

円周方向高保磁力角形 BH 特性アモルファスワイヤの高感度 MI 効果

Complementary Magneto-Impedance Effect in Quenched Amorphous Wire

吉永 輝政・上埜 修司・川島 克裕・毛利 佳年雄・蔡 長梅*

ユニチカ (株), 京都府宇治市宇治小桜 23 番地 (☎611-0021)

*名古屋大学工学研究科, 名古屋市千種区不老町 (☎464-8603)

T. Yoshinaga, S. Ueno, K. Kawashima, K. Mohri*, and C. M. Cai*

UNITIKA LTD., 23 Ujikoza-kura, Uji, Kyoto 611-0021

*Graduate School of Electrical Engineering, Nagoya Univ., Fro-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603

(1999 年 10 月 29 日受理、1999 年 12 月 14 日採録)

A new sensitive magneto-impedance (MI) effect was found in quenched FeCoSiB amorphous wire of 30 μm diameter, in which the wire impedance steeply increases from around the dc resistance value to a value almost three times higher with increase in the external applied field H_{ex} , even at a low frequency. The new MI effect shows application of H_{ex} from the non-skin-effect case due to its large coercivity H_c (about 1.5 Oe), at which the circumferential permeability μ_0 is so small that the skin depth $\delta (= (2\rho / \omega\mu_0)^{1/2})$ is larger than the wire radius a , to the skin effect case with steep decrease of H_c (a steep increase of μ_0) for H_{ex} applied vertical to the circumferential domain wall. On the other hand, the MI sensitivity in the quenched amorphous wire is low for a magnetizing current of dc-biased ac, because of its high magnetic anisotropy field H_k of about 3 Oe due to the nonexistence of domain walls.

Key words:

MI effect, annealing temperature, amorphous wire, circumferential coercivity

1. はじめに

磁気インピーダンス (MI) 効果とは、高透磁率磁性体に高周波電流またはパルス電流を通過し、表皮効果を生じさせることにより、そのインピーダンスが外部磁界の印加に対して敏感に変化する電磁気現象のことをいう¹⁾。磁歪がほぼ零のアモルファスワイヤでは、1 Oe あたり数十~100%以上のインピーダンス変化率を示し、励磁方向が円周方向のため反磁界を生じず、ワイヤ長を 1 mm 程度に短くしても MI 効果の感度は劣化しないため、高感度の微小寸法ヘッド材として用いられている。さらに C-MOS 回路によるパルス励磁方式の MI 磁界センサは、消費電力が約 10 mW と小さく、またアナログスイッチ同期整流方式により温度変化による零磁界出力変動率が 0.02% / FS \cdot °C 以下の高い温度安定性を示す^{2)~3)}。このような特徴から、長さ 1 mm 程度の微小寸法ヘッド材からなる高性能マイクロ磁界センサとして広く用いられている。現在の MI センサのヘッド材には直径 30 μm に線引き後、500°C 近傍の温度で張力アニールを施した零磁歪アモルファスワイヤが広く用いられている。

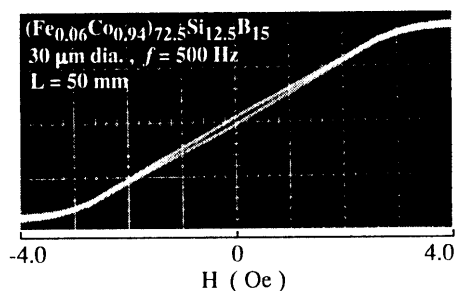
ところで最近上埜 (ユニチカ (株)) が見出した低温張力アニール (クエンチ) を施したワイヤ (3 kg / mm² 張力下 350°C, 熱処理時間 $t_a = 3$ sec.) は、円周方向に高い保磁力及び角形 BH

