日本応用磁気学会誌 23, 1457-1460 (1999)

# エッチングアモルファスワイヤのMI効果

Magneto-Impedance Effect in Etched Amorphous Wires

吉永 輝政・毛利 佳年雄・ ユニチカ(株)中央研究所,京都府宇治市宇治小桜23番地(電611-0021) \*名古屋大学工学研究科,名古屋市千種区不老町(電464-8603) T. Yoshinaga and K. Mohri\*

R&D Center, Unitika Ltd., 23 Ujikozakura, Uji, Kyoto 611-0021 \*Graduate School of Engng., Nagoya Univ., Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603 (1998 年 10 月 15 日受理, 1999 年 1 月 21 日採録)

The magneto-impedance (MI) characteristics of etched zero-amorphous wires with a diameter of 4.5-16  $\mu$ m are investigated in comparision with those of amorphous wires with a diameter of 30  $\mu$ m. The MI ratio decreased with decreasing diameter, while the magnetizing frequency at each maximum MI ratio and the starting frequency for the skin effect increased. The BH characteristics of the wires changed markedly with decreasing diameter owing to the increase in magnetic anisotropy along the wire axis, and a large Barkhausen flux jump was observed in thinner wires with a diameter of less than 10  $\mu$ m. An MI sensor with a C-MOS multivibrator was constructed, containing a pair of micro-sized MI heads 0.7 mm in length.

Key words : etched amorphous wire, etching, MI effect, skin effect

## 1. はじめに

磁気ーインピーダンス(MI)効果は、高透磁率磁性体に 高周波電流を通電して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よって敏感に変 化する電磁気現象をいう.<sup>1)</sup>そのMI効果は零磁歪アモ 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 磁界が生じないので、アモルファスワイヤの長さを1 mm 程度に短くしてもMI効果の感度が劣化しないため、高 感度の微小寸法のヘッド材として用いられている。また 高周波励磁磁気変調動作により, M I 効果の応答は数百 kHz以上が容易に実現される. さらにC-MOS ICマルチバ イブレータのパルス励磁方式のMI磁界センサは、消費 電力が10 mWと非常に小さく<sup>2)</sup>,携帯型センサや多数個 配列センサシステムの構成に適している。このような特 徴のため, 高感度, 高速応答及び低消費電力のマイクロ 磁気センサを構成できることが知られている。現在の磁 気センサのヘッド材としては、直径が30~50 μm、長さ 1~2 mmの線引き後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.3)

しかし一方で, MI素子をより微小域の磁気検出に適 用する要求が強まり, その為ワイヤ形状の微細化が必要 とされている.ワイヤ形状の微細化としては, テーラー 法によるガラス被覆アモルファスワイヤが知られており,

日本応用磁気学会誌 Vol. 23, No. 4-2, 1999

直径が数μmのワイヤが容易に作製されている.<sup>4)</sup>しか し、ガラス被覆の除去や、ガラスとの熱膨張の差による 応力の発生などの問題点があり、デバイス応用が困難で ある.また従来の線引き加工による微細化では約10μm 径以下のワイヤに加工することは困難であり、またその 後ワイヤを張力アニールする事は非常に困難であると言 える.

そこで本稿では、アモルファスワイヤにエッチング微細加工を施すことにより、十数μmから数μm径のワイ ヤを作成し、そのMI効果を測定した.さらにBHヒステ リシス特性を測定し、10μm径以下では、アモルファス ワイヤの軸方向の強い磁気異方性のため大バルクハウゼ ン効果が発生することを見いだした.またエッチングア モルファスワイヤの微小寸法磁気センサヘッドへの応用 として、C-MOS ICによるセンサ回路の構成と磁界検出 特性について検討を行ったので報告する.

#### 2. エッチング及び実験回路

10%希硝酸溶液 (室温) に直径が30  $\mu$ mの零磁歪アモ ルファスワイヤ (FeCoSiB,  $\lambda = -0.7 \times 10^{-6}$ ,  $3 \text{kg/mm}^2$ 張力下 520℃アニール) 及び負磁歪アモルファスワイヤ (CoSiB,  $\lambda = -3 \times 10^{-6}$ ,  $2 \text{kg/mm}^2$  張力下475℃アニー ル) を浸し, エッチングすることでFig. 1のような表面 が平滑で一様な種々の線径のワイヤの微細化を行った. またその加工方法によっては, 先端部が約1  $\mu$ m径の円錐 形のワイヤをも得ることができた.

本実験では, Fig. 2の回路を用い, エッチング前の30 µm径及びエッチング後の種々の線径(16, 11, 7, 6, 4.5 µm)のワイヤの基礎特性を調べるために正弦波交流を通 電した場合のMI効果の測定を行った.

#### 3. 実験結果

Fig. 3にFig. 2の回路で,直流外部磁界Hex= 5 Oeを ワイヤに印加した時の励磁周波数に対するワイヤ間電圧 Ewの減少率を示す.ワイヤ表面周回磁界 $H_a$  (=  $I/2\pi a$ , I: ワイヤ通電電流, a: ワイヤ半径) = 2 Oeとし,ワイヤ長は何れも1 mmとした.

