

FeSiB フリー層を有するスピバルブ型 GMR 歪みセンサ

橋本 侑也, 山本 直樹, 加藤 剛志, 大島 大輝, 岩田 聡

名古屋大学

Spin-Valve GMR Magnetic Strain Sensor with FeSiB Free Layer

Y. Hashimoto, N. Yamamoto, T. Kato, D. Oshima, S. Iwata

Nagoya University

はじめに

GMR 素子は 2 端子の抵抗として扱うことができるため、磁気記録以外にも多様な磁気センサとして利用する研究が行われている。スピバルブ構造を持つ GMR 素子に対して、磁化自由層の磁化方向を歪みによって変化させると、歪みセンサとして利用することができる¹⁾。磁性材料に歪みを加えると磁歪の逆効果により磁気異方性が変化するが、本研究ではフリー層の磁化方向を交流磁界で変調することで、この磁気異方性の変化を高感度で検出するとともに、外乱磁界に強い歪みセンサを試作した。

実験方法

超高真空スパッタ装置により直流磁界中で、Ta (2) / Mn₈₀Ir₂₀ (10) / Co₉₀Fe₁₀ (3) / Cu (2.2) / (Co₉₀Fe₁₀)₉₂B₈ (1.5) / Fe₇₂Si₁₄B₁₄ (20) / Ta (5) / sub. を作製した。カッコ内の数値は膜厚 (nm) で、sub. は 0.1 mm 厚のカバーガラス基板を表している。成膜した試料をフォトリソグラフィおよび Ar イオンエッチングにより幅 100 μm、長さ 1200 μm の細線状に加工した。素子の磁化容易軸を細線の短辺方向とし、直流磁界 $H_{DC} = 10 \sim 50$ Oe により、FeSiB フリー層磁化を困難軸方向に回転させた。次に容易軸方向に実効値 0.6 Oe、1 kHz の交流磁界 H_{AC} を印加し、フリー層の磁化を振動させた (Fig.2)。この振動に伴い素子の抵抗値が変化して 1 kHz の信号電圧が現れる。GMR 素子はブリッジ回路に組み込み、ブリッジバランスの崩れを計装アンプによって増幅したものを出力信号電圧 V_{out} とした。Fig. 1 のような片持ち梁構造となるように固定した GMR 素子に歪みを印加すると、フリー層に歪みによる磁気異方性が誘導され、フリー層磁化の振動振幅が変化し、 V_{out} の歪み依存性が得られる。

実験結果

Fig. 3 は $H_{DC} = 10$ Oe のときの歪み ϵ に対する出力電圧 V_{out} をプロットしたものである。また図中に FeSiB フリー層の一軸異方性と歪み誘導異方性から、歪み ϵ と H_{AC} 印加時の出力電圧をシミュレーションした結果も示す。FeSiB の実効異方性磁界は 10 Oe 以上で $H_{DC} = 10$ Oe ではこれを打ち消すには不十分であるが、Fe₇₂Si₁₄B₁₄ は正の磁歪定数 ($\lambda = 3.0 \times 10^{-5}$) を示すため、 $\epsilon > 0$ の場合、歪み誘導異方性により、フリー層の異方性磁界が打ち消され、磁化振動振幅が大きくなり、出力電圧が増加する。さらに ϵ を増すと磁化振動振幅は減少する。出力電圧が線形である範囲 ($-0.6 \times 10^{-4} < \epsilon < 0$) のゲージ率 $K = (\Delta V / V) / \epsilon$ は 8.1 と得られた。これは一般的な金属歪みゲージの 4 倍である。さらに、 H_{DC} の印加角度を調整することで、 $K = 46$ が得られることを確認した。

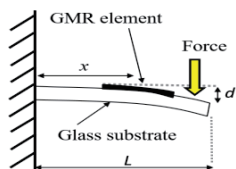


Fig.1 Schematic drawing of the experimental setup.

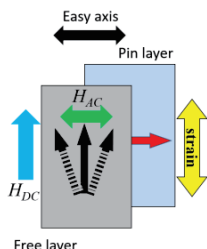


Fig.2 Top view of the GMR element showing directions of the easy axis, H_{DC} , magnetizations of pin and free layers, and applied strain.

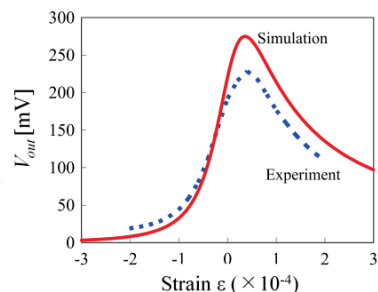


Fig.3 Experimental and simulated output voltage V_{out} as a function of the applied strain ϵ under $H_{DC} = 10$ Oe.

