

# MEMS マルチコアヘッドによる高感度 磁気インピーダンスセンサ

内山 剛、濱田典彦\*、蔡 長梅\*  
(名古屋大学、\*愛知製鋼 (株))

Highly Sensitive Magneto-Impedance Sensor Using MEMS Multi-core Head

T. Uchiyama N. Hamada\*, C. M. Cai\*  
(Nagoya Univ. , \*Aichi steel Corp.)

**はじめに** これまでに、CMOSIC を利用した、パルス通電による磁化回転を利用した磁気インピーダンス (MI) センサにより、ピコテスラオーダーの磁界検出分解能が実現されている<sup>[1]</sup>。また、我々は、磁気インピーダンスセンサのヘッドをマルチコア化することにより、ノイズフロアが低減することを報告している<sup>[2]</sup>。本研究では、集積型高感度 MI センサへの利用を目的として、フォトリソグラフィとメッキプロセスにより作製した MEMS マルチコアヘッドによる高感度磁気インピーダンスセンサを試作し、その特性を評価した。

## 実験結果

図 1 は、本研究で使用した、MEMS ヘッドを示す。4 本のアモルファスワイヤ (直径 13  $\mu\text{m}$ 、長さ 1 mm) に、合計 250 ターンのコイルで構成されている。長手方向の BH 曲線から推定される、ワイヤ表層部分の異方性磁界 ( $H_k$ ) は、フォトリソグラフィとメッキプロセスによりヘッドを作製する前は、約 100  $\mu\text{T}$  であった。しかし、プロセス時の熱応力の影響により、ヘッド作製後の  $H_k$  は、約 1000  $\mu\text{T}$  まで増加した。

MEMS ヘッドを CMOSIC による磁気インピーダンスセンサ回路に組み込むことにより、磁界センサを試作した。試作した回路の信号処理部分は、パルス発生回路および CMOS インバーターによるパルス通電回路、コイル起電力を検波するスイッチ回路から構成されている<sup>[1]</sup>。磁界センサのノイズスペクトルの測定結果を図 2 に示す。

[1] T. Uchiyama, K. Mohri, Y. Honkura, L.V. Panina, *IEEE Trans. Magn.* vol. 48, no.10, pp. 3833-3889, 2012.

[2] T. Uchiyama, N. Hamada, and C.M. Cai, ICST'13, 2013 Seventh International Conference on, 3-5, December, Wellington, pp. 573-577, 2013.

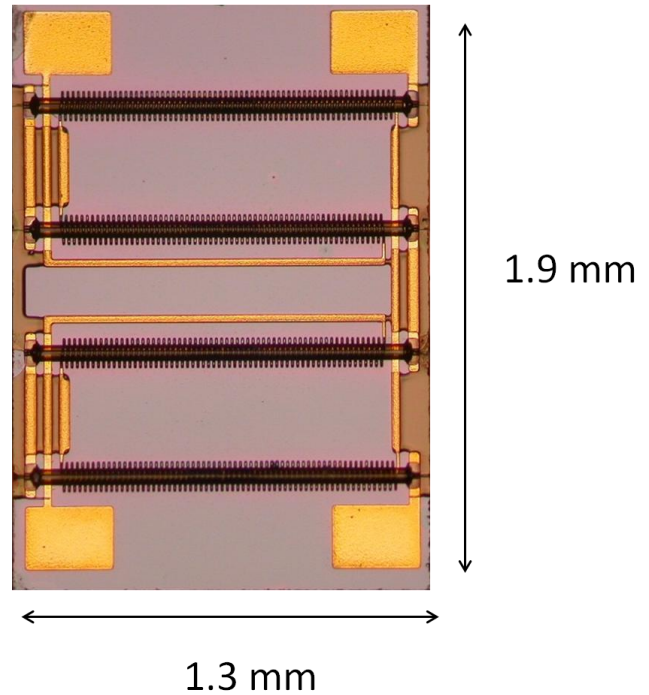


Fig.1 Prototype MEMS multi-core head, which is used in this experiment. The miniature head includes four amorphous wires with 1mm length each and pick-up coils.

