による解釈

A Simple Graphical Interpretation of MFM Images

中村基訓¹・氏家裕幸²・長谷川典夫²・数野忠雄²・末岡和久^{1, 3}・武笠幸一^{1, 4}

¹北海道大学工学研究科, 札幌市北区北 13 条西 8 丁目 (〒060-8628)

²ミツミ電機, 神奈川県厚木市酒井 1601 (〒243)

³科技団さきがけ 21, ⁴科技団戦略基礎

M. Nakamura¹, H. Ujiie², N. Hasegawa², T. Kazuno², K. Sueoka^{1, 3}, and K. Mukasa^{1, 4}

Faculty of Engineering, Hokkaido Univ¹, Kita-13, Nishi-8, Kita-ku, Sapporo 060-8628

Mitsumi Electric Co., Ltd.², 1601 Sakai Atsugi-shi, Kanagawa 243

Presto JST³, Crest JST⁴,

(1998年10月14日受理、1999年1月21日採録)

It is generally difficult to interpret MFM images. Information about the magnetic structure of the tip apex is needed to define the origin of a detected magnetic force. Magnetic dipole interaction affecting the magnetic states of the tip and samples should be considered. In some case, however, a simple analytical method is valid. We propose a new graphical method for interpreting the MFM image contrast, which based on the interaction lines mapping around 90° and 180° domain walls. MFM images of a cross-tie wall can be explained by using the proposed methods. Graphical drawings of the MFM images are compared with experimental MFM images of patterned Ni₈₀Fe₂₀ thin films taken with a Ni₈₀Fe₂₀-coated tip.

Key words: magnetic force microscope, domain structure, 90° wall, permalloy

1. はじめに

磁気力顕微鏡(Magnetic Force Microscope: MFM)¹⁾は、試料からの漏洩磁場を数十 nm の空間分解能で観察できることから、媒体の磁気記録状態や磁気ヘッドの書き込み磁場などを評価するための微小磁気計測技術として利用されている。磁性体探針の磁区構造と探針-試料間に働く磁気双極子相互作用の詳細が分からないと、MFM を用いた測定で得られる磁気像 (MFM 像) を解析し試料の磁化状態を知ることができない。特に、探針の磁化状態や試料の磁化状態が、試料からの磁場あるいは探針からの磁場の影響を受けて測定中に変化する場合があり、MFM 像の解析をさらに困難なものにしている。こうした相互作用を解析するには探針と試料からなる測定系の磁化状態を有限要素法で計算するなどしてはならない。より一般的な MFM 測定系を考慮した解析を行うためには、計算機資源の制約という点から考えても困難な場合が多い。

一方で、MFM 像の意味しているところを複雑な計算なしに定性的に理解したい場合がある。本研究では、磁区観察を行った際の MFM 像に現れるコントラストを簡単な作図法を用いて説明す

る方法を提案する。MFM で行う磁区像観察の典型的な例として Ni₈₀Fe₂₀ 薄膜素子の磁区観察を行い、提案した作図法を用いて得られるコントラストと比較検討を行う。

2. MFM 測定

本研究では、提案する作図法の妥当性を検討するために、Ni₈₀Fe₂₀ 薄膜パターン上の MFM による磁区観察を行い、実験結果と作図との比較を行った。測定に用いた試料は、AITiC 基板上にスパッタで成膜した膜厚 30nm の Ni₈₀Fe₂₀ 薄膜であり、縦 5 μm、横 10 μm の大きさである。素子一枚の基板上に約 100 個あり、本報告では、その中で特徴的な磁区構造をなしていると考えられるものについて取り上げた。

MFM 装置にはセイコー電子工業(株)製 SPI3700 を用いた。磁気力の検出にはカンチレバーの共振周波数のシフトによる位相の変化を測定する位相検出方式を採用している。また、試料の表面形状の影響を除くために、はじめに表面形状を測定し、その情報をもとに探針-試料表面間距離を一定に保ちながら探針を走査し、位相シフトを検出している。

探針には、原子間力顕微鏡用 Si マイクロカンチレバー上に

Fig. 1 MFM images and simplified drawings of patterned Ni₈₀Fe₂₀ thin films: (a) 90° domain walls. (b) 90° domain walls and an 180° wall. The 180° domain wall is located at the center of the sample. (c) A cross-tie wall is seen at the center.

Fig. 2 (a) Line profile within the domain. (b) Line profile of the center area of an MFM image.