参考文献

- 1) S. Dokupil et al., J. Magn. Magn. Mat., 290-291, 795 (2005).

SmCo 薄膜を用いたミアンダコプレーナ線路型薄膜センサ

藪上 信, 植竹宏明, 小野寺英彦, 小林伸聖*, 早坂淳一*, 荒井賢一*
(東北学院大学, *電磁材料研究所)

Meandering coplanar line type thin film sensor using SmCo film
S. Yabukami, H. Uetake, H. Onodera, N. Kobayashi*, J. Hayasaka*, K.I. Arai*
(Tohoku Gakuin University, *Res. Inst. For Electromagnetic Materials)

1 はじめに SmCo 薄膜磁石により磁性薄膜へバイアスさせるコプレーナ線路型センサ素子を開発した。

2 計測方法 Fig. 1 は SmCo 薄膜磁石の上に作製したミアンダコプレーナ型線路によるセンサ素子の写真を示したものである。これまでセンサ素子に使用する磁性薄膜へ直接バイアス電流を通电させることで、センサを駆動することを試みたが、バイアス電流が 1.2A 程度と消費電力を低減する課題があったり。そこで本報告では CoNbZr 薄膜の下に SmCo 薄膜磁石を積層して、バイアスを与えた。ミアンダコプレーナ構造のセンサ素子はガラス基板(25 mm × 25 mm, 1 mm 厚)上に SmCo 薄膜磁石(1.25 μ m 厚)、SiO₂ 薄膜(2 μ m 厚)、アモルファス CoNbZr 薄膜(1 mm × 2.95 mm, 1 μ m 厚)を成膜し、SrTiO 薄膜(0.75 μ m 厚)を介して Cu 薄膜によるミアンダコプレーナ線路(110 μ m 幅, ギャップ 20 μ m, 3.5 μ m 厚)をそれぞれリフトオフにより作製した。磁性薄膜の直下には微調整バイアス用電極として Cu 薄膜を成膜した。CoNbZr 薄膜へは回転磁界中熱処理(300 $^{\circ}$ C, 2 時間 0.3 T)の後、静磁界中熱処理(200 $^{\circ}$ C, 1 時間)を施して、Fig. 1 の左右方向へ磁気異方性を付与した。キャリア信号はコプレーナの中心導体流れ、CoNbZr 薄膜には導通しない。バイアス磁界は CoNbZr 薄膜内には磁化困難軸方向(Fig. 1 の上下方向)へ印加させる。バイアス磁界が異方性磁界と近い値の際に、キャリアの位相変化および振幅変化が最大値となると考えられる。センサの評価には市販のウェハプローブ(GSG-40-150)とマグネットを用いてゆっくりと磁界を変化させて、ネットワークアナライザ(R3767)の透過法測定によりキャリアの位相変化を S_{21} から求めた。周波数範囲は 300 kHz-8 GHz とし、バンド幅は 1 kHz, 平均化回数は 16 回とした。

3 計測結果 Fig. 2 は Fig. 1 のセンサにおいて、バイアス磁界に対する、キャリアの位相変化を示したものである。キャリア周波数は 1.5 GHz ~ 3 GHz を表記した。位相変化感度は約 1 Oe で 70 degree/Oe 得られた。SmCo 磁石を着磁せずに評価した際には、位相変化感度が最大になる磁界は約 10 Oe 程度であ

り、SmCo 磁石により約 9 Oe のバイアス磁界が付与され、高感度な動作点が低磁界にシフトしたと考えられる。

謝辞 本研究の一部は JST COI TOHOKU プロジェクトの研究成果である。また本研究の一部は科研費(16H04378)の研究成果である。

参考文献 1) 藪上 信, 植竹宏明, 森谷健太, 富並剛, 小野寺英彦, “バイアス通电によるミアンダコプレーナ薄膜磁界センサの開発”, 電気学会論文誌 A, Vol. 137, No. 8 (2017, 印刷中).

