日本応用磁気学会誌 25, 1039-1042 (2001)

# 交差磁気異方性膜磁気インピーダンス(MI)効果素子の磁区観察

Domain Structure of Asymmetrical MI Elements in Crossed-Anisotropy Sputtered Films

上野一彦・佐野寛幸・平本廣幸・毛利佳年雄\*・内山剛\*・パニナラリサ\*

スタンレー電気(株)技術研究所、 神奈川県横浜市青葉区荏田西 1-3-1(〒225-0014)

\*名古屋大学工学研究科,名古屋市千種区不老町(〒464-8603)

\*モスクワ物理工科大学, モスクワ

K. Ueno, H. Sano, H. Hiramoto, K. Mohri<sup>\*</sup>, T. Uchiyama<sup>\*</sup>, and L. V. Panina<sup>#</sup>

Stanley Electric Co., Ltd., 1-3-1 Eda-nishi, Aoba-ku, Yokohama 225-0014, Japan

\* Department of Electrical Eng., Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, Japan

\*Moscow Physical & Engineering University, Moscow, Russia

(2000年10月5日受理, 2001年1月24日採録)

A crossed-anisotropy amorphous-film (CoFeB) MI element was deposited on a glass substrate by dc sputtering with two layers each 4.5  $\mu$ m thick, applying a dc field of 270 Oe in a designed anisotropy direction. The MI element showed an asymmetrical MI effect when magnetized with a dc-biased ac current without any bias magnetic field. When the domain of the MI element was observed with a Kerr effect microscope, it was confirmed that the domain structure of the MI element became close to a single domain structure when a dc current was applied. The crossed-anisotropy film MI element induces spiral magnetic anisotropy when a dc current is applied.

Key words: MI effect, sputtered amorphous film, crossed anisotropy, Kerr effect, domain structure

## 1. はじめに

1993年に磁気-インピーダンス(MI)効果による高感度,高 速応答の新しいマイクロ磁気センサ開発の提唱が行われた<sup>1)</sup> のをきっかけに,アモルファスワイヤや種々の形状の薄膜を使 ったMI素子の研究が行われており<sup>2),3)</sup>,現在では小型地磁気 センサ,ハンディ電磁波センサ,車速センサなどが実用化され ている.

MI効果は素子のインピーダンスが外部磁界の正負に対して 対称的に変化するのが一般的であり、リニア磁界センサを構成 する場合には直流バイアスにより、動作点をシフトさせる必要が ある. 直流バイアス磁界を不要にする方法としてアモルファスワ イヤにおいてはワイヤを捻ることでスパイラル磁化を発生し、非 対称なMI効果を得る方法が報告されている<sup>4)</sup>. 一方、薄膜に おいて筆者らは磁気異方性が交差する二層の磁性膜を積層さ せた素子構造で等価的にスパイラル磁化を実現させ非対称な MI特性が得られることを提案し<sup>5)</sup>, 直流を重畳させた高周波電

日本応用磁気学会誌 Vol. 25, No. 4-2, 2001

流を素子に通電させることで外部磁界の正負に対して非対称 で、インピーダンス変化率が 27%/Oe と高感度なMI特性が得 られることを実証した<sup>6)、7)</sup>. また、非対称MI特性が得られるモ デルとして交差磁気異方性膜MI素子に dc 電流を通電させる ことで各磁性層が単磁区構造に近づきスパイラル磁化が誘導 されると推測した. そこで本稿ではこのモデルを実証するため、 カー効果顕微鏡を用いて交差磁気異方性膜の磁区構造を観 察したので報告する.

## 2. 実験方法

成膜は DC マグネトロンスパッタリングを用いて, Table 1 に示 す条件で行った. 成膜中は CoFeB 膜に面内一軸磁気異方性 を付与するため永久磁石を用いて基板表面と平行に 270 Oe の磁場を与えながら行った. 基板は水冷式の冷却テーブルに 固定し, スパッタ中の基板温度が上がらないようにした. 作製し た CoFeB 膜は電磁誘導法で B-H ループを測定し, 保磁力 Hc は 0.9 Oe, 異方性磁界 Hk は 19 Oe であった. 今回作製 した交差磁気異方性膜MI素子の構造を Fig. 1 に示す. 一層 目の CoFeB 膜を基準線からスパッタ中の磁場方向をα<sup>o</sup>傾けて 成膜し, 続いて二層目の磁場方向を基準線から-α<sup>o</sup>傾けて成 膜した. 膜厚はトータルで 9μm とし, パターンニングは塩化第 二鉄を用いたウェットエッチングで基準線が素子の幅方向とな

Table 1 Sputtering conditions of the CoFeB film.

