薄膜磁気ヘッドの高周波磁化挙動

High Frequency Response of Magnetization of Thin-Film Heads

鳴海俊一・須藤修二・相原 誠・福井 宏

(株)日立製作所日立研究所, 日立市久慈町 4026 (☎319-12)

S. Narumi, S. Sudo, M. Aihara and H. Fukui

Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd., 4026 Kuji-cho, Hitachi 319-12

The magnetization response of thin-film heads in the high frequency region was studied using the Scanning Kerr Effect Microscope. The area of large magnetization rotation converges gradually to the center portion of the core of a thin-film head as the frequency is increased. Over 20 MHz, the domain structure changes; i.e., the number of domains increases with increase in frequency and the curvature of both sides of the 180° walls becomes gradually small. In result, the convergence region of the magnetization rotation becomes wider. Compared with the static magnetization direction and the magnetization response, at the high frequency the magnetization along the track direction in static rotates large, while that slanted from the track direction rotates small.

Key words: scanning Kerr effect microscope, high frequency response of magnetization, magnetic domain, thin-film head, spin-polarized SEM

1. はじめに

磁気ディスク装置のデータ転送速度の向上を実現する上で、薄膜磁気ヘッドの磁気コアの周波数特性を向上することは重要である。磁気コアの周波数特性は、磁区構造に強く関連していると考えられており、すでに多くの磁区構造観察例^{1)~4)}が報告されている。

ここでは走査型カー効果顕微鏡 (Scanning Kerr Effect Microscope: 以下 SKEM と略す)^{1), 3)} を用いて、薄膜磁気ヘッドの高周波励磁時の磁化挙動を観察した。また、この結果の理解を深めるためにスピニング SEM⁴⁾ による静的な磁区構造観察を行い、両者の比較により得られた知見について報告する。

2. 実験方法

SKEM (Phase Metrics 社製) は Re³⁾ の測定手法を基本としており、縦カー効果を利用して高周波励磁状態での薄膜磁気ヘッドの上部磁気コアの面内の磁化挙動を

観測できる。SKEM のカー信号出力は磁化の回転振幅が大きいかほど大きく、回転振幅が小さいほど小さい。またレーザーの入射方向とも関係があり、磁化方向に垂直に入射した場合には大きく、平行に入射した場合には小さくなる。したがって、一般にトラック幅方向に対し垂直に入射した場合には磁束密度変化に相当する主磁区内の磁化回転量が測定でき、トラック幅方向に平行に入射した場合には磁壁の移動量が観測できる。なお、光源には Ar イオンレーザー (波長 512 nm) を用い、s 偏光を入射角度 20 度で入射し、起磁力は $0.14 \text{ AT}_{(op)}$ とした。スピニング SEM は小池ら⁴⁾によって開発されたものである。磁化方向を直接決定できるだけでなく、分解能が高いという特徴を活かしてこれまで磁性膜の微小領域の磁区構造が評価されてきた。原理の詳細は小池らの論文を参照されたい。

本研究に用いた試料の磁気コアは、従来材のパーマロイ ($B_s = 1.0 \text{ T}$) より高飽和磁束密度である CoTaZr 非晶質膜 ($B_s = 1.3 \text{ T}$, 磁歪定数はわずかに正) である。また、スピニング SEM での観察を可能にするため保護膜なしの薄膜磁気ヘッドである。

3. 実験結果および考察

3.1 磁束の中央集中

Fig. 1 にレーザー光をトラック幅方向に垂直に入射した時の SKEM の観察結果を示す。励磁周波数は 1~20 MHz である。ここで、SKEM のカー信号出力 (以下カー信号出力と略す) の大きい領域は白色、出力の小さい領域は黒色である。1 MHz では主磁区内のカー信号出力はほぼ一様である。これは、主磁区内では磁化回転量がほぼ一様であり、すなわち磁気コア内を通る磁束密度がほぼ一様であることを意味する。また、90 度磁壁のカー信号出力は大きい、180 度磁壁では小さい。これは、主磁区内および 90 度磁壁上の磁化方向が入射面に対し傾いているのに対し、180 度磁壁上の磁化方向が入射面に対しほぼ平行であるためである。5 MHz では主磁区

Fig. 1 Domain structures of a thin-film head observed by SKEM with glancing angle illumination along the hard axis. Drive current is 5 mA_{op} at (a) 1 MHz, (b) 5 MHz, (c) 10 MHz, and (d) 20 MHz.