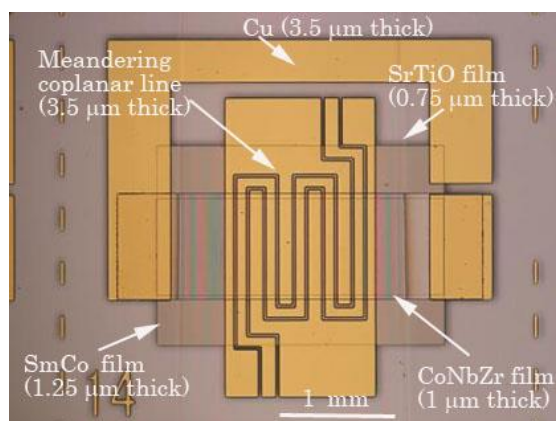


Fig. 1 Schematic view of the sensor.

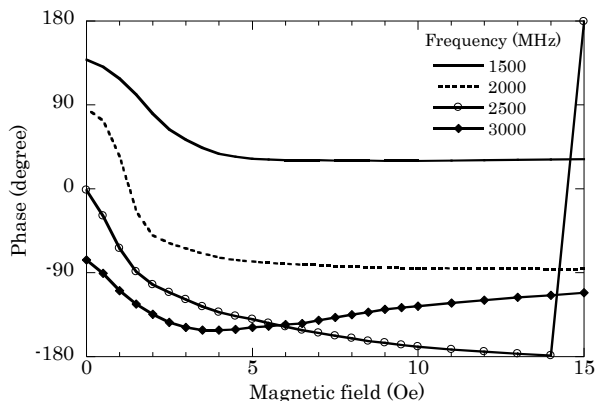


Fig. 2 Phase difference and phase change as a function of applied bias field.

六方晶フェライト単結晶の高周波透磁率評価

長内 史也, 薮上 信*, 山田 洋, 内海 重宜**, 安川 雪子**, 吉田 栄吉****, 遠藤 恭****, 島田 寛****
 (仙台高等専門学校, *東北学院大学, **諏訪東京理科大学, ***千葉工業大学,
 ****東北大学, *****東栄科学産業)

High frequency permeability measurement of hexagonal ferrite single crystal

F.Osanai, S. Yabukami*, H. Yamada, S. Utsumi**, Y. Yasukawa**, S. Yoshida****, Y. Endo****, Y. Shimada****
 (National Institute of Technology Sendai College, *Tohoku Gakuin University, **Tokyo University of
 Science Suwa, ***Chiba Institute of Technology, ****Tohoku University, *****Toei Scientific Industrial co., ltd.)

1 はじめに 六方晶フェライトは次世代高周波磁気素子への応用が期待され、その高周波磁気特性に関する研究が行なわれている。本研究では、六方晶フェライトとして組成調整したBaフェライトを選択し、その高周波磁気特性を検討した。具体的には、インピーダンス整合を考慮したマイクロストリップ (MSL) 型プローブをBaフェライト単結晶に近接させて透磁率計測を行い、強磁性共鳴周波数、共鳴線幅、ダンピング定数について検討した。

2 計測方法 測定対象試料は、組成および濃度が異なる10種類のBaフェライト単結晶である。なお、本概要では、試料面内 (C 面) 方向に非常に弱い容易軸を有するBa(Fe_{0.864}Sc_{0.136})₁₂O₁₉ (6 mm × 3 mm, 厚さ 1 mm) の結果について紹介する。

Fig. 1 は高周波透磁率計測システムの構成、およびMSL型プローブとBaフェライトの配置関係を模式的に示した図である。同軸ケーブルを介してネットワークアナライザ(アジレントテクノロジー製N5227A)に接続したMSL型プローブをヘルムホルツコイル内に設置した。高周波磁界をBaフェライトの磁化困難軸方向に励起するように、ポリスチレンフィルムを介してMSL導体に試料の磁化困難軸面を近接配置させた。

はじめにDCバイアス磁界H_{dc}を印加せず、Baフェライトをヘルムホルツコイル内に配置しない状態でSパラメータ測定を行った (バックグラウンド測定)。次に、MSLプローブとBaフェライトの配置関係を注意しながら、BaフェライトをMSLに近接配置し、DCバイアス磁界(0~1500 Oe程度)を高周波磁界と直交するように印加してSパラメータ測定を行った (メイン測定)。メイン測定とバックグラウンド測定との差分により透過係数(S₂₁)を評価し、(1), (2)式により透磁率に換算した。

$$Z_s = 100(1 - S_{21})/S_{21} \tag{1}$$

$$\mu_r = K \frac{1}{f} (X - jR) \tag{2}$$

ここで、Z_sは磁性体の等価的インピーダンス、Rは抵抗、Xはリアクタンス、fは周波数、Kは定数である。

3 計測結果 Fig. 2 に一例としてDCバイアス磁界500,1000,1500 Oe印加時のBa(Fe_{0.864}Sc_{0.136})₁₂O₁₉の透磁率 (虚数部) の周波数特性を示す。なお、絶対値