特性を有しており、高感度の MI 効果を示すことがわかった。

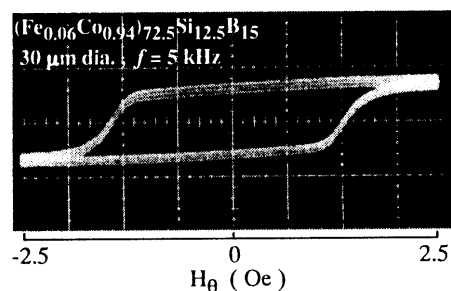
本稿では、この低温熱処理アモルファスワイヤの MI 効果に着目し、基礎特性として正弦波交流通電時の MI 特性を詳細に測定し、ワイヤ長さ方向及び円周方向 BH 特性を測定して、高感度 MI 効果の発生機構の解明を磁壁移動モデルによって試みた。また、このワイヤが正の磁歪を有しており、応力に対して敏感な反応を示すと考えられることから、張力印加によるインピーダンスの変化 (応力インピーダンス効果) についても検討したので報告する。

2. 低温熱処理アモルファスワイヤの BH 特性

Fig. 1 (a) 及び (b) に 3 kg / mm² 張力下 350°C 短時間アニールを施したアモルファスワイヤ ((Co_{0.91}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B₁₅, 線径 30 μm , 熱処理時間 $t_a = 3$ sec.) の長さ方向及び円周方向 BH 特性を示す。Fig. 1 (a) よりワイヤ長さ方向のヒステリシスは小さく、長さ方向保磁力 $H_c = 0.1$ Oe, 異方性磁界 $H_k = 3$ Oe であった。(b) より、円周方向に角形を示しており、このワイヤの



(a) longitudinal BH characteristics



(b) circumferential BH characteristics

Fig. 1 Longitudinal BH and circumferential BH characteristics in an amorphous wire with annealing temperature of 350°C ($t_a = 3$ sec.).

磁化容易軸が円周方向に誘導されていると考えられる。また円周方向保磁力 H_c は約 1.5 Oe であり、現在 MI センサヘッド材として用いられている 3 kg / mm² 張力下 520 °C アニールワイヤ ((Co_{0.91}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B₁₅, 線径 30 μm, $t_a = 3$ sec.) は $H_c = 0.2$ Oe, 円周方向保磁力 $H_c = 0.5$ Oe 程度であることから、異方性磁界は約 15 倍, 円周方向保磁力は約 3 倍ほど大きいことがわかる。

また, (Co_{0.91}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B₁₅ 組成のワイヤは as-quenched 及び冷間線引加工後の as-drawn で磁歪は -0.1×10^{-6} と僅かに負の磁歪を有しているが, 熱処理加工後磁歪は 250~550°C の熱処理温度範囲で磁歪の符号の反転が見られ, 350°C 近傍で熱処理したワイヤは正の磁歪を有する⁴⁾。

Fig. 2 に, 3 kg / mm² 張力下 350°C アニール ($t_a = 5$ min.) を施したアモルファスワイヤ ((Co_{0.91}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B₁₅, 線径 30 μm) の円周方向 BH 特性を示す。円周方向保磁力が約 0.8 Oe であり, $t_a = 3$ sec. で急熱・急冷の熱処理したワイヤと比較して小さく, 同じ熱処理温度においても熱処理時間の違いにより保磁力の大きさが異なることがわかった。これは, 熱処理時間が数秒と速いため, 加熱時の原子配置が安定状態に達せず, 応力緩和が不十分なためと考えられ, 熱処理温度 350°C で $t_a = 3$ sec. と速い速度で熱処理することにより円周方向保磁力の高いワイヤが得られたと考えられる。

3. 高感度 MI 特性

3 kg / mm² 張力下 350 °C · 3 s アニールを施したアモルファスワイヤ ((Co_{0.91}Fe_{0.06})_{72.5}Si_{12.5}B₁₅, 線径 30 μm, 試料長 3 mm) の正弦波交流に対する MI 効果を Fig. 3 の回路を用いて測定した。Fig. 4 に励磁電流振幅 $I_w = 5$ mA 時の外部磁界をパラメータとした場合のワイヤ間電圧振幅 E_w の励磁周波数特性を示す。外部磁界無印加 ($H_{ex} = 0$) 時において, 励磁周波数 $f = 3$ MHz まで E_w は殆ど変化せず, その後周波数が大きくなるにつれ増加し, $f \geq 7$ MHz で跳躍的に増加する。 $H_{ex} = 0$ では $f > 3$ MHz で表皮効果が生じると考えられる。励磁周波数 $f \leq 3$ MHz の場合, 磁界無印加時ではほぼ $E_w = I_w \cdot R_k$ (R_k : ワイヤ直流抵抗) であったワイヤ間電圧は, 外部磁界 $H_{ex} = 1$ Oe の印加により大幅 ($f = 1$ MHz で約 3 倍) に増加する。これは, 外部磁界無印加時では表皮効果が生じていないためほぼ直流抵抗に近いワイヤインピーダンスが, 外部磁界の印加により表皮効果を生じたため, インピーダンスが急増したものと考えられる。 $H_{ex} = 5$ Oe では, $f \leq 1$ MHz でインピーダンスは $H_{ex} = 0$ 時の場合に一致