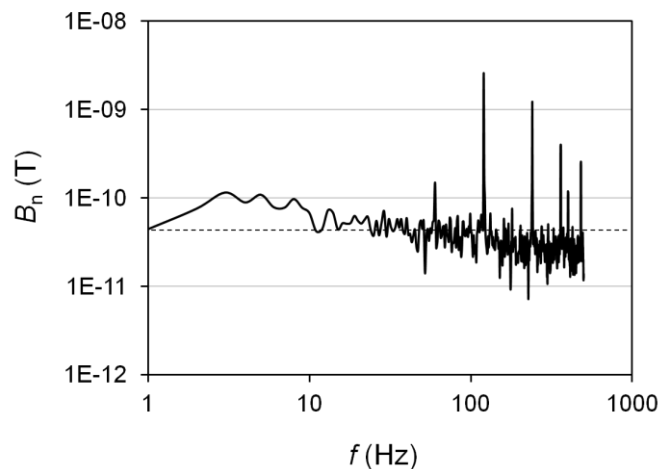


Fig.2 Noise spectral density for the miniature multi-core head MI sensor in a shield box. The noise floor for the relatively high frequency range denoted by the dashed lin, is around 70pT/Hz<sup>1/2</sup>.

# 高周波キャリア型薄膜磁界センサ素子の 低周波領域における感度増加に関する検討

鎌田 信吾, 菊池 弘昭, 中居 倫夫, 栢 修一郎, 石山 和志  
(岩手大学, 宮城県産業技術総合センター, 東北大学)

## Enhancement of sensitivity in low frequency region on High-Frequency Carrier-Type Thin-film Magnetic Field Sensor

S. Kamata, H. Kikuchi, T. Nakai, S. Hashi and K. Ishiyama  
(Iwate Univ, ITIM, Tohoku Univ.)

### 1. はじめに

高周波キャリア型磁界センサはMI素子とも呼ばれ、高感度磁気センサに用いられている。この素子を膜厚数 $\mu\text{m}$ 程度までの薄膜により実現する場合、一般に動作周波数は100 MHz以上の高周波となる。駆動・検出回路との整合性を考慮した場合、数10 MHzで動作することが望ましい。そこで、ここでは高周波キャリア型薄膜素子の周波数特性において数10 MHz付近で見られるインピーダンスの特異な変化について調査し、比較的低い周波数で動作する高感度な高周波キャリア型薄膜素子の可能性について検討した。

### 2. 実験方法

素子には $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$ アモルファス薄膜を用い、フォトリソグラフィとスパッタリングにより成膜・加工した。作製素子の形状は幅20, 40, 80  $\mu\text{m}$ , 長さ3 mm, 厚さ約2  $\mu\text{m}$ とした。素子の幅方向が磁化容易軸となるように磁界中熱処理により一軸異方性を付与した。インピーダンスの測定部位は反磁界の影響の少ない素子中央部の1 mmを用いた。インピーダンスの測定にはネットワークアナライザを用い、入力電力は-10 dBmとした。測定時にはヘルムホルツコイルにより素子長手方向に磁界を印加しながら行った。

### 3. 実験結果

Fig. 1には幅20  $\mu\text{m}$ の素子におけるインピーダンスの周波数特性を示した。ヘルムホルツに印加する電流は0~1000 mAと変化させた。磁界印加時には高周波側でインピーダンスが増加しており、これらの変化はよく知られたものである。一方、ヘルムホルツコイルに300 mAの電流を印加した場合、20~30 MHz付近においてインピーダンスのピークが見られた。このピークは幅20, 40  $\mu\text{m}$ の素子で観測されたが80  $\mu\text{m}$ の素子では見られなかった。Fig. 2に幅20  $\mu\text{m}$ の素子におけるインピーダンスの外部磁界依存性を示した。周波数は20, 100 MHzとした。一般に低周波領域においてはインダクタンスの変化は大きい、インピーダンスの変化には抵抗分の寄与が大きいためインピーダンスとしては20 MHz程度の低周波では変化がみられない。また、表皮効果が顕著になって変化した場合でも、その後周波数の増加とともに変化量は増大するのが一般的である。しかし、ここでは300 mAをコイルに印加した時にインピーダンスが100 MHz程度で低下した。Fig. 2より100 MHzと比較して20 MHzではインピーダンスの変化量としては小さいが、感度 $dZ/dH$ はそれぞれ14.1, 16.1  $\Omega/\text{Oe}$ と大きな変化はなかった。このことから、この周波数領域を利用した高感度センサ素子の開発が期待される。