Background pressure:	10 <sup>-7</sup> Torr
DC power:	450 W
Sputtering gas:	Ar
Gas pressure:	2.1x10 <sup>-3</sup> Torr
Target:	B chips on Co <sub>72</sub> Fe <sub>8</sub> B <sub>20</sub>
Substrate:	Glass
Substrate temperature:	50℃
Deposition rate:	30 nm/min

1039



Fig. 1 Schematic diagram of the MI element comprising the crossed-anisotropy sputtered films.



Fig. 2 Circuit for measuring the MI characteristics.

るように幅 200µm のライン状に加工した. 作製した CoFeB 膜の結晶構造はX線回折装置(XRD)を用いてアモルファスであることを確認した. 磁区観察にはカー効果顕微鏡を用いた. M I効果は Fig. 2 に示すように, パルス電源を用いて電流を素子 に通電し, 素子の長さ方向にヘルムホルツコイルを用いて外部 磁界 Hex を印加して素子両端電圧の変化をディジタルオシロ スコープで読みとることで測定した.

## 3. 実験結果と考察

#### 3.1 磁気-インピーダンス特性

Fig. 3 に素子長 10mm,  $\alpha$  = 15°の交差磁気異方性膜MI素 子の磁気インピーダンス特性を示す.素子への通電電流はパ ルス高さ Ip = 3 mA, 立ち上がり時間 tr = 6.8 ns, パルス幅 tw = 15.4 ns, パルス周期 f = 250 kHz である. Fig. 3(a)~(c)はパ ルスに重畳させる dc 電流をそれぞれ 0, 30, -30 mA と変化さ せた時の素子両端電圧の変化を示している.

Fig. 3(a) Idc = 0 mA の時は, 外部磁界 Hex が±0.8 Oe の 領域ではインピーダンスの変化がほとんど見られない. これは 磁化容易軸が素子幅方向から角度を持った方向に向いている ため, 素子長さ方向に加えた Hex により磁壁の移動が起こる ためと考えられる. また, インピーダンスがピークを示す磁界 Hp が 3 Oe と Hk = 19 Oe に比べて非常に小さくなっている.



Fig. 3 MI effects in crossed-anisotropy sputtered films.

これは磁性膜の磁気異方性を交差させて積層することで異方 性磁界が小さくなったのではないかと考えられる.

日本応用磁気学会誌 Vol. 25, No. 4-2, 2001

Fig. 3(b) Idc = 30 mA の時は, Idc を重畳させることにより Hex = 0 Oe 近傍でインピーダンスがリニアに変化し, 外部磁界 の正負に対して非対称な特性を示している. これは dc 電流に より素子幅方向に磁界 Hdc が発生し, 素子表面が単磁区構造 に近づきスパイラル磁化が誘導されたためと考えられる. Hex = 0 Oe 近傍で見られる小さなヒステリシスは素子表面の磁区が 完全に単磁区構造になっていないためと考えられる. また Hex =  $-1 \sim -5$  Oe の領域で見られる大きなヒステリシスは, [Hdc] より大きな|Hex|がマイナス方向に加わることで磁壁移動が起こ るためと考えられる.

Fig. 3(c) ldc = -30 mA の時は, -Hdc が発生するためスパイ ラル磁化の方向が逆向きになり, y軸で反転したMI特性になっ ている.

#### 3.2 磁区観察

素子表面の磁区が単磁区構造に近づいていることを確認す るため、カー効果顕微鏡を用いて磁区観察した結果を Fig. 4 ~5 に示す. Fig. 4(a)は素子に dc 電流を流さない状態, Fig. 4(b)は素子長さ方向に dc 電流 100mA を通電したときの画像 である. 白と黒のコントラストはそれぞれの磁化方向が右向と左 向きになっている. また比較のため Fig. 5 には単層膜MI素子 の磁区観察結果を示す. 白と黒のコントラストはそれぞれの磁 化方向が上向と下向きになっている.

Fig. 5 の単層膜MI素子は素子幅方向に成膜中の磁界を印加し一軸異方性を付与している. 白と黒のコントラストが高く,ストライプ状の磁区が素子長さ方向に並んでいるのが観測された. これに対し, Fig. 4(a)の交差磁気異方性膜MI素子は白と黒の



(a) No dc current.



(b) Applying a dc 100 mA.

Fig. 4 Domain patterns of the crossed-anisotropy sputtered film MI element.

日本応用磁気学会誌 Vol. 25, No. 4-2, 2001



Fig. 5 Domain patterns of the single-layer film MI element.

