電子顕微鏡による薄膜磁気ヘッドの磁区観察

Observation of the Magnetic Domain in Thin-Film Heads by Electron Microscopy

小林和雄

(株)富士通研究所, 神奈川県厚木市森の里若宮 10-1 (〒243-01)

K. Kobayashi

Fujitsu Laboratories Ltd., 10-1 Morinosato-Wakamiya, Atsugi 243-01

A magnetic domain was observed by using an image lock-in technique for backscattered electron contrast (Type II) with a JEOL 2000FX-II 200 kV electron microscope. A thin-film head without a protective layer was excited by applying a 10 mA_{p-p}, 100 kHz drive current. Backscattered electron were synchronously detected by using a diode detector and a lock-in amplifier, and images were acquired digitally by using a LINK eXL-II system. Back-scattered electrons indicated a difference in the magnetic domain configurations in the upper and lower parts of the upper pole, changing the acceleration voltage. Since the location of a pair of black and white lines in a synchronous mode shows the maximum limit of domain wall movement in one drive current period, the observed difference must have been caused by the difference in domain wall movement, that is, the difference in magnetic flux flow. Conversion of the domain configuration from the upper part to the lower part was also observed. Such conversion is possibly one of the causes of noise-after-write.

Key words: scanning electron microscope, back-scattered electron, lock-in amplifier, magnetic domain, thin-film head, scanning Kerr effect microscope

1. はじめに

薄膜ヘッドの磁区を観察することは、ヘッドの特性を理解する上で非常に重要である。特に磁化の動特性は、ヘッドに現れる種々のノイズの解明には不可欠のものであると考えられる。

走査型カー効果顕微鏡 (Scanning Kerr Effect Microscope, 略称 SKEM) を用いて、薄膜磁気ヘッドの磁化状態の観察が行われている¹⁻⁴⁾。しかし、光による方法では磁性体のごく表面 (約 800 Å) の状態しか観察しておらず、分解能も十分なものではない。そこで走査透過電子顕微鏡を用い、磁性膜からの反射電子 (Type II) を S/N 良く観察可能なロックイン手法^{5), 6)}を構築し、薄膜ヘッ

ドの磁区観察を行った。走査型電子顕微鏡を用いた磁区の各種の観察法および原理のレビューは津野⁷⁾により報告されている。薄膜ヘッドの磁区構造を、ロックイン計測法で SEM を用いて最初に観察したのは Wells ら⁵⁾である。続いて走査透過電子顕微鏡を用いて、Ferrier ら⁶⁾により行われた。ここで述べる方法は、基本原理においてはこれらの方法と同じであり、特に走査透過電子顕微鏡を用いている点では Ferrier らの方法と、装置の細かい点を除いては同じである。

本報告では、試料に入射する電子の加速電圧を変えることにより、得られる反射電子の深さ情報が異なることに着目して、磁気ヘッドの磁極である磁性膜の深さ方向での磁区構造の相違を観測することを目的とした。また特に、磁極の表面と内部においては、渦電流等により磁束の流れ方が異なっている可能性もあり、この点を明らかにすることも目的とした。

2. 実験方法

実験には、JEOL2000FX-II 走査透過電子顕微鏡を用いた。これに磁場遮蔽用ポールピース (BMP20) を取り付け、この内側の試料直上の位置に、一対の反射電子検出器 (PN フォトダイオード) を軸に対称の位置に取り付けた。実験の構成を Fig. 1 に示す。薄膜ヘッドはシグ

Fig. 1 Schematic diagram.

ナルジェネレイタにより 100 kHz で駆動し、薄膜ヘッドからの反射電子を検出器で受け、両検出器の和信号をロックインアンプを通して同期検出する。電子ビームの走査と画像の取り込みは Link eXL-II で行った。

使用したヘッドは、めっきプロセスを用いた NiFe 磁極ヘッドである。ヘッドの磁極厚は約 $3\mu\text{m}$ 、磁極先端のコア幅は約 $8\mu\text{m}$ 、巻線数は 32 ターン、保護膜なしの状態を観察した。

また、電子顕微鏡像と比較するために、SKEM (Phase Metrics 社製) を用いて薄膜ヘッドの高周波励磁状態での磁区の観察を行った。光源は Ar レーザー、s 偏光を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 実測例

磁区の測定は 512×512 画素で行った。1 画素取り込みに要する時間 (dwell time) を 1 ms から 10 ms まで変化した場合の結果を Fig. 2 に示す。また、測定時にヘッドに流す電流は 10 mA_{pp} である。本実験に使用したロックインアンプの最小応答時間が 1 ms であるため、1 ms および 2.5 ms の dwell time では十分な画質の像は得られない。したがって、以下の実験では、十分な画質の得られる 5 ms の dwell time とした。この時 1 画面を得るのに要する時間は約 20 分であった。

測定時にヘッドに流す電流を変化させた場合の結果を

Fig. 2 Changes in the synchronously detected images for different dwell times of image acquisition: (a) 1 ms, (b) 2.5 ms, (c) 5 ms, (d) 10 ms.