は未補正である。外部磁界の増加とともに、強磁性共鳴周波数 (f_r) は5.1 GHzから10.95 GHzへと高周波帯域へシフトし、共鳴線幅 (Δf_r) は4.3 GHzから0.43 GHzへと狭くなった。f_rに関しては、Baフェライトの異方性磁界より求めたf_rの理論値(約4.2 GHz)と近くなった。Δf_rに関しては、その挙動は外部磁界の増加にともない異方性分散が収まり磁化が一斉回転モードになっていることを表している。また、ダンピング定数に関しては、DCバイアス磁界が十分に強く一斉回転モードになる領域で、その値はおおよそ0.02となった。今後は他のBaフェライトについても同様の評価を行う。

参考文献 1) S. Yabukami, K. Kusunoki, H. Uetake, H. Yamada, T. Ozawa, R. Utsumi, T. Morizumi, Y. Shimada, *Journal of the Magnetics Society of Japan*, Vol. 41, No. 2, pp. 25-28 (2017).

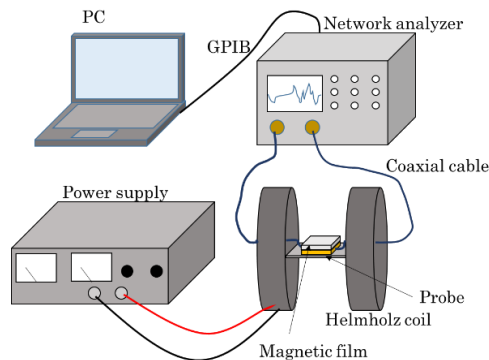


Fig. 1 Schematic diagram of measurement system.

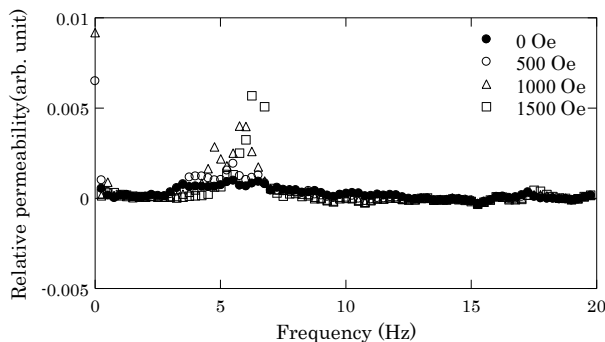


Fig. 2 Imag. permeability of Ba(Fe_{0.864}Sc_{0.136})₁₂O₁₉

基本波型FGを用いる勾配磁界センサの高平衡化法

笹田一郎

(笹田磁気計測研究所)

Balancing Method for Fundamental-Mode Orthogonal Fluxgate (FM-OFG) Gradiometer

Ichiro Sasada

(Sasada Magnetic Instruments Laboratory)

はじめに

グラディオメータは磁界の局所的な乱れを高感度に検出する。基本波型直交フラックスゲート (FM-OFG) を用いると、グラディオメータはマグネトメータをわずかに作り変えるだけで得られる⁽¹⁾。同じようにして作成したセンサヘッドを2個用いて、励磁側は直列に、検出側は差動に結線するだけで回路は全く同じものを用いることができる。グラディオメータの高性能化には、雑音特性はもとより、一様磁界に対する感度を可能な限り抑制することが重要である。FM-OFGのセンサヘッドの磁界に対する感度は直流バイアス電流を大きくすると感度が低下し、小さくすると感度が増大することを利用して、平衡度を高めることができる。補助的な電源を用いる方法はすでに参考文献で報告しているが、本稿では、受動素子のみで調整する方法を発表する。

調整方法

Fig. 1に調整回路を付加したグラディオメータの励磁側回路を示す。U字型をしているのがアモルファスワイヤコアである。この方法では、交流電流成分 I_{ac} は2つのコアに共通に流れ、直流バイアス電流の一部がLR受動素子回路に分流する。可変抵抗で分流する直流電流の大きさを調整することで、バイアス電流の大きさを独立に調整できる。インダクタは交流電流を阻止するためのものである。

実験結果

実験に用いた平行グラディオメータ (ベースライン12 mm) は、Uの字に曲げたアモルファス磁性ワイヤコアと、その周囲に巻かれた1000ターンのソレノイド検出コイルからなるが、長さは共に30 mmである。センサヘッドの励磁は100 kHzで実効値12mA, 直流バイアス電流は40 mAとしている。実効値 $1.27 \mu\text{T}$, 周波数20 Hzの一様磁界を印加した時のグラディオメータの出力波形を高平衡化調整なしと、調整ありの場合についてFig. 2に示している。マグネトメータ