内の両端のカー信号出力が若干小さくなり、中央部では大きくなっている。10 MHz、20 MHz と周波数が高くなるにつれて主磁区内両端でのカー信号出力は小さくなり、一方中央部では大きくなる。上述したように、主磁区内の磁化回転量は磁束密度変化に対応していると考えられ、Fig. 1 から周波数が高くなるにつれて磁束変化領域が中央部に集中していくことがわかる¹⁾。

以上で定性的に高周波で磁束変化領域が集中していくようすについて述べたが、ラインスキャンを用いて定量的に測定した。Fig. 2 にトラック幅方向にラインスキャンした時のカー信号出力および励磁電流に対するカー信号の位相を示す。測定位置は図中に示すように、主磁区中央部を横断する位置である。測定位置で $10 \mu\text{m}$ および $100 \mu\text{m}$ 付近のカー信号出力のピークは 90 度磁壁に相当する。前述したように、1 MHz のカー信号出力は両側の磁壁部分を除いて、主磁区全域でほぼ一定であるが、10 MHz では主磁区内中央部の出力が大きくなり、主磁区内の両端部では小さくなっているのがわかる。これは主磁区中央部に比べ端部では高周波透磁率が下がり、コアを通る磁束が主磁区中央部に集中することを示している。なお、 $70 \mu\text{m}$ 付近のピークは磁性膜上の傷によるものである。位相に関しても同様で、1 MHz では両側の 90 度磁壁を除いて主磁区全域でほとんど 0 度であるのに対し、10 MHz では主磁区両端で位相が約 45 度遅れているのがわかる。このように周辺部で位相遅れが大きく磁化回転量が小さいことから、高周波ではこの部分で大きな損失が発生していると考えられる。

Fig. 2 Magnetic response *versus* position across the core of a thin-film head observed by SKEM at 1 MHz (upper) and 10 MHz (lower). Left side is magnitude of response and right side is phase.

3.2 磁区構造の変化

次にさらに高周波領域での磁化挙動を観察した結果について述べる。レーザー光をトラック幅方向に対し垂直に入射した時の SKEM 観察像を Fig. 3 に示す。測定周波数は 20~50 MHz である。この図から周波数が高くなるにつれて磁区が細分化するようすがわかる²⁾。また高周波においても基本的には磁束変化領域は主磁区内中央部に集中している。しかしこの領域は 1~20 MHz で見られたように周波数とともに集中するわけではなく、25 MHz ではいったん広がり、その後はあまり変化しな

Fig. 3 Domain structures of a thin-film head observed by SKEM with glancing angle illumination along the hard axis. Drive current is 5 mA_{op} at (a) 20 MHz, (b) 25 MHz, (c) 30 MHz, and (d) 50 MHz.

Fig. 4 Domain images and domain structure in the magnetic core of a thin-film head observed by spin-polarized SEM.

い。周波数を 20 MHz から 25 MHz にすると、180 度磁壁が 1 本増え磁束変化領域は 20 MHz に比べ広がっている。30 MHz にするとさらに磁区が細分化する。また、バックギャップに沿って湾曲していた 180 度磁壁の曲がり方が小さくなる。50 MHz でも磁区構造が変化する。以上述べたように、周波数が高くなるにつれて磁束変化領域は主磁区中央部に集中するが、20 MHz を越えると磁区が細分化し、磁束変化領域の中央集中が緩和される。

3.3 磁化の方向とカー信号出力

次に、スピンの SEM を用いて静的な磁化方向を測定し、SKEM の観測結果と対比した結果について述べる。

スピン SEM を用いて観測した薄膜磁気ヘッドの上部磁気コアの磁区像および磁化方向の模式図を Fig. 4 に示す。Fig. 4(a) では白色部分の磁化は左側を向いており、黒色部分の磁化は右側を向いていることを示している。Fig. 4(b) では白色部分の磁化は下、黒色部分の磁化は上を向いていることを示している。Fig. 4(a), (b) から本研究に用いた薄膜磁気ヘッドの上部磁気コアは Fig. 4(c) に示したような還流磁区構造をしていることがわかる。ここで 180 度磁壁がバックギャップに沿って曲がっており、また Fig. 4(b) において、上部磁気コア中央部分の主磁区では左側から右側に向かって黒色から白色へ徐々にコントラストが変わっており、主磁区内の磁化の方向もバックギャップに沿って傾いているのがわかる。これは、形状効果によりバックギャップ端部に沿って引張応力が作用し、この試料の磁歪が正であるため、磁気弾性効果で生じたものである⁶⁾。また、180 度磁壁がトラック幅方向から傾いており、異方性が全体的に 4 度傾いていることがわかる。

ラインスキャンによる詳細な磁化分布の測定結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5(a)~(c) には、一例として Fig. 5(d)

Fig. 5 Spin polarization components (a) P_x , (b) P_y and (c) rotation angle $\theta = \text{Arctan}(P_y/P_x)$, and (d) domain structure.