$\text{Ni}_{90}\text{Fe}_{10}$ を 70nm スパッタ成膜したものを用いた。測定前に約 2000Oe の磁場中で探針軸と平行な方向に探針先端が N 極となるように着磁を行っている。

Fig. 1 に典型的な磁区構造と考えられる 3 種類の MFM 像を示す。(a) の試料では全ての磁壁が 90° 磁壁からなる還流磁区構造で、(b) では (a) の中央付近で見られた磁区がなくなり 180° 磁壁となっている。また、この 180° 磁壁の中央付近には遷移点があり²⁾、この点を境に左右で磁壁付近のコントラストが反対になっている。(c) は (b) の中央部分が枕木磁壁になっているものである。

3. 簡単な作図による解釈

3.1 作図方法

Fig. 1 より試料は様々な還流磁区構造をなしていることがわかるが、いずれも磁壁部分で強い応答(強い斥力あるいは引力が検出される)が見られる。また、磁区の内部と考えられる領域においても MFM 像にコントラストがつく。Fig. 2 は磁区内での MFM 像のコントラストの様子を示す。一般に還流磁区構造をとっている場合、磁化は静磁エネルギーを低くするために試料面内方向を向いていることが知られており、磁区内の試料表面に磁荷が現れない。したがって、この磁区内にみられる MFM 像のコントラスト

Fig. 3 Rotation of the magnetic moment in the 90° wall. (a) 3-dimensional drawing of the moment, (b) its xy-plane component, and (c) its xz-plane component.

Fig. 4 Interaction lines from the 90° wall. (a) Enlarged model of the small region in the 90° wall. Arrows in the wall indicate the magnetic moments. Dashed arrows indicate the interaction lines. Gray arrows indicate the magnetization of the domain. (b) Superposition of the interaction lines from the whole 90° wall.

は磁壁表面に現れる磁荷の寄与であると考えられる。本研究ではこの点に注目し、MFM 探針が検出する力を磁壁に現れる磁荷からの寄与の重ね合わせとして図示する方法を提案する。以下に測定した試料にみられた特徴的な磁壁について考察する。

3.2 90° 磁壁

Fig. 3 は 90° 磁壁内での磁気モーメントの回転を示した模式図である。 90° 磁壁では、一般にこの磁壁に関する左右の磁区の磁化の磁壁に対して法線成分を連続に保つように磁気モーメントが回転し、磁壁面上に磁荷を生じないように遷移する³⁾。Fig. 3 (b), (c) からわかるように、磁気モーメントの法線成分連続の関係からその x 成分は一定になり、z 成分は磁壁中央部で最大になる。

次に磁壁内の磁気モーメントの回転を仮定したときに、個々の

Fig. 5 Magnetic spin configuration in the two types of 180° walls and their MFM responses. For calculation, the tip magnetization is assumed to be a point dipole along z direction. (a) In the Néel wall, the magnetic moments are shown by arrows, and the effective positive and negative free poles are marked + and -, respectively. (b) Calculated MFM response. The two peaks correspond to the free poles. (c) Spin configuration in the Bloch wall (d) Calculated MFM response. There is one peak near the center of the wall.

Fig. 6 (a) The MFM average line profile within the enclosed area in the image (b). There are maximum and minimum peaks, indicating that the wall is Néel wall.

モーメントから出る磁場と探針との相互作用について考察する。Fig. 4は磁壁内の磁気モーメントと探針との相互作用が強いと考えられる方向について、直線を用いて模式的に図示したものである。以降、この直線を相互作用線と呼ぶことにする。ここでは磁気モーメントからの磁場と探針との相互作用を考えているので、相互作用はモーメントと平行な直線上で強くなると予想される。また、磁壁内では有限個の磁気モーメントで遷移するとしているため、この相互作用線の本数も有限であり、Fig. 4では3本の直線で代表して表している。ここでは磁壁内の磁気モーメントは一様に回転していると仮定している。磁壁内でモーメントは 90° 回転しているため、相互作用線も 90° の広がりを持って分布しており、そのうちの両端と中央の3本の直線で代表しても直線の密度は表現できると考えられる。直線の交差部分では磁荷の寄与が重ね合わされていることになり、探針に対する相互作用が大きい領域を表している。したがって、直線の密度の高いところではMFM応答が大きくなり、磁区内でもコントラストが表れることが予想される。

3.3 180° 磁壁

Fig. 5に 180° 磁壁の磁気モーメントの回転の模式図((a), (b))とそれぞれの磁壁に対して探針を点双極子近似した時の予

Fig. 7 The schematic interaction lines distribution around the 180° Néel wall. Solid lines indicate the interaction lines.