($0.25\text{V}/1 \mu\text{T}$) の出力に対する抑圧比は前者で168、後者で2480に達する。

参考文献

- 1) Ichiro Sasada and Shoumu Harada, Fundamental Mode Orthogonal Fluxgate Gradiometer, IEEE Trans. Magn., Vol. 50, No. 11 (2014) 4007404

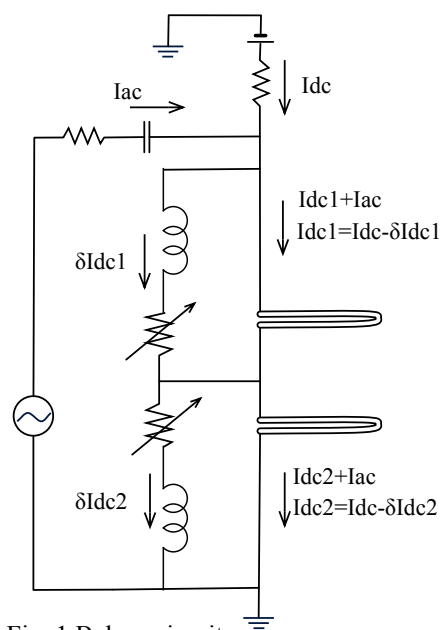


Fig. 1 Balace circuit

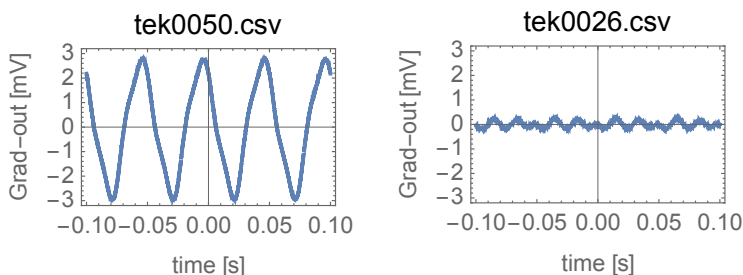


Fig. 2 Waveforms of the gradiometer no adjustment (left) and with adjustment (right).

張力印加した磁性コアの磁区構造制御による フラックスゲート磁気センサの小型化

宮田大史^{*,**}、山本竜馬^{**}、森本祐治^{**}、竹澤昌晃^{**}
(*エムティアイ、**九工大)

Miniaturization of Fluxgate Sensors by Magnetic Domain Structure Control of Tensioned Core Materials

H. Miyata^{*,**}, R. Yamamoto^{**}, Y. Morimoto^{**}, M. Takezawa^{**}

(*MTI Co., Ltd., **Kyushu Inst. 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を制御することにより改善できることを報告している¹⁾。本研究では、センサ長を 20 mm から 5 mm まで小型化した際のセンサ出力の低下を、張力印加による磁区構造制御によって抑制することを試みた。この際の磁性コアの磁区構造と、センサ出力の関係を調べたので報告する。

実験方法

観察試料は $\text{Fe}_{81}\text{B}_{13.5}\text{Si}_{3.5}\text{C}_2$ アモルファス薄帯で、飽和磁歪は 35×10^{-6} 、飽和磁束密度は 1.6 T である。この試料に 15 MPa の張力を印加した際の磁区構造を Kerr 効果顕微鏡で観察した。また、励磁コイルに 1~10kHz, 10 mA の電流を通电した際の出力電圧を測定してセンサ感度を調べた。

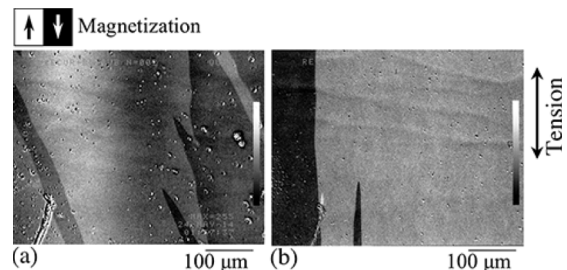


Fig. 1 Domain images (a) with and (b) without tension.

