MR 素子の感度分布に及ぼす SAL 膜の影響の数値解析

Simulation of the SAL Effect on the Sensitivity Profile of MR Elements

菊地慶子・小林俊雄・川井哲郎

日立金属株式会社 磁性材料研究所, 熊谷市三ヶ尻 5200 (〒360)

K. Kikuchi, T. Kobayashi, and T. Kawai

Magnetic & Electronic Materials Research Lab., Hitachi Metals, Ltd.,
5200 Mikajiri, Kumagaya, Saitama 360

The sensitivity profiles, optimum bias field, and transverse transfer curves of MR elements biased by a soft adjacent layer (SAL) were analyzed by using micromagnetic calculations. Four MR element structures, with different SAL magnetization configurations in the wing regions, were investigated. Additional peaks appeared at the base of the sensitivity profile when the elements had a SAL side wing capable of propagating the signal flux from the recording medium. The sensitivity increased and the optimum bias field decreased as the effective anisotropy field of the MR film was decreased by the MR element structures. When the MR element without a SAL side wing was under-biased, a hysteresis arose in the MR response to a cycle of a transverse external field.

Key words: MR head, sensitivity profile, soft adjacent layer, micromagnetics, hysteresis

1. はじめに

軟磁性バイアス膜 (SAL) 型 MR ヘッドでは, オフトラック部の SAL がフラックスガイドとして機能し, オフトラック部に感度を持たせる原因となることが報告されている^{1), 2)}. 感度分布の解析例はすでにあるが^{3), 4)}, SAL の磁化状態が感度分布に及ぼす影響の詳細は明らかになっていない.

本報告では, オフトラック部の SAL の磁化状態が異なる MR 素子構造に対して感度分布を数値解析した. また, 上記の各構造に対して, バイアスのかかりやすさおよび外部磁界に対する磁化分布の安定性の評価を試みた.

2. 計算方法と解析モデル

Fig. 1 に MR 素子の計算モデルを示す. MR 膜のトラック幅両脇の磁化は容易軸 (x) 方向に固定されると仮定した. SAL のトラック幅両端は, Fig. 1(a)~(c) に示す自由な場合 (type A~C) と, Fig. 1(d) の固定した場合 (type D) とを比較した. type A は無限長の素子長あるいは, 素子両端部がトラック幅内に及ぼす影響が無視できるほど長い素子長を想定した. type B は素子長がトラック幅と同程度の場合を, type C は SAL のトラック幅両脇を取り除いた場合を想定した. シールド膜の効果は考慮していない.

MR 膜および SAL の磁化分布は LLG 方程式⁵⁾ によって計算

した. 成膜時の印加磁界を想定して MR 膜および SAL の初期設定は膜全体で磁化が容易軸方向に揃っている ($\theta = 0^\circ$) とした. Table 1 に計算に用いた MR 素子の変数値を示す.

バイアス磁界は, トラック幅内にのみ一様磁界 $H_{y_{MR}}$ を膜高さ方向 (y 方向) に印加した. MR 膜, SAL, および MR-SAL スペースに分流する電流を想定して, $H_{y_{SAL}} = -2.7 \times H_{y_{MR}}$ を SAL に印加した. 媒体は連続反転の記録パターンを想定し, 2 次元磁界解析⁶⁾ で算出した y 成分のみを媒体磁界として考慮し, x 方向の磁界分布は幅 $1.0 \mu\text{m}$ のステップ関数で近似した. 残留磁束密度 B_r は 1 T , 膜厚は $0.02 \mu\text{m}$, 記録パターン反転間隔は $0.9 \mu\text{m}$, ヘッド・媒体間のスペーシングは $0.086 \mu\text{m}$ とした. MR 膜内の磁化回転による比抵抗変化は, 異方性磁気抵抗効果における式⁷⁾ で計算した.

Fig. 1 Schematic diagram of MR element types: (a) type A; (b) type B; (c) type C; (d) type D.