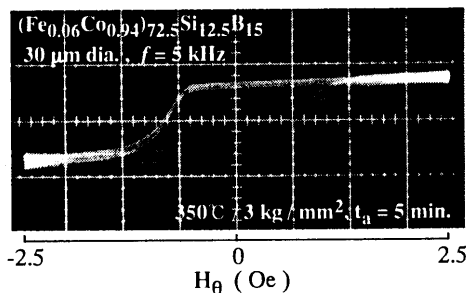


Fig. 2 Circumferential BH characteristics in an amorphous wire with annealing temperature of 350°C ($t_a = 5$ min.)

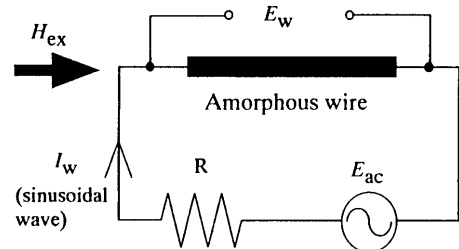


Fig. 3 Measurement circuit for E_w .

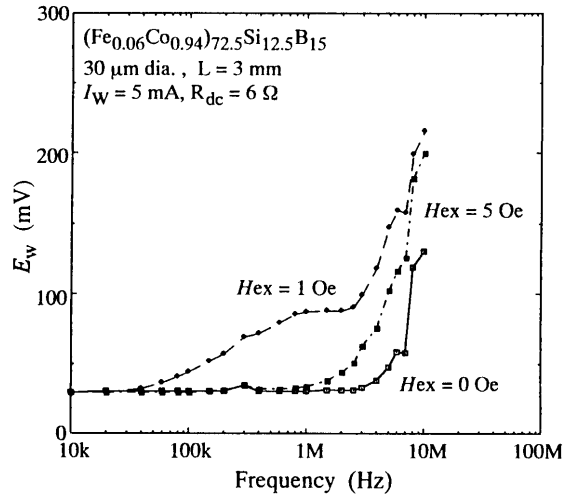


Fig. 4 E_w vs. f characteristics with parameter H_{ex} .

する。

Fig. 5 に $f = 3$ MHz 時の MI 特性を示す (①)。比較のため 3 kg / mm² 張力下 520 °C アニールワイヤの MI 特性を示す (②)。 $|H_{ex}| \leq 0.5$ Oe の範囲では, 殆ど E_w が変化しない不感域が見られる。さらに大きな磁界を印加することで E_w は急激に増加し, $H_{ex} = 1.75$ Oe でピークとなる。これは 520 °C アニールワイヤが, 外部磁界印加によって E_w がほぼ減少する MI 特性であるのに対して逆の特性(相補特性)を示す。(1)式で MI Ratio $\eta_{(H_{ex})}$ を定義すると, ① $\eta_{(H_{ex}=1)} = 205\% / \text{Oe}$, ② $\eta_{(H_{ex}=1)} = -$

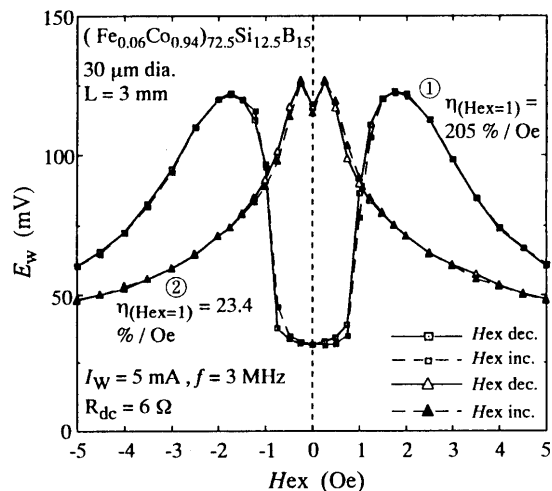


Fig. 5 MI characteristics in amorphous wires with annealing temperature of 350°C in ① and 520°C in ②.