結果と考察

Fig.1 に Fe 基アモルファス薄帯の磁区観察結果を示す。Fig.1 より張力印加前後で磁区構造が変化していることが分かる。張力印加前は磁区コントラストが薄く灰色であり、磁化が上下ではなく斜め方向を向いているが、張力印加後は磁区コントラストが濃くなり、磁化が上下方向にそろったストライプ状の磁区構造が観察された。これは Fe 基アモルファス薄帯の磁歪が大きく、逆磁歪効果により励磁方向を磁化容易軸に誘起できた結果だと考えられる。

Fig. 2 に 10 mm と 20 mm 長のセンサの感度の周波数依存性を示す。▲で示す張力印加無しの 20 mm 長のセンサ感度と比較して、■で示す張力印加無しの 10 mm 長のセンサ感度は 60%程度に低下している。一方で、●で示す張力を印加した 10 mm 長のセンサでは、張力無しの 20 mm 長センサの 2 倍程度の感度が得られており、張力印加による磁区構造制御によって、センサの小型・高感度化を実現できたことが分かる。

Fig. 3 に 5 mm 長センサの感度の周波数依存性を示す。この場合も、張力印加によってセンサ感度を向上でき、約 3 倍になっていることが分かる。しかし、張力を印加した場合でも 10 mm 長センサと比較して感度は 3%程度に急激に低下している。これは反磁界により材料端部で磁壁移動が起きにくくなるためだと考えられるが、張力印加によってセンサ長を 5 mm まで小型化した場合でも、十分に検出可能なセンサ感度が得られることを明らかとした。

参考文献

- 1) H. Miyata, et al., *J. Magn. Soc. Jpn.* **38**, 169 (2014).

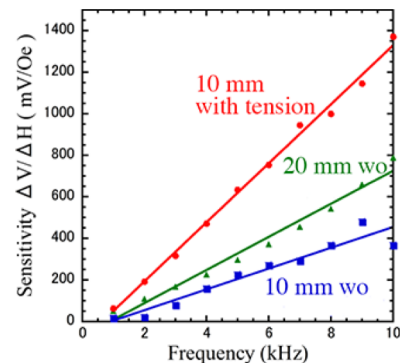


Fig. 2 Frequency dependence of sensitivity of 10- and 20-mm-long sensors.

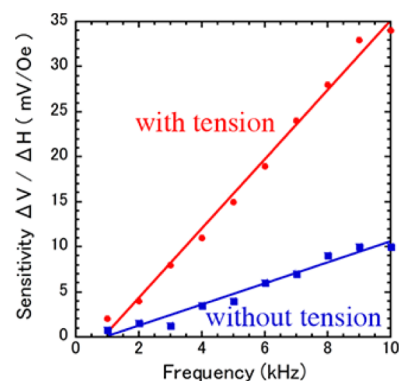


Fig. 3 Frequency dependence of sensitivity of a 5-mm-long sensor.

イットリウム鉄ガーネットの磁化ダイナミクスを利用した高感度磁気センシングの基礎検討

神田哲典、室賀翔¹、遠藤恭²、黒澤孝裕³

(大島商船高専、¹豊田高専、²東北大、³秋田県産業技術センター)

Sensitive measurements of magnetization dynamics in yttrium iron garnet for magnetic sensor applications

T. Koda, S. Muroga¹, Y. Endo², T. Kurosawa³

(National Inst. of technology Oshima college, ¹National Inst. of technology Toyota college, ²Tohoku Univ., ³AIT)

はじめに

近年、生体磁場検出等に向けて室温で動作する高感度磁気センシング技術の研究開発が活発に行われている。このような用途に向けて、本研究では、低磁気ダンピング定数のイットリウム鉄ガーネット(YIG)の強磁性共鳴近傍の条件下で外部磁場変化に伴う非線形な磁化ダイナミクス変化を利用し、磁場変化を高感度に捉えることを試みたので報告する。

実験方法

試料には(111)ガドリウムガリウムガーネット (GGG) 単結晶基板上に液相エピタキシャル法で成長された膜厚 10 μm の YIG(111)単結晶膜を用いた。試料上に高周波伝送路として、フォトリソグラフィ法で非対称型のコプレナーウェイブガイド (グランド幅 175 μm 、信号線幅 100 μm 、信号線間隔 45 μm) を形成した。-10dBm の高周波電力をこの伝送路を用いて YIG 上に入力し、反射波の磁場に対する応答を評価した。磁化ダイナミクスを誘起するための高周波電力の周波数は GHz 帯域と高いため、位相変化の時間分解能を高めることが可能な Double Mixer Time Difference (DMTD) 法を用いた測定系を構築し [1]、反射波の電力と位相を RF ロックインアンプにより計測することで磁化ダイナミクスを評価した。