想されるMFM応答((c), (d))を示した。((a), (c))はネール磁壁の場合であり、((b), (d))はブロッホ磁壁の場合である。ブロッホ磁壁では磁気モーメントは磁壁に関してその法線成分が連続であるように回転し、試料表面に磁荷が現れ、MFM応答は極大ピークをもつプロファイルになる。ネール磁壁の場合、磁気モーメントは試料表面内で回転している。磁気モーメントが面内で回転しているため表面磁荷は現れないが、体積磁荷が蓄積される。したがってこの体積磁荷による影響と、試料表面に微妙な凹凸によって現れる表面磁荷の影響で、磁壁の両側において有効磁荷が存在する。Fig. 5ではこの有効磁荷 $+$ 、 $-$ の記号を用いて表した。これらの磁荷の存在により、予想されるMFM応答は両側の磁荷に対応して極大と極小のピークを一つずつ持つと考えられる。本研究で用いた試料の厚さは 30nm であるが、実際のMFM像の 180° 磁壁の平均断面プロファイル(Fig. 6)とFig. 5を比較して、この 180° 磁壁はネールのな遷移をしていると考え、モデル化した。

次にこの 180° ネール磁壁からの相互作用線について、 90° 磁壁と同じように、直線を用いた作図により考察する。ネール磁壁の場合、その両端にある有効磁荷が探針へ作用すると考えられるため、この有効磁荷からの直線Fig. 7で示したように、磁区に向かってある程度の広がりを持って伸びているとする。

Fig. 1(b)にみられる 180° 磁壁はその中央部に遷移点が見られ、その左右においてMFM像のコントラストも対称的になっているため、この点を境にネール磁壁の極性が反対になっていると考えられる。したがって、この磁壁から出る相互作用線の向きもこの遷移点の左右で反転させると、MFM像と同様のコントラストが得られた。

3.4 枕木磁壁

Fig. 1(c)は枕木磁壁のMFM像である。枕木磁壁はブロッホ磁壁とネール磁壁のエネルギーが均衡している膜厚において、両方の磁壁が交互に現れているものである。主な部分はネール磁壁からなり、磁壁内でその極性が交互に変化する。この磁壁内での変

Fig. 8 Simple graphical drawings of MFM images, of (a) a 90° domain wall, (b) several 90° domain walls, (c) 90° domain walls with a 180° wall, and (d) a cross-tie wall.

遷部はブロッホ型の遷移をしており、ブロッホラインと呼ばれ、 90° 磁壁から構成される⁴⁾。枕木磁壁を 90° 磁壁と 180° 磁壁から構成されるものと考え、この磁壁から引き出される直線は磁化の方向に注意して、3.2節、3.3節で述べた 90° 磁壁の直線と 180° 磁壁の直線を組み合わせることで作図できる。

3.5 作図例

まず Fig. 1(a)で観察された 90° 磁壁からなる環流磁区の場合、すべての 90° 磁壁から3.2で述べた直線を引く。Fig. 8(a)に一つの 90° 磁壁からの相互作用線を示した。すべての磁壁に対してこの操作を行った結果をFig. 8(b)に示す。この図ではすべての直線を磁性体薄膜パターンの境界まで引いている。直線の重なり具合をみると、Fig. 2(a)で観察されたMFM像のコントラストに類似している。特に磁区内でのコントラストが良く再現されている。

180° 磁壁を含む場合はFig. 8(c)な作図となる。この場合もFig. 2(b)にみられる磁区内でのMFM像コントラストが良く再現されていることが分かる。

枕木磁壁では 180° 磁壁からの直線と 90° 磁壁からの直線とを重ね合わせて描く。そうするとFig. 8(d)のような作図を得る。ここでも、Fig. 2(c)で測定されたMFM像コントラストに類似した結果が得られる。

4. おわりに

MFM像のコントラストを説明するために、磁壁からの寄与を直線を用いて作図することにより解釈する方法を提案した。

$\text{Ni}_{10}\text{Fe}_{20}$ 探針を用いたMFM測定により、 $\text{Ni}_{10}\text{Fe}_{20}$ 薄膜パターンの磁区構造を観察したところ、 90° 磁壁、 180° 磁壁、枕木磁壁の磁区像が得られた。各磁壁からの寄与を直線で表し、パターン内のすべて磁壁について作図をすると、相互作用線の分布が得られ、MFMコントラストをよく再現していた。このことは、これらの磁壁からなる様々な磁区構造について得られるMFM像を予測できることを示唆している。今までに、試料に磁荷を分布させたモデルでの解釈が行われているが⁵⁾、本研究での相互作用線を仮定したモデルと近似的には等価であると考えられ、複雑な数値計算をすることなく簡単な方法で磁区内のコントラストが得られることがわかる。しかしながら、この作図方法の一般的な磁区に対する適用可能性を論ずるには、直線の密度とMFM像の関連性を定量的に議論する必要がある。

文 献

- 1) D. Ruger, H. J. Mamin, P. Guethner, S. E. Lambert, J. E. Sten, and I. McFadyen: J. Appl. Phys., 68, 1169 (1990)
- 2) W. Rave, L. Billiard, M. Labrune, A. Thiaville and J. Miltat: IEEE Trans. Magn., 30, 4473 (1994)
- 3) 近角聰信著：強磁性体の物理（下）P184
- 4) S. Middelhoek: J. Appl. Phys., vol.34, No4 (PT2), 1054 (1963)
- 5) A. Hubert, W. Rave, S. L. Tomlinson: Phys. Stat. Sol., (b) 204, 817 (1997)