Table 1 Parameters used in the analysis

Sensor height	1.6 μm
Track width T_w	2.0 μm
Saturation magnetization of MR	1.0 T
SAL	0.8 T
Anisotropy field of MR, $H_{k_{MR}}$	0.36 kA/m
SAL	0.288 kA/m
Thickness of MR	25 nm
SAL	18 nm
separation layer	20 nm

Table 2 Optimum bias field and effective anisotropy field for various MR element types

MR elements type	A	B	C	D
Optimum bias field, H_b	5.5	1.2	3.5	7.0
X component of demagnetizing field				
from SAL, H_{kSAL}	1.7	-1.6	-0.2	2.5
from MR, H_{kMR}	1.7	1.6	1.6	2.1
Effective anisotropy field, H_{keff}	3.8	0.4	1.8	5.0
(kA/m)				
$H_{keff} = H_{kSAL} + H_{kMR} + H_{kKu}$

Fig. 2 Biasing magnetization states with different MR element types. (a) Type A: top, MR film; bottom, SAL. Magnetization patterns for SALs of (b) type B, (c) type C, and (d) type D.

3. 解析結果

3.1 SALがバイアス状態に及ぼす影響

高記録密度に伴うMR素子の小型化で適正なバイアスに必要な電流密度は増加するが、温度が上昇抑制のため低電流で適正なバイアスを印加できる素子構造が好ましい²⁾。適正バイアス条件をMR膜の平均磁化回転角度 $\langle\theta\rangle=42^\circ$ として算出した必要バイアス磁界 H_b をTable 2に示す。 H_b は素子によって5~6倍異なり、type B, Cは比較的弱い磁界でMR膜の磁化が回転した。MR膜中央位置での反磁界のx成分を比較すると、MR膜自身からの反磁界 H_{kMR} は素子によらず約2 kA/mだが、SALからの反磁界 H_{kSAL} は素子依存性が大きい。両者とMR膜の異方性磁界 H_{kKu} との和を実効的な異方性磁界 H_{keff} として算出すると、この磁界が弱いほどバイアスはかかりやすくなった。

Fig. 2に、Table 2のバイアス磁界を印加した場合の各MR

Fig. 3 Sensitivity profiles with different MR element types: type A (○); type B (□); type C (△); type D (●).

素子の磁化分布を示す。ここで type A はトラック幅間とその外側左右各4μmを計算領域とし、左右端での境界条件を

$$\theta_{ij}(x=-5\mu m)=\theta_{ij}(x\leq-5.2\mu m)$$

$$\theta_{ij}(x=5\mu m)=\theta_{ij}(x\geq 5.2\mu m)$$

とした。また type B の素子長はトラック幅の2倍に設定した。

MR膜は、SAL内で磁化は各々のバイアス磁界印加方向に回転した。MR膜内の磁化回転は素子依存性が小さく、膜全体ではほぼ一様に回転した (type AのみをFig. 2(a)上図に表示した)。一方、SAL内の分布は素子構造によってかなり異なった。

Fig. 2(a)下図の素子長がトラック幅に比べて十分長い場合 type Aでは、磁化がバイアス磁界の方向に回転する領域はトラック幅の左右各0.2μmにまで広がった。その外側各0.2~0.6μmの領域では $\theta<0^\circ$ の領域からの反磁界で $\theta>0^\circ$ に磁化回転し、さらに外側で $\theta=0^\circ$ となった。Fig. 2(b)の素子長がトラック幅と同程度な type Bでは、バイアス磁界の有無に関わらずSAL全体で磁化が初期設定の $\theta=0^\circ$ (右方向) から左方向に反転し、トラック幅外側での磁化回転領域は各0.2μmと type Aより狭い。これらは、素子両端面でのMR膜-SAL間の静磁結合のためと思われる。Fig. 2(c)のトラック幅両脇のSALを取り除いた type Cでは、SALの左右両端面での反磁界により磁化が上下方向を向きやすく、膜全体で一様に磁化が下を向いた。Fig. 2(d)のSALもトラック幅両端を固定した type Dでは、トラック幅両端近傍での磁化回転が小さくなった。

上記のSALの磁化分布により、type A, Dでは、SALからの反磁界 H_{kSAL} はMR膜自身の反磁界 H_{kMR} と同方向 (異方性磁界を強める方向) に働き、MR膜の磁化回転を妨げる。一方、type B, Cでは、 H_{kSAL} は H_{kMR} と逆向きとなる。SALのトラック幅両端をMR膜と平行に固定した素子のバイアス磁界は、反平行方向の場合の約2倍との計算例がある⁹⁾。本報告で H_b の差が5~6倍となったのは、MR-SALスペーサ厚が20 nmと報告例の80 nmより薄く、上記の異方性磁界の変化が大きいためと思われる。

3.2 SALが感度分布に及ぼす影響

媒体磁界をトラック幅方向に移動させて計算した抵抗変化をFig. 3に示す。type A, B, C, Dを各々○, □, △, ●で示す。

感度分布の最大値を比較するとMR膜の実効的な異方性磁

Fig. 4 Optimum bias field and maximum amplitude vs. effective anisotropy field.