実験結果

図 1(a)には磁場掃引した際の磁化ダイナミクスの高周波周波数依存性の測定例を示す。反射電力スペクトルの形状は周波数に大きく依存し、特定の周波数において磁場掃引に対して急峻な変化を示すことがわかる。この周波数によって大きくスペクトルが変化する原因は特定されていないが、コプレナーウェイブガイドの寸法を系統的に変えると周波数依存性も系統的に変化することから、信号線、グランド線のそれぞれにおいて励起された局所的な磁化の歳差運動によって発生するスピン波同士の干渉効果による共振が発生していると推定している。

図 1(b)には最も急峻なスペクトルを示す印加周波数 6.6 GHz での DMTD 法を用いた位相変化の測定結果を示す。磁場による位相変化は強磁性共鳴が起こる磁場近傍で顕著となり、最大で 27° /Oe の比較的大きな磁場に対する位相変化が検出された。講演では周波数依存性の原因に関する考察と、位相の磁場依存性を中心に報告する予定である。

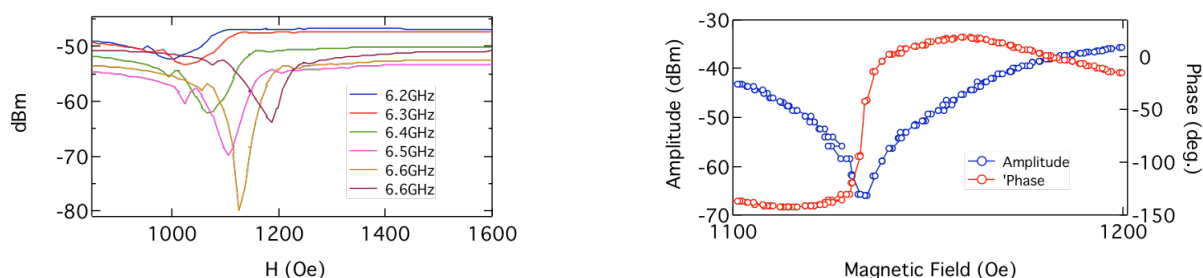


Fig. 1 (a) Magnetic field dependence of reflected wave power. (b) Magnetic field dependence of power and phase.

謝辞 本研究にあたり、株式会社グラノプトから測定試料の御協力を頂きました。ここに感謝致します。

参考文献 1) S. Yabukami *et al.*, *J. Magn. Soc. Jpn.*, 38, (2014) 25.

逆磁歪効果型薄膜歪センサの振動センサへの応用

久保 結人, 荒井 薫, 栢 修一郎, 石山 和志
(東北大学 電気通信研究所)

Application of strain sensor using inverse-magnetostriction effect to vibration sensor

Y. Kubo, K. Arai, S. Hashi, K. Ishiyama
(RIEC, Tohoku Univ.)

はじめに

近年、老朽化が進行した建造物の数は増加しており、建造物の損傷や崩落の危険性が高まっている。しかし、その点検方法は目視やハンマー等による打音点検など人の手による検査が中心となっている[1]。本研究では、現在広く行われている人の手による打音検査に代わる、橋梁等の微小振動を検出できる超高感度振動センサの開発を目標としている。

これまで、磁歪膜と導体層の積層構造からなる逆磁歪効果を利用した歪センサの検討を行ってきた[2]。このセンサは、センサ素子への歪印加時の磁化変化に伴う透磁率変化を、高周波通電時の素子のインピーダンス変化として検出するものであった。今回、その歪センサの振動センサへの応用を目指し、歪印加時の透磁率変化に伴う高周波電流通電時の素子の位相変化に着目し、その位相変化を電圧変化として検出できる回路を作成した。さらに、Fig. 2のように、歪センサを片もち梁構造とし、外部振動に伴い片もち梁が振動する構造とした。これにより、外部振動による片もち梁の振動で、素子に歪が印加され、透磁率変化に伴う位相変化を電圧として検出できるような振動検出システムを構成した。本報告では、その振動検出の特性について報告する。

実験方法

素子の作製には RF スパッタ、リフトオフ法を用いた。Fig. 1 に示すように、非磁性金属層の Mo 膜を磁性層の $\text{Fe}_{72}\text{Si}_{14}\text{B}_{14}$ 膜で挟み込んだ積層構造にした。また、Mo、 $\text{Fe}_{72}\text{Si}_{14}\text{B}_{14}$ とともに同一の 1 ターンミアンダ形状に成膜した。Si ウェハの厚みは $200\mu\text{m}$ 、Mo の膜厚は $2.0\mu\text{m}$ 、 $\text{Fe}_{72}\text{Si}_{14}\text{B}_{14}$ の膜厚は $0.7\mu\text{m}$ とした。成膜後に 360°C 、 240kA/m の回転磁場中のみで熱処理を行い、積層膜への残留応力を利用して磁性膜長手方向に異方性を誘導した。

