

反磁界分布制御による磁性薄膜磁気センサの 小型・高感度化に関する検討

大江 駿, 菊池 弘昭, 植竹宏明, 藪上 信, 中居 倫夫, 栢 修一郎, 石山 和志
(岩手大学, 東北学院大学, 宮城県産業技術総合センター, 東北大学)

Miniaturization of thin-film based magnetic field sensor with high sensitivity
by controlling distribution of demagnetizing

S. Oe, H. Kikuchi, H. Uetake, S. Yabukami, T. Nakai, S. Hashi, K. Ishiyama
(Iwate Univ., Tohoku-Gakuin Univ., ITIM, Tohoku Univ.)

1. 緒言

磁性体に直接高周波電流を通電し外部磁場に対するインピーダンス変化を利用した磁気インピーダンスセンサはMIセンサとも呼ばれ、高感度磁界センサとして用いられている。このセンサは外部磁界を印加した際の透磁率の変化が感度に大きく影響し、素子を小型化する場合、反磁界の低減が課題の一つである。MIセンサ素子の形状は矩形状のものが多く、その場合反磁界には分布が存在し(素子端部で強く、中央部で弱い)、センサ感度を低減することがわかっている⁽¹⁾。本研究ではこの問題を改善するために反磁界分布が均一になると期待できる楕円状センサ素子を作製し、矩形状センサ素子との比較を行った。

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。作製素子の形状は矩形、楕円共に幅 50, 40, 30, 20, 10, 5 μm 、長さ 1 mm、厚さ 2 μm 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は素子中央部の 0.5 mm の範囲を用い、ネットワークアナライザにより行った。入力電力は -10 dBm、周波数は 100 MHz 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た。

3. 実験結果

Fig. 1には矩形状と楕円状素子(幅 50 μm)の外観写真を示す。素子部は 1 mm 長であるが、センシング部分(通電箇所)は 0.5 mm とした。Fig. 2 は Fig. 1 の素子に -10 dBm, 100 MHz の高周波電流を通電した場合におけるインピーダンスの直流磁界依存性を示した図である。矩形状素子より楕円状素子の方が感度 (dZ/dH 値)、インピーダンス値の変化量ともに大きくなった。Fig. 3 は素子幅を 50 ~ 5 μm まで変化させた場合の ΔZ_{total} の推移を表した図である。 ΔZ_{total} は $Z_m - Z_0$ で定義され、 Z_m はインピーダンスの最大値、 Z_0 は磁界 0 でのインピーダンスを表している。インピーダンスの変化量は素子幅 20 μm までは楕円状素子の方が高く、形状を楕円に変えたことによる改善がみられた。一方、幅 10 μm 以下では矩形状センサ素子の変化が大きい。素子幅を狭くすることにより幅方向の反磁界が大きくなり、楕円状素子の方が容易軸の制御が困難になったことが原因と考える。解析結果についての詳細は会議で報告する。

文献

(1) H. Kikuchi, et al, *Sens. Acua. A*, **230**, pp. 142-149 (2015).

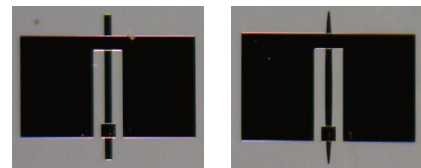


Fig. 1 Rectangle(left) and Ellipsoid(right) sensor elements.

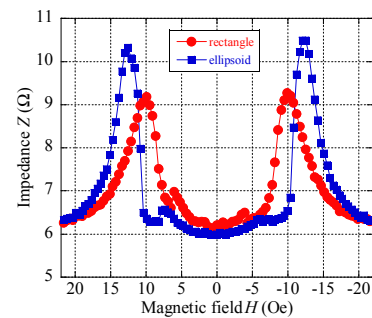


Fig. 2 Field dependence of impedance Z for 50 μm wide elements at 100 MHz, -10dBm.

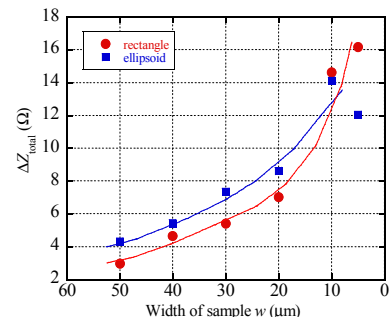


Fig. 3 Width dependence of ΔZ_{total} at 100MHz, -10dBm.