Table 1に零磁歪アモルファスワイヤをエッチングした場合の各線径の電圧減少率⊿Ew/Ew,表皮効果が生じ



Fig. 1 Etched amorphous wires using diluted  $HNO_3$ .



Fig. 2 Measuring circuit for Ew.



Fig. 3  $\triangle Ew/Ew$  (%) vs. *f* characteristics for various wire diameters.

始める周波数  $f_0$  及び1 Oe当たりの最大電圧変化率示す. エッチングによりワイヤが微細化されることで,減少率 は徐々に減少しており、30  $\mu$ m径で約50%であった減少 率は、4.5  $\mu$ m径では4%程度となっている.一方、 $f_0$ は徐々 に増加している.また1 Oe当たりの電圧変化率はワイヤ 径とともに減少している.

また負磁歪アモルファスワイヤでは、Fig. 3より16μ m径の電圧減少率が約1%程度と非常に小さい.これは

Table	1	Measurement	results for	etched	amor-
phous	wire	s.			

2a (µm)	f <sub>0</sub> (kHz)	⊿ <i>E</i> w/ <i>E</i> w (%)	(⊿Ew/Ew <sub>0</sub> )/Hex max
30	150	47	22.4%/Oe
16	400	30	16.0%/Oe
11	600	18	11.0%/Oe
7	700	9	3.1%/Oe
6	900	7	4.2%/Oe
4.5	1500	4	1.5%/Oe

零磁歪アモルファスワイヤに比べ円周方向の異方性磁界 が大きいためと考えられる.また線径が小さくなること で受ける素子の半田付け時の不規則な応力磁気効果の影 響は,負磁歪ワイヤの方が大きいと思われる.

#### 4. エッチングワイヤの磁気特性

エッチング後の零磁歪アモルファスワイヤの円周方向 最大微分透磁率 µ。は表皮効果による表皮深さ ∂より求 めることができる.

$$\delta = \sqrt{2 \rho / \omega \mu_{\theta}} \quad [m] \quad . \tag{1}$$

ここで $\rho$  は電気抵抗率, $\omega$ は角周波数である.表皮効 果が生じ始める時,表皮深さとワイヤ半径はほぼ等しい とすることができる( $\delta \Rightarrow a$ )から,上式は

$$f_0 = \rho / \pi \mu_{\theta} a^2$$
 [Hz] . (2)

となる. これより求めた各ワイヤ径での  $\mu_o$ の値を, Table 2に示す. エッチングによりワイヤ径が小さくなる につれ  $\mu_o$ は増加しており, 30  $\mu$ m径で約10000だった  $\mu_o$ の値は4.5  $\mu$ m径では5 倍程度まで増加している. これ は細線化により,ワイヤの円周方向異方性エネルギーが 増加するため,磁化容易方向がワイヤ長さ方向に傾斜し, 円周方向に対して磁化ベクトルの回転効率が増大してい くためと考えられる.

Table 2 Calculation results for  $\mu_{\theta}$ .

2a (µm)	$\mu_{\theta}$
30	9800
16	12900
11	18160
7	38440
6	38110
4.5	49840

Fig. 4 (a)~(d)に線径30 µm径 (エッチング前) および エッチングにより微細化した15 µm径, 10 µm径, 5 µm 径試料の長手方向 BHヒステリシスループ(150Hz励振) を示す. この試料はλ=-0.7×10<sup>-6</sup>と僅かに負磁歪であ り、円周方向に分布している隣接するスピン間に蓄えら れるエネルギーは、隣接スピン同士のなす角度が大きい 内心部ほど大きくなるので, 30 µm径ワイヤでは外殻部で 円周方向に、内心部でワイヤ軸方向に容易軸を持つ2重 層構造となっていると考えられる. 5この内心部の存在は Fig. 4(a)のようにワイヤ長さ方向のBH特性にヒステリ シスが内心部の磁壁移動により現れていることから推定 される. そこでエッチングにより外殻部を除去していく と、同図(b)のように内心部によるワイヤ長さ方向の磁壁 移動による磁束変化が主となっていき、同図(c)では内心 部の180度磁壁移動による急峻な磁束変化が主となること がわかる.このBH特性から内心部の直径は約10 µmと推 定される. さらにエッチングにより線径を減少させてい くと,形状異方性エネルギーが増大していき,磁壁エネ ルギー密度 $\gamma \propto \sqrt{AK}$  (A:交換定数)が増大するため, ワイヤ長さ方向に磁壁が伝搬するため大バルクハウゼン 効果が生じていると考えられる.

#### 5.磁気センサヘッドへの応用

MIマイクロ磁気センサのヘッドに30 μm径のワイヤ を用いた場合,ワイヤのインピーダンスを電子回路と整 合するために,ワイヤの寸法は1~2 mm必要であり,短 ヘッド化は困難であった.そこでエッチングワイヤによ り,短ヘッドMI磁気センサの構成を試みた.センサ回 路はC-MOS ICによるパルス駆動方式を用いた.<sup>2)</sup> Fig.