23.4 % / Oe であり、円周方向高保磁力ワイヤが高感度の MI 特性を示す。また $H_{ex} = 0.75 \sim 1.25$ Oe でのインピーダンス変化率は 377 % / Oe と超高感度の MI 特性を示している。

MI Ratio

$$\eta_{(H_{ex}=1)} = \frac{E_{(H_{ex}=1)} - E_{(H_{ex}=0)}}{E_{(H_{ex}=0)}} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

4. MI 効果の発生機構

Fig. 6 に円周方向 BH ループの外部磁界依存性を示す。ワイヤ通電電流を $I_w = 5$ mA ($f = 10$ kHz) とした場合、ワイヤ表面周回磁界 $H_0 (= I_w / 2\pi a)$ は約 0.67 Oe となり、円周方向保磁力 H_c に比べ小さく、そのため外部磁界無印加の時ではワイヤの磁束変化はほぼ零の状態であり、円周方向最大微分透磁率 μ_0 は非常に小さい。この時、表皮深さ $\delta = (2\rho / \omega\mu_0)^{1/2} > a$ となり表皮効果は生じていないと考えられ、ワイヤインピーダンス $Z = \frac{1}{2} R_{dc} k a J_0(ka) / J_1(ka), (k = (1-j) / \delta)$ はほぼ R_{dc} で MI 効果は生じない状態と考えられる。外部磁界 H_{ex} がワイヤ長さ方向、すなわちワイヤ円周方向 180° 磁壁に垂直に印加されると、磁壁内の異方性エネルギーが減少して磁壁エネルギー密度 $\gamma \propto \sqrt{AK}$ が減少し、磁壁の面積を S とし、変位座標を x とすると、保磁力 $H_c \propto |(\partial \gamma S / \partial x)|_{max}$ が減少する。この保磁力の減少により Fig. 6 のように BH ループは変化し、 μ_0 が急増することで表皮効果が生じ、(2) 式で表されるワイヤインピーダンスは急激に増加する。またさらに外部磁界を印加すると μ_0 は減少し、そのためインピーダンスが減少する。

$$|Z| = (a / 2\sqrt{\rho}) R_{dc} \sqrt{\omega\mu_0(H_{ex})} \quad (\delta \ll a) \quad (2)$$

5. 直流重畳正弦波交流励磁による MI 効果

Fig. 7 の回路を用いて、直流電流を重畳した場合の正弦波交流 ($i_w(t) = I_w(a + \sin \omega t)$, $I_w = 5$ mA, $a = 0, 1$) 励磁 MI 効果を測定した。Fig. 8 に励磁周波数 $f = 3$ MHz とした場合の MI 特

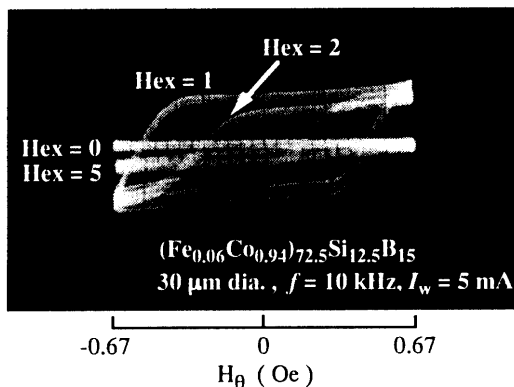


Fig. 6 Circumferential BH characteristics in an amorphous wire with parameter H_{ex} .

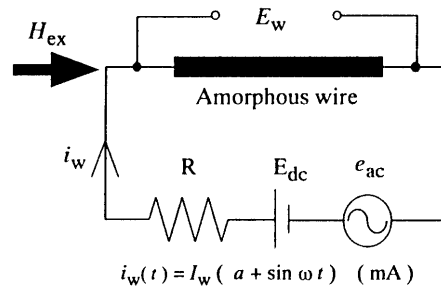


Fig. 7 Measurement circuit for E_w .