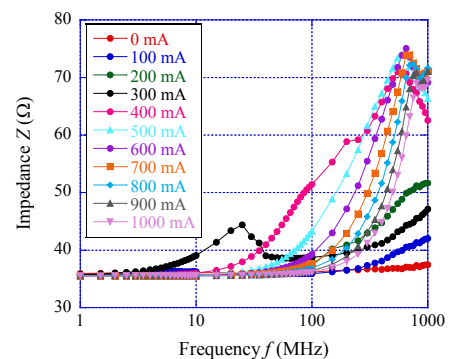


Fig. 1 Frequency characteristics for middle position of 20  $\mu\text{m}$  wide elements.

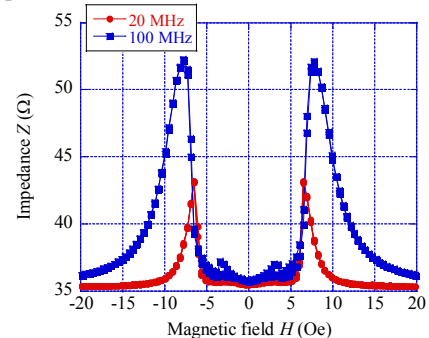


Fig. 2 Field dependence of impedance  $Z$  for 20  $\mu\text{m}$  wide elements at 20 MHz and 100 MHz.

# 張力印加したアモルファス磁性コアを用いた フラックスゲート磁気センサ

宮田大史、山本竜馬\*、森本祐治\*、竹澤昌晃\*  
(株エムティアイ、\*九州工業大学)

Flux gate sensor using amorphous magnetic core induced tensile stress

H. Miyata, R. Yamamoto\*, Y. Morimoto\*, M. Takezawa\*  
(MTI, \*Kyushu Institute of Tech.)

## はじめに

我々は、フラックスゲート磁気センサの感度が、そのコア材料の磁区構造に大きく影響を受けることを報告している<sup>1)</sup>。磁性体の磁区構造は、張力を印加することで変化することが知られており、本研究では、磁性コア材料のアモルファス薄帯に引っ張り応力を印加した場合の磁区構造と、センサ感度の変化を調べたので報告する。

## 実験方法

フラックスゲートセンサのコア材料として日立金属社製のアモルファス薄帯 2605SC を用いた。Fe 基の材料であり、組成は  $\text{Fe}_{81}\text{B}_{13.5}\text{Si}_{13.5}\text{C}_2$  で、飽和磁歪  $\lambda_s = 35 \times 10^{-6}$ 、飽和磁束密度  $B_s = 1.6 \text{ T}$  である。磁区観察には、縦 Kerr 効果顕微鏡を使用し、試料の一端を固定し、もう一端に重りを吊るして引っ張ることで 15 MPa の引っ張り応力を印加できるようにした。フラックスゲート磁気センサを構成する場合は、重りで薄帯に 15 MPa の張力を印加した状態で試料を樹脂で固定することで、張力印加磁性コアを得た。