高感度マルチコア MI 素子の開発

下出晃広、濱田典彦、山本道治
(愛知製鋼)

Development of high sensitivity multi core 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、且つ低消費電力の磁気センサであり¹⁾、主に携帯電話やスマートフォン、タブレット向けの電子コンパスとして使用されている。その原理は、アモルファス磁性ワイヤの周りにピックアップコイルを巻き、外部磁場によるインピーダンス変化をピックアップコイルの出力電圧に変換するものである。メッキによるコイル形成方式の MI センサでは、アイチ・マイクロ・インテリジェントによって AMI306 が商品化されている²⁾。その磁気分解能は μT オーダーであるが、さらなる高感度化・低ノイズ化が求められている。一方、高感度に特化した巻線コイル方式の MI センサも商品化されている²⁾。この MI センサにおいては、感磁体であるアモルファス磁性ワイヤを複数本設置したマルチコア型のセンサヘッドにすることにより、感度が飛躍的に向上し、ノイズを低減できることが報告されている³⁾。

本研究では、前述のマルチコア型のセンサヘッドを採用した MI 素子の新設計により、大量生産に適したフォトリソ法とメッキによるコイル形成方式ながら、従来 (AMI306) と比較して飛躍的に高感度化・低ノイズ化に成功した MI 素子の開発とその特性について報告する。

マルチコア MI 素子の設計

感磁体として、回転液中紡糸法で製造されたほぼ零磁歪の CoFeSiB 系アモルファス磁性ワイヤを使用し、その磁気特性は熱処理により調整した。また、MI 素子はフォトリソ法とメッキにより作製した。

MI 素子の高感度化・低ノイズ化のため、反磁界に及ぼすワイヤ長の影響、及び MI センサ特性に及ぼすワイヤの磁気特性、ピックアップコイルのコイルピッチの影響を調査した。さらに、マルチコア型のセンサヘッドにすることでさらなる高感度化・低ノイズ化を図った。

本研究で試作したマルチコア MI 素子の外観を Fig.1 に示す。その素子サイズは、 $1.5\text{mm} \times 1.7\text{mm} \times \text{厚 } 0.5\text{mm}$ である。

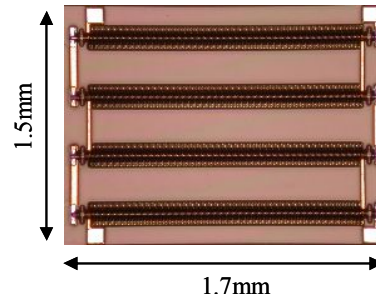


Fig.1 Appearance of developed MI element

マルチコア MI 素子の特性評価

感磁ワイヤに通電させるパルス発生回路、及びピックアップコイルの出力を処理する信号処理回路を MI 素子に組み合わせ、MI センサを構成した。また、MI センサのノイズ密度は、3重磁気シールドボックス内のゼロ磁場雰囲気中で FFT アナライザにて測定した。測定したノイズ密度を Fig.2 に示す。開発したマルチコア MI 素子の周波数 10Hz におけるノイズ密度は、 0.1nT であり、従来品 (AMI306) と比較して約 100 分の 1 となった。

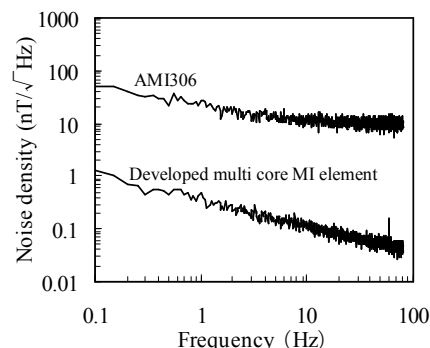


Fig.2 Noise density of developed MI element

参考文献

- 1) L. V. Panina and K. Mohri: Applied Physics Letter, 65(1994), 9, 1189-1191
- 2) AICHI MICRO INTELLIGENT Corporation Web site: <http://www.aichi-mi.com/>
- 3) T. Uchiyama et al, Intermag 2013, DG-05, Chicago, (2013)

アモルファスワイヤを利用した磁界センサの高感度化

宋タンニ, 内山剛, 蔡長梅*, 下出晃広*

(名古屋大学, *愛知製鋼)

High sensitivity magnetic sensor with amorphous wire

D.Song, T.Uchiyama, C.Cai*, A.Shimode*

(Nagoya Univ., * Aichi Steel CORP.)