Fig. 5 Contours of equal rotation in response to the medium for a type B element: (a) MR film; (b) SAL.

Fig. 6 MR response to the bias field for type B ($\square$) and type C ($\triangle$). The arrowheads indicate the optimum bias field shown in Table 2.

界が弱いほど、高感度でバイアスがかかりやすくなった (Fig. 4). 最大感度の素子依存性は 2 倍弱と、SAL のトラック幅両端を MR 膜と平行あるいは反平行方向に固定した計算⁹⁾と同程度である。

次にオフトラック部の感度に注目すると、type A, B では感度分布の裾に小ピークが現れた。媒体磁界を type B のトラック部の左側に置いて計算した磁化回転の変化量 $\Delta\theta$ を Fig. 5 に示す。オフトラック部で SAL 中に入った媒体磁界は、SAL 中

を伝播してトラック領域に達しトラック領域内の磁化状態を変化させている (Fig. 5(b)). SAL 中を伝播した媒体磁界は、トラック幅内の半分近い領域で MR 膜の磁化を SAL 内と逆方向に回転させている (Fig. 5(a)). また、type B では、type A よりもオフトラック部の感度が早く減衰した。これは、Fig. 5 から明らかなように type B では、素子両端での SAL と MR 膜との静磁結合がオフトラック部の SAL の磁化回転を抑制するためと思われる。

報告例^{1), 3), 4)}と比べ本報告では、よりトラック部に近い位置により高い小ピークが発生した。これは、シールド膜の影響を無視したことや MR 膜両端を完全に固定したことによると思われる。シールド膜の影響を考慮すると、媒体磁界がシールド膜に吸われ小ピーク高さは低下すると予想される。また、MR 膜両端の固定が不完全な場合は、MR 膜の感度分布がトラック幅の外側にも滲み出し、小ピーク位置がトラック部から離れピーク高さは低下し、小ピークが見えにくくなると予想される。この効果は MR 膜の感度が高い右側の小ピークでより顕著と思われる。報告例^{1), 3), 4)}では小ピークがトラックの左右一方に発生しているが、両脇に発生する測定例もある。上述の MR 膜の感度分布と SAL からの媒体磁界伝播との兼ね合いで小ピークの数を決まるとと思われる。

3.3 SAL が抵抗曲線に及ぼす影響

MR 素子の磁化分布の安定性については、困難軸方向の一樣外部磁界に対する抵抗変化曲線におけるヒステリシスの有無が目安とされる⁸⁾。高感度の得られた type B, C について、バイアス磁界および一樣外部磁界に対する抵抗変化を調べた。

バイアス磁界に対する抵抗変化を Fig. 6 に示す。MR 膜へのバイアス磁界 H_{yMR} は、適正バイアス条件 $\langle\theta\rangle = 42^\circ$ の磁界 H_b (図中 ∇ 印) を目安に増加減少を繰り返した。

Type C では $H_{yMR} = -3 \sim 3$ kA/m の領域で、磁界増加時と減少時とで抵抗変化にヒステリシスが生じた。このようなヒステリシスの発生は、磁区または渦状の磁化分布が原因³⁾と思われる。そこで、Fig. 6 中の 3 点 ($H_{yMR} = H_b \rightarrow (1) \rightarrow -H_b \rightarrow 0 \rightarrow (2) \rightarrow (3) \rightarrow H_b$) の磁化分布を調べた (Fig. 7)。