## 実験結果と考察

Fig. 1 にセンサ感度の周波数依存性を示す。図中で丸は張力印加磁性コアを用いた場合、三角は張力を印加しない磁性コアを用いた場合の結果である。図より、張力印加によってセンサ感度が約 3 倍向上していることが分かる。Fig. 2 は残留磁化状態の磁区観察の結果であり、Fig. 2(a)に張力を印加する前、Fig. 2(b)に張力を印加した状態の磁区観察結果を示す。図中で上下方向が薄帯の長手方向であり、白色の磁区は磁化が上向き、黒色の磁区は磁化が下向きを示している。Fig. 2(a)の黒丸で囲んだ部分の磁区コントラストは薄く灰色であり、これは磁化が上下方向ではなく、斜め方向に傾いていることを意味している。一方、Fig. 2(b)の張力を印加した場合は、磁区コントラストが濃くなり、磁化が上下方向に揃ったストライプ状の磁区構造が観察された。このことより、張力印加方向に磁気異方性が誘導されていることが分かる。これは、逆磁歪効果によるものであり、張力印加によるセンサの感度向上は、励磁方向を磁化容易軸とできたことが原因だと考えられる。以上より、正の磁歪を有するアモルファス磁性コアに張力を印加することによる磁区構造制御は、フラックスゲート磁気センサの感度向上に有用であることが分かった。高い飽和磁束密度を有しながら、磁歪が大きいことで低感度、高ノイズである Fe 基アモルファス材料の磁区構造制御を行うことで、センサの小型化が期待される。

## 参考文献

- 1) H. Miyata, et al., J. Mag. Soc. Jpn., (2014), in press.

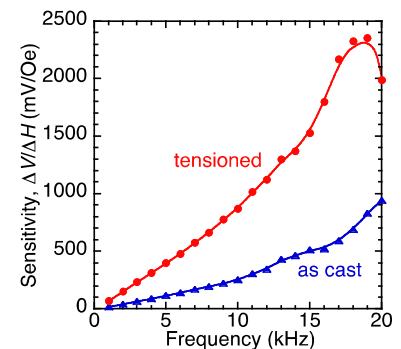


Fig.1 Magnetic field sensitivity of fluxgate sensor

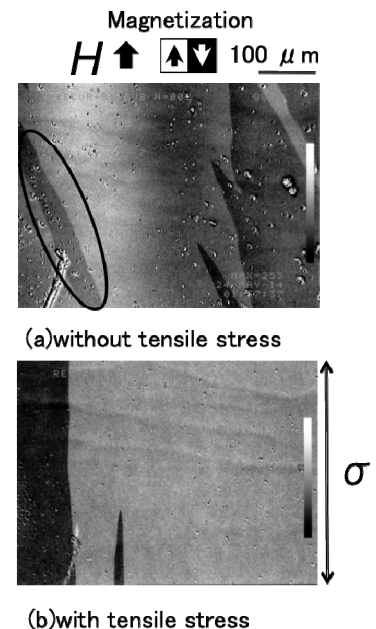


Fig.2 Magnetic domain structure

## SrTiO 薄膜を用いた伝送線路型薄膜磁界センサ素子の試作

川上敏弥, 植竹宏明, 藪上信, 小澤哲也  
(東北学院大学)

Development of thin film magnetic field sensor using SrTiO film

T. Kawakami H. Uetake S. Yabukami, T. Ozawa

(Tohoku Gakuin University)