性を示す。直流電流無重畳の場合 ($a = 0$), 200 % / Oe を超えるインピーダンス変化率を示しているが、直流電流を重畳させた場合 ($a = 1$), $|H_{ex}| \leq 1$ Oe の範囲で殆ど E_w は変化せず、最大勾配域でも 40 % / Oe 程度のインピーダンス変化率しか示さなかった。直流重畳正弦波交流による励磁の場合、直流磁界成分によってワイヤの磁区構造は単磁区構造であり、磁壁の存在しない状態となり、 μ_0 は磁化回転によって変化する。この時、ワイヤの H_c は約 3 Oe と大きいため、磁化回転は容易でなくインピーダンスの変化は小さくなると考えられる。Fig. 9 に励磁周波数 $f = 10$ MHz の場合の MI 特性を示す。励磁周波数が比較的高周波であるので、外部磁界無印加時でも既に表皮効果を生じていると考えられ、 $H_{ex} = 0$ でワイヤ間電圧は約 0.12 V と大きな値を示す。この場合 μ_0 は磁化回転によって変化すると思われるため、直流電流無重畳時 ($a = 0$) でもインピーダンス変化率は $\eta_{(H_{ex}=1)} = 75.6$ % / Oe と低周波励磁の場合と比較して小さい。また直流電流を重畳した場合、インピーダンス変化率は $\eta_{(H_{ex}=1)} = 98.1$ % / Oe ($a = 0.5$), $\eta_{(H_{ex}=1)} = 69.7$ % / Oe ($a = 1$) であった。

6. 張力インピーダンス特性

3 kg / mm^2 張力下 350 °C 熱処理加工 ($t_h = 3$ sec.) された円周方向に高い保磁力を有するアモルファスワイヤは、正の磁歪を有していると考えられ⁴⁾、応力に対してワイヤインピーダンスは敏感に反応すると考えられる。そこで Fig. 10 のような回

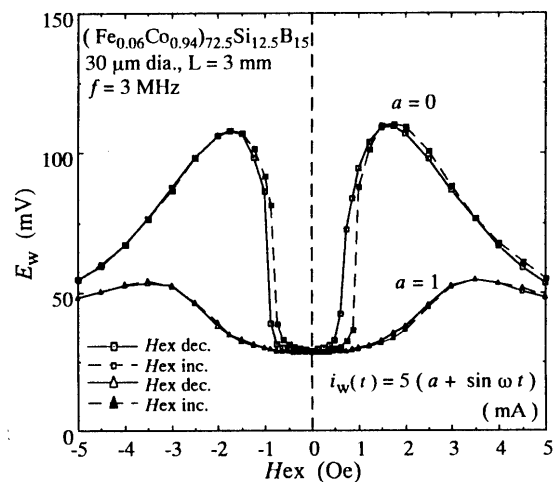


Fig. 8 MI characteristics in an amorphous wire magnetized with an asymmetrical current ($f = 3$ MHz).

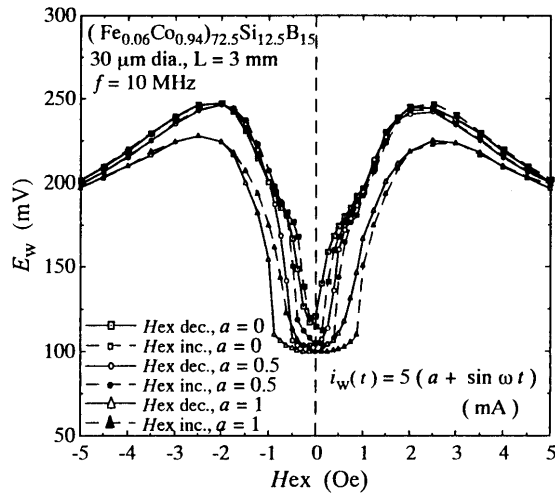


Fig. 9 MI characteristics in an amorphous wire magnetized with an asymmetrical current ($f = 10$ MHz).