1. はじめに

アモルファスワイヤの磁気インピーダンス効果を利用した磁界センサ (MI センサ) は、工業用途から生体磁気計測まで、幅広い分野で応用されている。MI センサは、CMOS-IC 回路による高周波パルス電流をワイヤに励磁することにより、ワイヤに巻いたコイルに生じた誘導起電力のピークを検出し、アナログスイッチにより出力する。コイル出力型の MI センサの出力感度は、コイルの巻き数に依存して増加する。現在、生体磁気検出に求められる磁界センサの磁気分解能は pT(ピコテスラ)レベルである。

本研究では、微小磁界の検出に向けて、直径 25 μ m のアモルファスワイヤを利用し、MI センサの出力感度の向上とセンサシステムのノイズを評価することを目的として実験を行った。

2. 直径 25 μ m のアモルファスワイヤの磁気特性

MI 素子の高感度化 (低ノイズ化) に向けて、愛知製鋼 (株) は、ヒステリシスを低下させるため、ワイヤの軟磁気特性を改善した。また、ワイヤの直径 D と長さ L の比 (L/D) が 400 以上での場合、反磁界がほぼゼロとなり、感度を最大限に引き出すことができると考えられる。⁽¹⁾

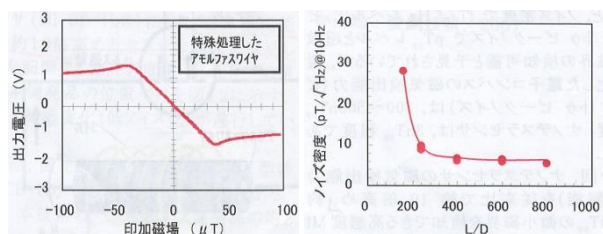


図 1. 直径 25 μ m アモルファスワイヤの磁気特性 (愛知製鋼)

3. 実験方法

MI 素子に印加された外部磁界を変化させ、巻き数の異なるコイルに生じた誘導起電力のピークを出力として測定し、出力電圧と外部磁界の相関よりセンサ感度を算出した。また、コイル巻き数が 800 ターンの場合の出力ノイズ

参考文献

- 1) 高感度 MI センサ “ナノテスラセンサ” の開発, 愛知製鋼
- 2) T. Uchiyama, A. Yamaguchi and Y. Utsumi, Magn, Soc. Jpn., 34,533(2010)

電圧波形を FFT 処理することで出力ノイズの周波数スペクトルを求めた。今回の実験で使用したアモルファスワイヤの長さは 10mm とした。

4. 実験結果

図 2 にコイルの巻き数が 100~800 ターンの時のセンサ感度を示す。実験によって、コイル巻き数が 400 ターン以上での場合、100kV/T の高感度な磁界検出特性が得られることが分かった。図 3 に MI センサの出力ノイズスペクトルを示す。1Hz におけるノイズレベルは 20pT/Hz^{1/2} であり、10Hz~500Hz におけるノイズレベルは 5 pT/Hz^{1/2} 以下であり、以前の我々の報告⁽²⁾に比べて、有意に減少したことがわかった。

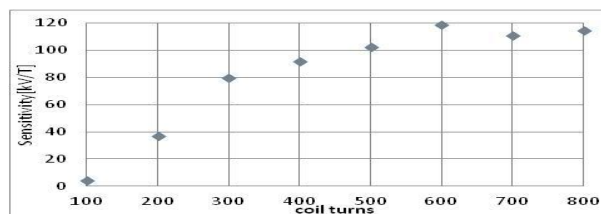


図 2. MI センサ出力感度

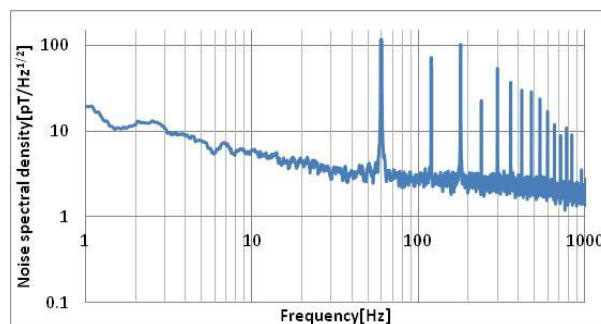


図 3. MI センサの磁気分解能

今後は、微小磁界を検出することに向けて更なる高感度化とシステムノイズの減少を目指し、センサ回路構成を検討する予定である。

集積化を目的とした TAD による磁気インピーダンスセンサ

呉鵬、渡辺高元*、内山剛
(名大、* (株) デンソー)