コントラストが低く,境界がはっきりと見えない.これは下層の磁 性膜の影響を受けていると思われるが,詳細はまだ分かってい ない.また磁区の並んでいる方向は,スパッタ中に加えた磁場 方向よりも素子長さ方向に寝ているように見える.

Fig. 4(b)から dc 電流を素子長さ方向に流すことで素子表面 に Hdc が発生し,素子表面の磁区模様が消滅し,単磁区構造 に近づいていることが分かる.

3.3 磁化モデル

以上の結果を磁化モデルで考察する.表皮効果が顕著に現れる高周波領域(膜厚 d »表皮深さる)を薄膜MI素子に通電した場合,そのインピーダンスの大きさは,素子の長さ l,幅 w(w » d)とすると(1)式で表される.

$$\left|Z\right| = \frac{l\sqrt{\rho\omega\mu_{\theta}}}{2w}.$$
(1)

μ<sub>θ</sub>は Iac が作る周回磁界に対する透磁率, ρは抵抗率, ωは通 電電流の角周波数である. 従って, インピーダンスの大きさ |Z| はμ<sub>θ</sub>の1/2乗に比例する.

ここで交差磁気異方性膜MI素子の磁化モデルを Fig. 6 に 示すように考えると、磁化ベクトル M は dc 電流による Hdc, 異 方性磁界 Hk, 外部磁界 Hex により(2)式に示すエネルギー最 小化条件からスパイラル状に定まる.

$$E = -H_k M_s \cos(\theta_0 - \alpha) - H_{dc} M_s \cos\theta_0$$
$$-H_{ex} M_s \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right).$$
(2)

磁化ベクトル M の回転角θ。は(3)式で決定され,

$$\frac{\partial E}{\partial \theta_0} = 0 . \tag{3}$$

õ<sub>θ</sub> は(4)式によって得られる.

$$\left|\mathbf{z}\right| \propto \sqrt{\mu_{\theta}} = \sqrt{\frac{M_s \cos \theta_0 \cdot \Delta \theta}{\left|H_{ac}\right|}} \tag{4}$$

ここでΔθは Hac によってMが振動する角度である.

a contraction of the second second



Fig. 6 Magnetization rotation model of crossed anisotropy.

Fig. 6 に外部磁界 Hex を変化させたときの交差磁気異方性 膜MI素子の磁化回転モデルを示す. Fig. 6(b)に示すように, Hex が増加すると M が Hex によって素子長さ方向に傾くため  $\mu_0$  は増加し, M が素子の長さ方向と平行になったとき(Hex = Hk で)最大値を向かえる. Hex が減少するとMが素子幅方向 に回転していくためき $\mu_0$  は減少し, Fig. 6(c)のように素子長さ方 向と垂直になったとき(Hex = -Hksin $\theta$ で)最小値を向かえる. こ のような磁化回転モデルで非対称なMI特性が得られることが 証明された.

#### 4. まとめ

カー効果顕微鏡を用いて磁区観察を行った結果, 交差磁気 異方性膜MI素子に dc 電流を通電させると素子表面の磁区が 単磁区構造に近づくことが分かった.このことから交差磁気異 方性膜がスパイラル磁化を誘導しているという磁化モデルが実 証された.また交差磁気異方性膜MI素子の磁区構造はまだ 完全に明らかになっていないため今後更に検討を進めて行く 予定である.

謝 辞 カー効果顕微鏡を用いた磁区観察にご協力下さった 日本科学エンジニアリング(株)部長 赤羽氏,柳沢氏に深く感 謝いたします.

### 文 献

- K. Mohri: Materials Science & Engineering, A185, 141-146 (1994).
- 内山剛, 毛利佳年雄, パニナラリサ, 古野和秀:電気学 会論文誌 A, 115-A, 10, 949-955 (1995).
- 都司智行, パニナラリサ, 毛利佳年雄:日本応用磁気学 会誌 21,793 (1997).
- T. Kitoh, K. Mohri and T.Uchiyama: IEEE Trans. Magn., 31, 6, 3137-3139 (1995).
- L. V. Panina, D. P. Makhnovskiy and K. Mohri: J. Magn. Soc. Japan 23, 925–930 (1999).
- 6)上野一彦, 平本廣幸, 毛利佳年雄, 内山剛, パニナ ラリサ:日本応用磁気学会誌 24, 783 (2000).
- K. Ueno, H. Hiramoto, K. Mohri, T. Uchiyama and L. V. Panina: IEEE Trans. Magn., 36, 5 (2000) to be published.