路構成を用いて、ワイヤ他端に荷重 W (g) によってワイヤに張力 α を印加した場合のワイヤ間電圧振幅 E_w を測定した。Fig. 11 に励磁周波数 $f = 3$ MHz, $I_w = 5$ mA, 試料長 $L = 20$ mm とした時の測定結果を示す。 $\alpha = 100$ MPa 程度まで電圧は殆ど変化せず、 $\alpha = 100$ MPa 以上の張力印加によって E_w は増加し、特に $\alpha = 250 \sim 400$ MPa 間で急激に変化する。この間のゲージ率 G ($=$ 電圧変化率/伸び率) は最大で約 1800 であり、半導体歪みゲージの約 150~200 と比較して、約 10 倍の感度の高い特性が得られた。また同図に示した MI 特性と非常に似た特性を示しており、MI 特性と同様の機構 ($\mu_0 - \sigma$ 特性) によって $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ アモルファスワイヤの場合⁵⁾ と同様の感度の高いインピーダンス変化 (SI 効果) を示していると考えられる。

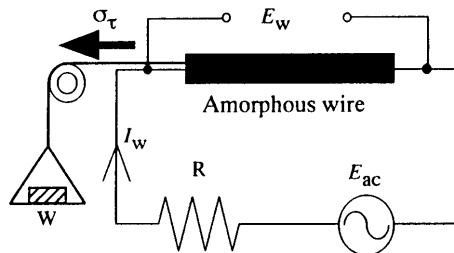


Fig. 10 Measurement circuit for E_w .

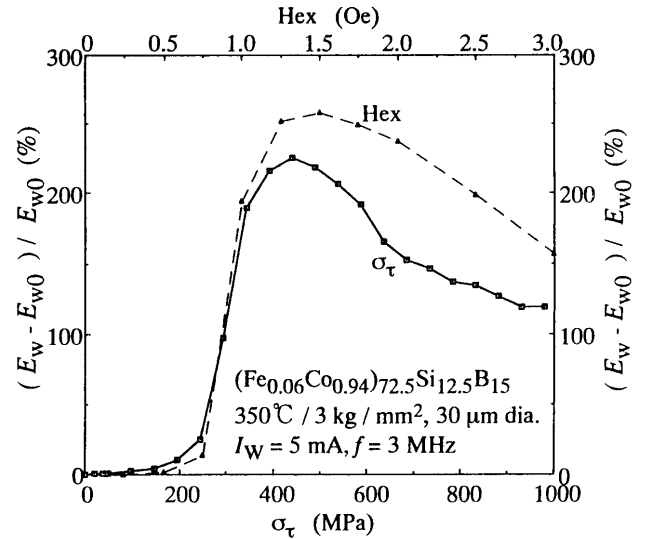


Fig. 11 Tension-impedance and MI characteristics in amorphous wire with annealing temperature of 350°C.

7. まとめ

3 kg / mm²張力下 350 °Cアニール ($\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ アモルファスワイヤ (線径 30 μm , 熱処理時間 $t_a = 3$ sec.) の円周方向保磁力は約 1.5 Oe と大きく、正弦波交流励磁によって最大勾配域で 300 % / Oe 以上の超高感度 MI 特性を示すことがわかった。これは外部磁界無印加時には μ_0 が小さく表皮効果を生じていない状態であるが、外部磁界印加により円周方向保磁力が減少することで μ_0 は急激に増加し、表皮効果を生じることでインピーダンスが急増するためと考えられる。しかし直流重畳正弦波励磁の場合には、ワイヤは単磁区構造となり、異方性磁界が大きいことからインピーダンス変化率は数十 % / Oe の値しか示さなかった。また張力印加によって高感度の応力インピーダンス効果を示し、そのゲージ率は約 1800 であった。

文 献

- 1) 毛利 佳年雄: 電気学会論文誌, 116-E, Vol.1, 7-10 (1996).
- 2) 菅野 崇樹, 毛利 佳年雄: 日本応用磁気学会誌, 21, 645-648 (1997).
- 3) N. Kawajiri, M. Nakabayasi, C. M. Cai, K. Mohri, and T. Uchiyama: *IEEE Trans. Magn.*, **35**, 3667-3669 (1999).
- 4) 川島 克裕, 小笠原 勇, 毛利 佳年雄: 日本応用磁気学会誌, 19, 490 (1995).
- 5) L. P. Shen, T. Uchiyama, K. Mohri, E. Kita, and K. Bushida: *IEEE Trans. Magn.*, **33**, 3355-3357 (1997).