Magneto-Impedance Sensor Based on TAD for Circuit Integration

P. Wu, T. Watanabe*, and T. Uchiyama,
(Nagoya Univ., *DENSO CORP.)

はじめに

近年、スマートフォンやウェアラブルデバイスを構成するために、センシングシステムは集積化され、より高性能になりつつある。磁気インピーダンスセンサ (MI センサ) は、アモルファスワイヤの磁気インピーダンス効果 (MI 効果) を利用しており、現在集積化された MI センサ (MIIC) が実現されている。最近、我々はピコテスラ (10^{-12}T) オーダーまで測定可能な MI センサを開発し、さらに TAD (Time A/D converter)、FPGA (Field Programmable Gate Array) と組み合わせることによりセンサの高分解能及び低ノイズ化を検討している。現在研究室で試作している高感度 MI センサの駆動回路は CMOS IC、アナログ素子 (抵抗、キャパシタ、バッファおよびスイッチ) により構成されている。この回路は集積化が難しいため、高感度な MI センサの集積化に向けて TAD、FPGA により回路を構成した高分解能 MI センサの開発を目的として、本研究を行った。

実験方法

従来組み込まれていた CMOS インバータ、抵抗、キャパシタを FPGA に置き換え、更に、高利得アナログ増幅回路を TAD に置き換えることにより、サンプルホールド回路を取り除くことで MI センサをデジタル集積回路で構成した。TAD の出力は FPGA 内で信号処理され、パソコン (PC) へデータの送信が行われる。

実験結果

Fig. 1 は MI センサを 500kHz、1MHz、5MHz のクロックで駆動した時のシステムの出力である。外部磁界に対する出力は線形性を得ることができた。5MHz の場合、磁化検出分解能は 22.2pT/LSB で最大となった。

Fig. 2 は 450pT の振幅で 10Hz の正弦磁界を印加した時のパワースペクトル密度から、SN 比を求め、サンプリングホールド回路を含んだシステムと比較したものである。集積化したシステムでは、 10Hz 以下のノイズを低減させることができた。

まとめ

集積化した MI センサは 22.2pT/LSB の分解能を有し、高い SN 比が得られた。今後、FPGA 内で LPF 信号等のリアルタイム処理を実現することで、生体信号計測等様々な分野への応用が期待できる。

参考文献

- Shingo Tajima, et al., "High Resolution Magneto-impedance Sensor with TAD for Low Noise Signal Processing," *Proc. IEEE INTERMAG*, 2014.

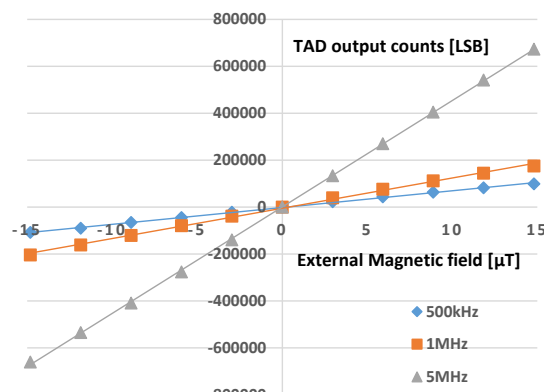


Fig. 1. Operation characteristics of the MI sensor system in different operation clock when the external magnetic field is changed.

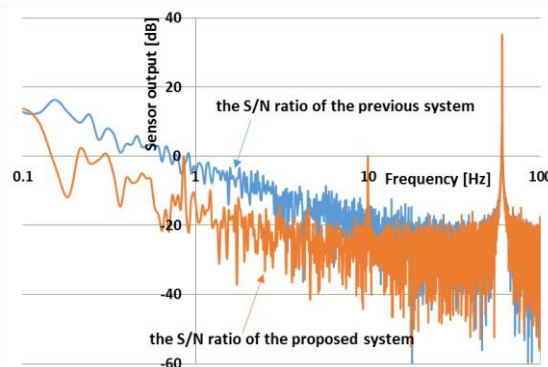


Fig. 2. The S/N ratio of the system by frequency analysis.