Fig. 3 に示す。ヘッドに流す電流値の増加につれ、白黒の線間隔が大きくなっている。

これらの写真で明らかなように、磁壁は白と黒の一對の線になって現れる。ヘッドに流す電流値の増加につれ、白黒の線間隔が大きくなっていることより、白線と黒線は磁壁の動く範囲を表しているものと考えられる^{5), 6)}。また、Fig. 3(c) の中に A と B で示すところでは白線と黒線が逆転している。これは、磁壁移動の位相が 180 度ずれていることを示しているものと考えられる。この理由としては、このヘッドの起磁力なしの状態での

Fig. 3 Changes in the synchronously detected images for different drive currents: (a) 5 mA, (b) 10 mA, (c) 15 mA, (d) 20 mA, (e) 25 mA, (f) 30 mA, (g) 35 mA, (h) supposed domain structure.

磁区構造の想像模式図 (Fig. 3(h)) に示すように、ヘッド先端に向かって流れる磁束に対して左右の磁区の磁化方向が互いに逆向きの成分を持っているためであると考えられる。さらに、このヘッドの例では、バックギャップを中心として放射状の磁壁 (円弧状の磁化を持った磁区) が発生している。この原因としては、小柳ら⁸⁾により明らかとされたように、バックギャップを中心とした円弧状に引っ張り応力が発生し、磁性膜の磁歪定数が負のため放射状の磁壁になると考えられる。

比較的きれいな還流磁区構造を示したヘッドの磁区の例を Fig. 4 に示す。Fig. 4(a) は全体像、(b) は先端部分、(c) は (a), (b) より推定した起磁力なしの状態でのヘッド

の磁化方向の想像模式図である。また、バックギャップおよび先端付近の立体的な様子を示す意味で、比較のためにロックインアンプを通さない場合の反射電子像を Fig. 4(d) に示す。

3.2 加速電圧依存性

比較的きれいな還流磁区構造が観測されたヘッドを用いて、試料に入射する電子線の加速電圧を変えた場合の結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5(a) から (d) まで加速電圧を徐々に高めていった時の結果であり、磁極の先端付近の磁区の様子とは変化しないが、バックギャップ付近の磁壁 (Fig. 5(a) に矢印で 2 か所示す) の動く場所が徐々に異なっている事が見て取れる。加速電圧を高めた場合

Fig. 4 Images of thin-film head: (a) magnetic domain in the upper pole, (b) magnetic domain in the pole tip, (c) supposed domain structure, (d) backscattered electron image.

に、試料から放出される反射電子は、より深い場所からのものであることが知られており、津野によれば⁷⁾、50 kV で約 $0.2\mu\text{m}$ 、100 kV で約 $1\mu\text{m}$ 、200 kV で約 $5\sim 8\mu\text{m}$ である。したがって、Fig. 5(a) の 60 kV は磁極の上層部、(d) の 160 kV は磁極の下層部を観測していることとなる。

Fig. 5 の (a) と (d) を比較して見ると、一見バックギャップ付近の磁区構造が異なっているように考えられる。しかし、物理的に考えるならば、この手法は磁壁の動いている部分を計測しているので、この見え方の違いは、磁極の上層部と下層部で磁壁の動く場所が異なっていることを表しているものと考えられる。

Mallary ら⁹⁾は、高周波状態での磁束の流れは磁壁移動と磁化回転の両方によって生じると言うモデルを提出している。したがって、ここで観察した磁壁の動きの相違は、磁束の流れ方の違いを表しているものと考えられる。Fig. 5 の例では、(a) と (d) において矢印を付けた場所の磁壁の位置を比較して見ると、(d) ではより磁極の外側で磁壁が動いていることより、バックギャップから

Fig. 6 Domain images observed by SKEM for different incidence direction of the Ar-laser beam: (a) perpendicular to the hard axis of the yoke, (b) parallel to the hard axis of the yoke.