**1. はじめに** 高い比誘電率を有する SrTiO 薄膜を用いたコプレーナ線路と CoNbZr 薄膜を組み合わせた薄膜磁界センサ<sup>1)</sup>を試作し, 常温で使用可能な薄膜磁界センサ素子の作成を行った。

**2. 実験方法** Fig.1 は試作したセンサ素子の構造を示したものである。本センサは誘電体薄膜の波長短縮効果を利用して磁界に対する大きな位相変化を得ることを意図したものである。センサ素子は, Cu 薄膜による直線コプレーナ線路, SrTiO 薄膜, アモルファス CoNbZr 薄膜から構成され, センサ素子はガラス基板の上にリフトオフプロセスにより積層した。CoNbZr 膜成膜は  $5 \mu\text{m}$  で, RF スパッタ装置を用いて圧力 20 mTorr、電力 RF200 W、成膜時間 8 時間で行う。熱処理は回転磁場中熱処理を用いて高真空中で、回転磁界  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  2 時間、静磁界  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  1 時間で行う。SrTiO 膜成膜はスパッタ装置を用いて膜厚は  $3 \mu\text{m}$  で圧力は 20 mTorr、電力 RF200 W、ヒータ部は  $160 \text{ }^\circ\text{C}$  で成膜する。伝送線路用レジスト形成は膜厚  $8 \mu\text{m}$ 、ベーキング  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  20 分、現像 2 分 30 秒行う。伝送線路形成はスパッタ装置を用いて、Cr  $0.2 \mu\text{m}$ 、Cu  $4 \mu\text{m}$  で、圧力 20 mTorr、電力 RF200 W で成膜する。異方性付加を回転磁場中熱処理炉を用いて、高真空中で回転磁界  $320 \text{ }^\circ\text{C}$  で 2 時間、静磁界  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  で 1 時間で行う。センサ素子をヘルムホルツコイルの中央に配置し、センサの電極にはウエハプローブを電氣的に接触させ、同軸ケーブルを介してネットワークアナライザと接続した。直流電源を用いてセンサ素子磁性薄膜の磁化困難軸方向へ直流磁界を加えて、静的に変化させた。ネットワークアナライザの透過係数 ( $S_{21}$ ) の振幅および位相差を磁界変化に応じて測定した。

**3. 実験結果** Fig.2 は位相変化感度のグラフである。1.5 GHz から 3.5 GHz までの周波数範囲で測定した。その中で Gain が  $-40 \text{ dB}$  以上で一番傾きの大きい周波数の感度をグラフより読み取った。心磁界の測定の際に必要な SN 比を得るため<sup>2)</sup> Gain を  $-40 \text{ dB}$  以上とした。2.0 GHz の時、 $128.6 \text{ deg/Oe}$  を記録し Gain は  $-40.0 \text{ dB}$  となった。Fig.2 より 2.0 GHz 付近で表皮効果と強磁性共鳴が顕著になったと考えられる。

**参考文献** 1) H. Uetake, S. Yabukami, T. Ozawa, N. Kobayashi, and K. I. Arai, “Highly sensitive thin film sensor using coplanar line”, *Journal of the Magnetism Society of Japan*, vol. 38, no. 2-2, pp. 83-86 (2014). 2) S. Yabukami, K. Kato, T. Ozawa, N. Kobayashi, K. I. Arai, “A coplanar line thin film sensor and measurement of MCG without magnetic shielding”, *Journal of the Magnetism Society of Japan*, vol. 38, no. 2-1, pp. 25-28 (2014).

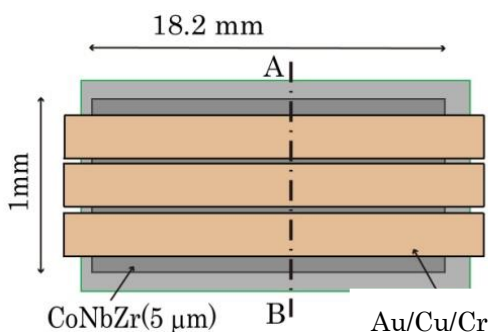


Fig. 1 Fabricated thin film sensor.

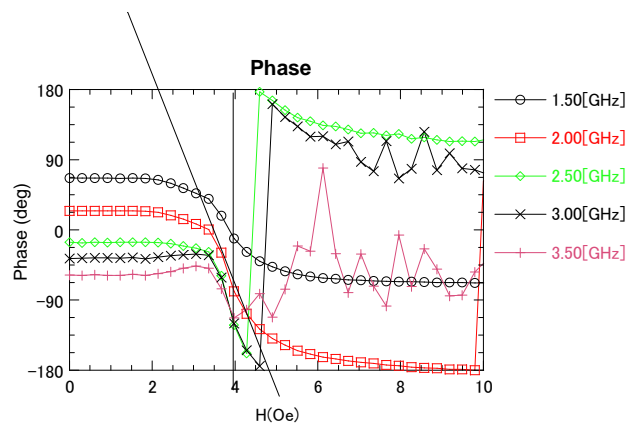


Fig. 2 Phase sensitivity.