異物検知用超高感度ナノテスラセンサの開発

Development of Super Highly-sensitive nT Sensor for Foreign Substance Detective

蔡長梅、濱田典彦、下出晃広、森正樹、山本道治

愛知製鋼株式会社

はじめに

MI 効果とは、アモルファス磁性ワイヤに高周波電流あるいはパルスを通電すると、外部磁界によって磁性体のインピーダンスが極めて大きく変化する電磁現象である¹⁾。この MI 効果を利用した低ノイズ MI センサ (MI-CB-1DK)²⁾は、10Hz で 20 pT/Hz^{0.5} のノイズ密度を有している。2006 年に商品化されて以来、食品、アパレル製品、非磁性の工業製品などの鉄系異物検知として活用されている³⁾。しかし、用途によってセンサ出力が容易に地磁気の中で飽和するなどいくつかの課題があった。そこで我々は、10Hz で 10 pT/Hz^{0.5} の低ノイズ密度を維持すると同時に地磁気で飽和しない MI センサ (MI-CB-1DH) の設計をした (Fig.1)。また、このセンサで市場ニーズである直径 0.3mm の微小鉄系の異物検出に成功した。

ナノテスラセンサの設計

このナノテスラセンサは、1方向の磁気を検知する磁気ヘッド (MI 素子) とその MI 素子を動作させる電子回路から構成している。(1)MI 素子: 長さ 6 mm のアモルファスワイヤ (FeCoSiB) の周りに 30um の銅線で作られたピックアップコイルを巻く。コイルのターン数は 300 である。(2)電子回路設計: 低周波数側のカットオフ周波数を 0.1Hz にすることにより、地磁気などの静磁場において、移動体が発する磁場変化を高感度で検出することを実現した。

異物検出の検証結果

食品中の異物検出の場合には、ステンレス鋼の加工設備から出てくる鉄系金属粒子が混入することがある。直径 0.3mm の鉄球を 10mm の距離から一定の速度で移動させた時の結果を Fig.2 に示している。十分な信号が検出された。

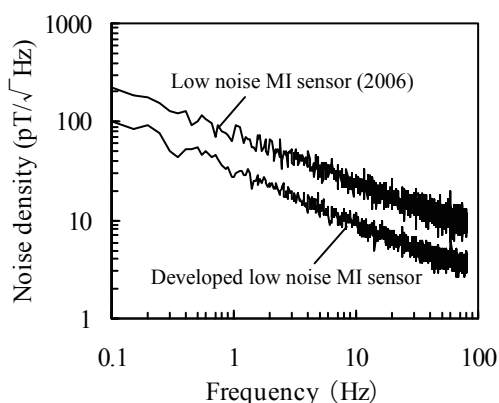


Fig.1 Noise density of developed low noise nT sensor

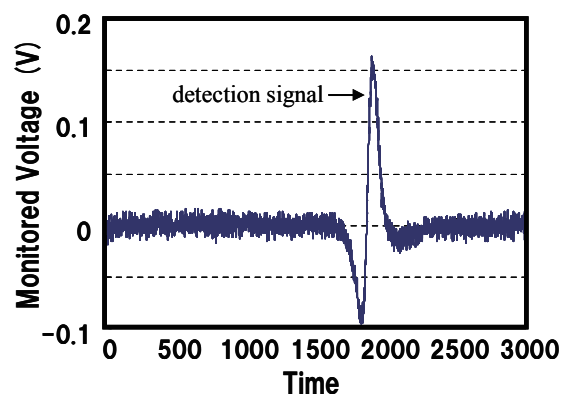


Fig.2 Detective result of a particle with a size of 0.3 mm

参考文献

- 1) L.V.Panina, K.Mohri, Magneto-Impedance Effect in Amorphous Wires, Appl. Phys. Lett., 65(1994)
- 2) N. Hamada et al, Intermag 2011, FF-08, Taipei, (2011)
- 3) T. Uchiyama et al, Intermag 2013, DG-05, Chicago, (2013)