Fig. 5 Changes in the synchronously detected images for different accelerating voltages: (a) 60 kV, (b) 80 kV, (c) 120 kV, (d) 160 kV.

出るか、もしくは入る磁束は、ヘッドの磁極下層では、磁極全体に広がっていることが見て取れる。特にこのヘッドは図の左下の磁壁の動きが激しい。したがって、磁極の表面付近の方が、下層に比較して、磁束が磁極の対称中心線上に、より集まる傾向を示していると考えられる。Kasiraj ら^{11,12)}は、磁束は高周波(約 10 MHz)になればなる程磁極の中心線の近くを流れることを明らかにしている。磁極下層でもそうなのかは、本装置を高周波化して観測したいと思っている。

同じヘッドを SKEM により測定した結果を Fig. 6 に示す。Fig 6(a) はレーザー光をトラック幅方向に垂直方向(磁極の磁化回転量が測定でき、磁束モードと言う)、Fig 6(b) はトラック幅方向(磁壁の動きを測定でき、磁区モードと言う)に光を入射した場合である。駆動電流は 10 mA_{O-P}、測定周波数は 1 MHz である。SKEM を用いて得た磁区構造は、電子顕微鏡の加速電圧が 60 kV の時の結果である Fig. 6(a) とほぼ一致している。また、磁束モードの結果(横軸が 1.25 倍拡大されていること

に注意)より、磁極先端付近を除いて、端にある三角磁区には磁束がほとんど流れていないことが分かる。

さらに、Fig. 5 のバックギャップ付近の磁壁は、いったんヘッドに流す電流を止めて再測定すると、Fig. 7(a) の矢印で示した部分において、上層部と下層部が逆転する場合もある。Liu ら¹⁰⁾はストロボカー効果顕微鏡を用いて、バックギャップ付近でかつ磁極の中心線付近にあるスパイクライク磁区がノイズアフターライトの原因であろうと報告している。バックギャップ付近は傾斜が急峻であり、応力が複雑に変化していることが知られており、ここで観測された磁束の変化も、薄膜ヘッドで現れるノイズアフターライト等の不安定性の一因ではないかと予想される。

4. ま と め

走査透過電子顕微鏡を用いて、反射電子をロックイン法により計測する方法を構築し、薄膜ヘッドの磁区構造の観察を可能とすることができた。本方法では、光を用

Fig. 7 Changes in the synchronously detected images for different accelerating voltages: (a) 60 kV, (b) 80 kV, (c) 120 kV, (d) 180 kV.

いた SKEM と異なって、入射電子の加速電圧を変えることによって、磁性膜の深さ方向での磁壁の動きの違いを観測できる。薄膜ヘッドでは、バックギャップ付近で、磁壁の動く場所が深さにおいて異なることが観測できた。また、いったんヘッドに流す電流を止めて再測定すると、磁壁の動く場所が上層部と下層部で逆転する場合もあり、薄膜ヘッドで現れるノイズアフターライトなどの不安定性の一因ではないかと予想できた。今後はさらに高周波状態での観察を行う予定である。

謝 辞 ロックイン手法に関して御教示および御助言いただいた Glasgow 大学 R. P. Ferrier 教授と Dr. S. Fefferman に感謝いたします。

文 献

- 1) P. Kasiraj, R. M. Shelby, J. S. Best and D. E. Horne: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-22**, 837 (1986).
- 2) P. L. Trouilloud, B. E. Argyle, B. Petek and D. A. Herman: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-25**, 3461 (1989).
- 3) B. Petek, P. L. Trouilloud and B. E. Argyle: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-26**, 1328 (1990).
- 4) 鳴海俊一, 須藤修二, 相原 誠, 福井 宏: 日本応用磁気学会誌, **16**, 95 (1992).
- 5) O. C. Wells and R. J. Savoy: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-17**, 1253 (1981).
- 6) R. P. Ferrier, S. McVitie and W. A. P. Nicholson: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-26**, 1337 (1990).
- 7) K. Tsuno: *Rev. Sol. State Science*, 623 (1988).
- 8) 小柳広明, 荒井礼子, 光岡勝也, 福井 宏, 成重真治, 杉田 植: 日本応用磁気学会誌, **13**, 103 (1989).
- 9) M. Mallary, A. Torabi and S. Batra: *J. Appl. Phys.*, **67**, 4863 (1990).
- 10) F. H. Liu, M. D. Schultz and M. H. Kryder: *J. Appl. Phys.*, **69**, 5415 (1991).

1992 年 11 月 19 日受理, 1993 年 2 月 2 日採録