## ワイドレンジ型 MI 素子の開発

下出晃広、濱田典彦、山本道治  
(愛知製鋼)

Development of wide range typed MI element

A. Shimode, N. Hamada, M. Yamamoto  
(Aichi Steel Corporation)

### はじめに

MI センサは、MI (Magneto-Impedance, 磁気インピーダンス) 効果を利用した小型で高感度な磁気センサであり、携帯電話等に搭載される電子コンパスとして実用化されている<sup>1)</sup>。電子コンパスは、地磁気(約 0.5G)を測定する磁気センサであり、主として、 $\pm 3 \sim \pm 12\text{G}$  程度の測定レンジのセンサが使用されている。最近では、スマートフォンやタブレット等の急速な普及や高機能化により、さらに小型、低消費電力で高感度・低ノイズ、且つ測定レンジが広い磁気センサが求められている。特に、外乱磁場環境が悪い環境での使用や、最終製品内でのアセンブリの自由度増加、低コスト化といった観点から、測定磁場レンジの拡大が強く要求されている。そこで、本研究では、測定磁場レンジに及ぼす素子長(ワイヤ長)の影響を調べた。

### 実験方法

回転液中紡糸法で作られた直径  $15\ \mu\text{m}$  のアモルファス磁性ワイヤをユニチカから購入した。MI 素子は、フォトリソ法とめっき法で作製した。ピックアップコイルのコイルピッチは、 $17\ \mu\text{m}$  で、素子長は  $0.3 \sim 0.6\text{mm}$  の 4 水準とした。試作した MI 素子は nT センサ用電子回路 (MI-CB-1DK)<sup>2)</sup> に接続し、その出力特性を測定した。出力特性において、出力の最大/最小を示す磁場を飽和磁場とした。尚、磁気センサとしての測定磁場レンジの目安は、おおよそ飽和磁場の 40%程度である。

### 結果

試作した MI 素子の出力特性を従来品 (AMI306) と比較して図 1 に、MI 素子の飽和磁場に及ぼす素子長の影響を図 2 に示す。図 1、2 に示されるように、素子長が短くなるにつれて、飽和磁場が増加する傾向にあった。これは、アモルファス磁性ワイヤの反磁界が増加したためであると思われる。また、 $0.3\text{mm}$  長の MI 素子の飽和磁場は約  $60\text{G}$  であり、従来 (AMI306, 飽和磁場約  $30\text{G}$ ) の約 2 倍となったことから、測定レンジも約 2 倍程度確保できると考えられる。

### 参考文献

- 1) A. Shimode et al: Abstract of International Workshop on Magnetic Wires, IWMW2010
- 2) N. Hamada et al: Abstract of International Magnetics Conference, Intermag 2011

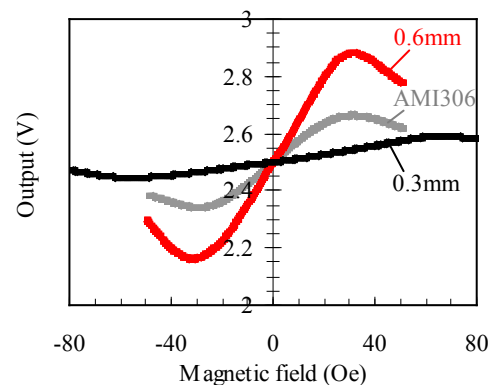


Fig.1 The output property of MI elements

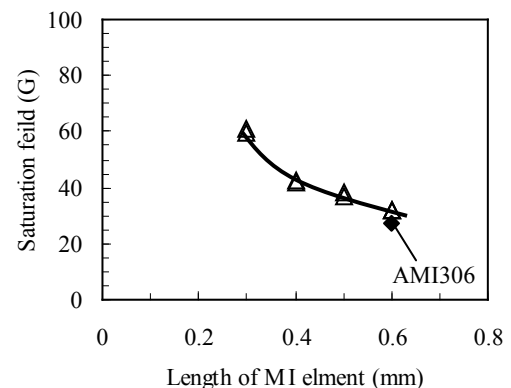


Fig.2 The effect of Length of MI element on saturation field