に示した A-B 間のラインスキャンによる測定結果を示した。Fig. 5(a) は磁化の x 成分に比例した二次電子の偏極度 P_x を、Fig. 5(b) は y 成分に比例した偏極度 P_y を表している。 P_x , P_y と磁化の方向 θ とは

$$\tan \theta = P_y/P_x$$

の関係があり、この値を計算することにより、A-B 間の磁化方向は Fig. 5(c) に示すような分布をしていることがわかる。磁区観測時よりスキャン速度を遅くしているため、一画素当たりの二次電子数が増加し、S/N が向上している。

異方性の傾きとラインスキャンの結果から得られた磁化分布を Fig. 5(d) に示す。主磁区の右側部分の磁化はトラック幅方向から 16 度傾いているのに対して、左側部分の磁化は 27 度傾いている。Fig. 1 および Fig. 3 に示した SKEM 観測結果と比較すると、高周波では磁化の傾きの小さな右側部分の方がカー信号出力が大きいことがわかる。すなわち、高周波では磁化方向がトラック幅方向から傾いているほど磁化回転量が小さくなる。この現象の詳細については不明であるが、磁化方向と磁束の通る方向の間の角度が 90 度から傾くと、高周波では磁束の変化に対して磁化回転の追従性が悪くなるためであると考える。

以上のスピン SEM で求めた静的な磁化方向とカー信号出力との関係を Fig. 6 に示す。なお、主磁区の右側部分に小さな傷があるため、測定位置は図中に示したように主磁区の左側部分のラインスキャンのデータを用いた。Fig. 6(a) は磁化方向とカー信号出力の関係を示している。1 MHz では磁化の傾きにあまり依存せず、カー信

Fig. 6 Frequency dependence of (a) SKEM magnitude (b) SKEM phase vs. magnetization direction.

号出力はほぼ一定である。しかし 10 MHz, 30 MHz, 50 MHz では、磁化の傾きの小さい主磁区中心ではカー信号出力は大きくなり、磁化の傾きの大きな主磁区の端ではカー信号出力が小さくなる。Fig. 3 で見たように、周波数が高くなると磁区の細分化が起こり、その結果 180 度磁壁の曲がり方が緩和していることから、主磁区端部での磁化の傾きが小さくなっているものと考えられる。10 MHz 以上では磁化の傾きに対するカー信号出力はほぼ同様の振舞をしているが、上記の理由から、磁化の傾きの大きいところでは周波数が高くなるとともにカー信号出力は小さくなるものとする。Fig. 6(b) は、これに対応した位相遅れと磁化の傾きの関係である。1 MHz では、磁化の傾きの大きいところでわずかに位相が遅れているのがわかる。10 MHz では磁化の傾きの大きなところでの位相遅れが大きくなる。ところが 30 MHz では、再び位相の遅れが小さくなり、そして 50 MHz では主磁区全体で位相遅れが大きくなる。これは次のように考えた。周波数を 1 MHz から 10 MHz にすると、主磁区端部の磁化の傾きの大きな領域では磁束変化に対する磁化回転の追従性が悪くなるため、位相遅れが大きくなる。30 MHz になると磁区の細分化が起こり、その結果磁化の傾きが緩和されるため、位相遅れが小さくなる。50

MHz になり全域で位相が遅れてくるのは、渦電流によるものとする。

以上述べたように、高周波励磁状態では磁化がトラック幅方向を向いている領域を磁束は通りやすく、磁化がトラック幅方向から傾いている領域は通りにくい。これは、磁化方向と磁束が通ろうとする方向が 90 度から傾くと磁束の変化に対して磁化回転の追従性が悪くなるためと考える。さらに高周波領域で磁区が細分化する現象については詳細は不明であるが、磁束が主磁区中央部分に集中してくると、磁化回転量の小さい主磁区両端部分および還流磁区内で外部印加磁界に対する静磁エネルギーが増加すると考えられる。磁区の細分化により還流磁区を縮小し、磁化回転領域を拡大することで、主磁区両端および還流磁区での静磁エネルギーが低減されると推定している。

4. まとめ

スピン SEM による静的な磁区構造と SKEM による高周波励磁状態での磁化挙動を観測して、以下の結果が得られた。

- 1) 高周波励磁時の磁束は磁化がトラック幅方向を向いている領域を通りやすく、磁化の傾きが大きい領域ほど通りにくい。また、約 20 MHz までは周波数を上げるとともに磁気コア中央部に集中する。
- 2) 約 30 MHz 以上の周波数では磁区の細分化が起こり、180 度磁壁の曲がり方が小さくなり、磁束の集中が緩和される。

謝 辞 本研究に対し御指導および御助言をいただいた(株)日立製作所小田原工場 川上寛児氏、当研究所光岡勝也氏に感謝いたします。

文 献

- 1) P. Kasiraj *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-22**, 837 (1986).
- 2) P. L. Trouilloud *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-25**, 3461 (1989).
- 3) M. E. Re and M. H. Kryder: *J. Appl. Phys.*, **55**, 2245 (1984).
- 4) K. Koike *et al.*: *Appl. Phys. Lett.*, **45**, 585 (1984).
- 5) 小柳, 他 5 名: 日本応用磁気学会誌, **13**, 103 (1989).

1991 年 11 月 11 日受理, 1992 年 1 月 30 日採録