一次グラジオメータ型 MI センサによる食品内異物検知

滝谷貴史、王可望、内山剛、青山均*
(名古屋大学、*愛知製鋼)

Foreign substance detection in food by using primary gradiometer type MI sensor

T. Takiya, K. Wang, T. Uchiyama, H. Aoyama
(Nagoya University, *Aichi steel)

はじめに

アモルファス磁性ワイヤに高周波正弦電流を通電した場合、外部磁界によって磁性体のインピーダンスが極めて大きく変化する MI(Magneto-Impedance)効果が発生する¹⁾。この現象を利用した MI センサは、pT(ピコテスラ)から mT(ミリテスラ)の磁気が検出可能であり、生体磁気計測(脳磁場計測等)への応用が研究されている²⁾。高感度な磁界センサは外部磁界の影響を受けやすく、磁気シールドを必要とするが、MI センサは地磁気下で安定動作可能なため、空間的な磁界の差分をとるグラジオメータとすることで外乱磁界の影響を低減可能である³⁾。

本稿では、環境外乱磁界の影響を抑制した一次グラジオメータ型 MI センサを用いて SUS304 鋼球の磁気信号を検出し、本センサの食品内異物検知システムへの応用を検討した。

実験方法

$\phi = 0.3\text{mm}$ の SUS304 鋼球を回転台に乗せ、一次グラジオメータ型 MI センサを用いてヘッドから鋼球までの距離を 30 mm とした場合の磁気信号を検出した。回転台の回転速度は毎分 15 m とし、使用したセンサヘッドの MI 素子は $\phi = 25\ \mu\text{m}$ 、長さ 10 mm で、ピックアップコイルの巻き数は 700 回とした。

実験結果

Fig.1 に MI センサの出力信号 E_{out} を示す。鋼球がヘッドを通過した際の最大出力電圧は 19 mV_{p-p} であり、0.689 nT の磁気信号に相当する。VSM を用いて測定した SUS304 鋼球($\phi = 0.3\text{mm}$)の残留磁気モーメントは 347 μemu であるため、鋼球から 30 mm 離れた位置の磁界は 0.8 nT であり、一次グラジオメータ型 MI センサを用いて SUS304 鋼球の磁気信号を検出可能であることを明らかにした。

食品パッケージ内異物検知システムに本センサを用いる場合、例えば、一般的な冷凍食品の形状は 230×140×30 mm であるため、ベルトコンベアの上に本センサを配置することで金属異物を検知可能と考えられる。食品異物検知には X 線方式や SQUID 磁気センサ方式等があるが、X 線方式の SUS 金属球の検出下限は $\phi = 0.4 \sim 1.0\ \text{mm}$ であるため、今回の測定結果は有意義であり、かつ X 線を照射できない食品にも使用可能である。また、SQUID 磁気センサ方式と比較した場合、磁気シールドや冷却システムを要さないためセンシング機構の小型化および低価格化が期待できる。

参考文献

- 1) L. V. Panina and K. Mohri : Applied Physics Letter, 65(9), pp.1189-1191, (1994)
- 2) T. Uchiyama, K. Mohri, Life Fellow, IEEE, Y. Honkura, and L.V. Panina: IEEE Trans. Magn., Vol.48, No.11, pp. 3833-3839, Nov 2012
- 3) T. Utciyama : Journal of the Japanese Society for Non-Destructive Inspection , Vol.63, pp.562-566, Nov. 2014

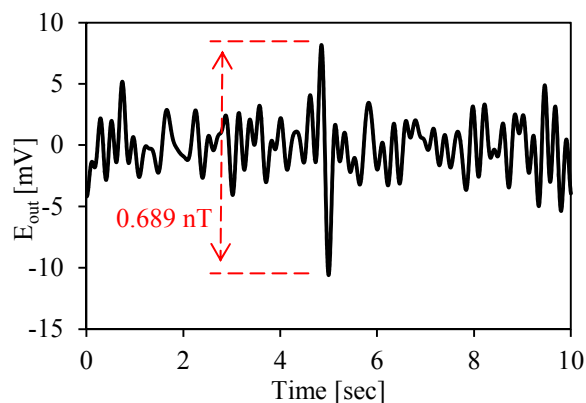


Fig. 5 Output of MI sensor