Fig. 4 Longitudinal BH loops in wires with diameters  $30 \,\mu$ m,  $15 \,\mu$ m,  $10 \,\mu$ m, and  $5 \,\mu$ m.

5はパルス電流通電回路である. C-MOSインバータQ1, Q2と抵抗, コンデンサによるマルチバイブレータ出力方 形波を微分することより鋭いパルス電流とし、インバー タQ3で電流を増幅した後、ワイヤに通電する.得られた ワイヤ電圧はショットキーバリアダイオードSBDで整流 された後、ピークホールド回路で検波され、出力電圧 Eoutとして得られる. ヘッド材として線径16 µm, 長さ 0.5 mmのワイヤを用いた. Fig. 6はFig. 5の回路による パルスの電流 Ip をパラメータとしたときのMI特性であ る. Fig. 6よりパルスの高さを 8 mA~16 mAの間で変化 させた場合では,特性に大きな変化は見られず電圧変化 の傾きもほぼ同じであった. Fig. 7は同様の回路におい て外部磁界として60Hz正弦波を印加した場合のMI特性 である. 30μm径の場合と比較して感度は減少している が,若干ヒステリシスの小さい特性が得られている.次 にFig. 8の回路を用いて、リニアな特性を有する磁気セ ンサ回路について検討を行った.回路はC-MOSインバー タによるパルス電流励磁とし、二つのヘッドを用いて差 動型のセンサ構成としている. これは差動型とすること でコモンモードノイズの除去、電源電圧の変動やC-MOS 等の温度変動の影響を低減することができるためである.



IC: 74AC04 R1: 5.1 k $\Omega$  RD: 200  $\Omega$  CD: 100 pF C1: 100 pF R: 1  $\Omega$  CH: 1000 pF RH: 510 k $\Omega$  R11: 100  $\Omega$  SBD: 1SS97 Amorphous wire:FeCoSiB.16  $\mu$ m dia., L = 0.5 mm

Fig. 5 Magnetic-field sensor circuit.









ワイヤ電圧はそれぞれOP1, OP2で10倍増幅されるが, こ の時VR1, VR2でそれぞれ零点調整され, その後アンプ で再び10倍に増幅される. ヘッドには線径16 µm, 長さ 0.7 mmのワイヤを用い, バイアス磁界(約0.2 Oe)印加 用コイル及び負帰還磁界印加用コイルが巻いてある. Fig. 9は60Hz正弦波を外部磁界として印加した場合の磁界検出 特性である. Hex=±0.5 Oeの範囲でほぼリニアな特性を 得られた. これより, エッチングにより微細加工を施し たアモルファスワイヤを用いて, リニアな特性を有する マイクロ磁気センサを構成することができた. またその ヘッド寸法はワイヤ長を0.7 mmとしても従来の30 µm径 の場合とほぼ同等のインピーダンス値とすることができ, 従来の回路構成を容易に使用することが可能である.





Fig. 8 Magnetic-field sensor circuit using two amorphous wires with feedback.



 $16 \ \mu m \ dia., L = 0.7 \ mm$ 

Fig. 9 Hex vs. Eout characteristics.

またセンサ素子として先端部が長さ方向に容易軸を持つ円錐形に微細加工したニードル型ワイヤを用いることで、集磁効果を持つ傾斜機能型MIセンサの構成が考えられ、より微小領域の機能が磁界検出の期待できる.

# 6. おわりに

(1)エッチングにより表面が平滑で一様なワイヤ(16~
4.5 μm径)を得ることができ、また傾斜エッチングにより先端部が円錐形のワイヤを得た。

(2)30 μmから4.5 μm径までの種々の線径のワイヤにお いてMI効果を測定し考察した.

(3)線径30  $\mu$ mのアモルファスワイヤ ( $\lambda$ =-0.7×10<sup>-6</sup>) をエッチングし,長さ方向BH特性を測定した結果,10  $\mu$ m径程度で急峻な磁束変化を示し,5  $\mu$ m径では大バルク ハウゼン効果が発生することが分かった.

(4)パルス電流通電によるMI効果はパルス電流を変化 させてもMI特性の変化は小さい.

(5)エッチングアモルファスワイヤを用いて長さ0.7 mm の微小寸法のヘッドからなるリニアな特性を有するマイ クロ磁気センサを得た.

### 文 献

1)毛利佳年雄:電気学会論文誌, 116-E, Vol. 1, 7·10 (1996) 2)管野 崇樹,毛利佳年雄:日本応用磁気学会誌, 21, 645 -648(1997)

3)武士田健一,野田 充宏,パニナ ラリサ,吉田 史,
内山 剛,毛利佳年雄:日本応用磁気学会誌,18,493-499
(1994)

4)P.T.Squire: 17th Conf. on Prof. and Appl. of Magnetic Materials, (1998)

5)山崎二郎:日本応用磁気学会誌, 16, 14-22 (1992)