(1) では、MR 膜、SAL 内で磁化は各々のバイアス磁界印加方向に回転した。 H_{yMR} を下向き H_{yMR} を上向きにバイアス磁界を反転させてから 0 に戻した (2) では、磁化は容易軸方向に戻らず反転時のバイアス磁界方向のままとなった。これは、SAL 内では両端面に生じる磁荷からの反磁界により磁化回転しにくく、MR 膜内の磁化も SAL と静磁結合するためである。 H_{yMR} を上向き H_{ySAL} を下向きに再反転させた (3) では、MR 膜、SAL 内とも磁化反転しやすい中央部ではバイアス磁界方向に磁化回転したが、トラック両端近傍では反転時のバイアス磁界方向のままとなった。

状態 (3) に対して H_{yMR} を 3.5 kA/m まで強めると、ほぼ Fig. 2 と同じ比較的一様な分布に変化した。これは、磁壁状構造をもち H_{yMR} と逆方向の磁化が残る (3) は、交換項と静磁項が高くエネルギー的に不安定なためと思われる。

次に困難軸方向の一樣外部磁界 H_a に対する抵抗変化を調べ

Fig. 7 Magnetization patterns corresponding to Fig. 6 (type C).

Fig. 8 Transverse transfer curves of type C for the optimum bias state (△) and two under-biased states (▲). (1) and (3) are the under-biased states shown in Fig. 7.

た (Fig. 8). 適正バイアス状態からの変化を△で、アンダーバイアス状態 (1), (3) からの変化を▲で示す。 H_a は浮上面近傍の媒体磁界 24 kA/m を目安に増加減少を繰り返した。状態 (3) に対して H_a を 6 kA/m まで強めると状態 (1) に対して H_a を印加した場合とほぼ同じ分布となり、24 kA/m まで増加した後 0 に戻すとほぼ (1) と同じ分布となった。素子構造は異なるが、バイアス磁界を取り除いても磁化が容易軸方向に戻らない場合に出力にバルクハウゼンノイズ (BHN) が生じた解析例があり³⁾、type C でも BHN の発生が懸念される。

一方、type B は、 $H_a = 4 \sim 14$ kA/m の範囲で磁界増加時と減少時とで若干のヒステリシスが発生した (Fig. 9)。このヒステリシス前後の 2 点 (α) (β) での SAL の磁化分布を Fig. 10 に示す。バイアス磁界はトラック幅内にのみ印加したので、磁化回転しにくいトラック幅内と磁化回転しやすいオフトラック部との境界前後で磁壁が発生した (α)。 H_a を 20 kA/m まで増加していくと、膜全体で磁化が H_a 方向に揃った (β)。

4. ま と め

オフトラック部の SAL の磁化状態が異なる MR 素子構造に対して感度分布を数値解析し、以下の結果を得た。

Fig. 9 Transverse transfer curve (type B).

Fig. 10 Magnetization patterns for the SAL corresponding to Fig. 9 (type B).

(1) オフトラック部の SAL が自由な場合、素子長がトラック幅に比べて十分長い場合と同程度の場合ともに、感度分布の裾に小ピークが現れた。

(2) MR 膜の実効的な異方性磁界は素子構造により変化し、異方性磁界が弱いほどバイアスがかかりやすく高感度となった。

(3) オフトラック部の SAL を取り除いた構造では、アンダーバイアス状態で外部磁界に対して磁化が不安定となった。

謝 辞 本研究を行うに当たり御討論頂いた東邦大学の品川教授、日立金属磁性材料研究所の佐久間主任研究員に感謝致します。

文 献

- 1) 興津 淳, 斎藤正路, 佐藤 清, 栗山年弘: 第 18 回日本応用磁気学会学術講演概要集, p. 132 (1994).
- 2) 石綿延行, 山本英文, 山田一彦: 信学技報, MR94-82 (1995).
- 3) S. W. Yuan *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **30**, 381 (1994).
- 4) L. Nix *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **27**, 4693 (1991).
- 5) Y. Nakatani *et al.*: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **28**, 2485 (1989).
- 6) 菅野文子, 釘屋文雄, 中村慶久: 日本応用磁気学会誌, **12**, 137 (1988).
- 7) 松本光功: 磁気記録, p. 193 (共立, 東京, 1977).
- 8) S. W. Yuan *et al.*: *J. Appl. Phys.*, **73**, 6235 (1993).
- 9) S. W. Yuan *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **29**, 3811 (1993).

1995 年 10 月 16 日受理, 1996 年 1 月 12 日採録