Fig. 2 に振動検出実験の模式図を示す。素子の電極側をジグ上に固定し、片もち梁状にして、加振器によりジグを加速度 2.5m/s^2 、 5.0m/s^2 の正弦波で振動させた。Si ウェハ先端には、機械的共振周波数を下げるために 1g の錘を固定した。また、素子へのキャリア通電電流の周波数は 150MHz とし、位相検出回路を用いて振動を検出した。

実験結果

加振時の検出電圧の周波数特性を Fig. 3 に示す。加振周波数を 20Hz ~ 200Hz まで変化させ、位相検出電圧は peak to peak 電圧とした。加振周波数 150Hz で検出電圧が最大になり、加振加速度 5.0m/s^2 において、 0.3V の検出電圧を得た。この点は片もち梁の機械的共振点と考えられる。今回の実験で、片もち梁型の歪センサが振動センサへ応用可能であることが明らかとなった。今後、さらなる振動検出感度の向上のため、片もち梁構造やセンサ素子構造を検討する。

謝辞

本研究の一部は、国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) の「先端計測分析技術機器開発プログラム」による支援によって行われた。

参考文献

- [1] 国土交通省：「道路の老朽化対策の本格実施に関する提言」(2014)。
- [2] Y. Suwa, et al., IEEE Trans. Magn. 46, 666 (2010)。

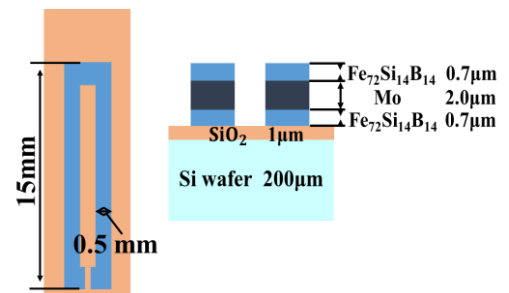


Fig. 1 Schematic diagram of the sensor element.

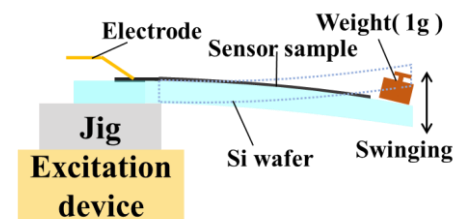


Fig. 2 Experimental setup of vibration detection.

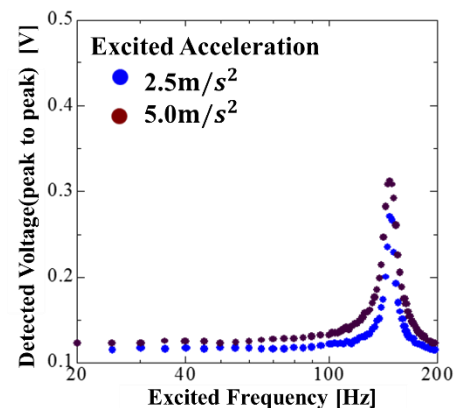


Fig. 3 Frequency characteristic of detected voltage in excitation.

導体層を用いた積層型 MI センサ素子の検討

楠 洸介, 横山 広雄, 栢 修一郎, 林 禎彰, 石山 和志
(東北大学電気通信研究所)

Study on Lamination Structured Magneto-Impedance Sensor Using Conductive Layer

K. Kusunoki, H. Yokoyama, S. Hashi, Y. Hayashi and K. Ishiyama
(Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University)

1. はじめに

高周波キャリア電流を通電した高透磁率磁性材料の外部磁界印加時の透磁率変化を介し、大きなインピーダンス変化を得る磁界センサは、生体磁気計測などへの応用を目指して、さらなる高感度化の研究が進められている^{1,2)}。磁性膜に直接キャリア電流を通電する場合、高周波帯域での表皮効果を利用するため、素子の寸法にもよるが、数百Ω以上の高インピーダンスになりキャリア電流量によっては熱雑音の影響を受け易く感度低下の恐れがある³⁾。そこで本研究では、キャリア通電用に低抵抗率の導体層を設けた積層構造の磁界センサ素子について高感度化の検討を行った。

2. 実験方法

素子の作製には RF スパッタ、リフトオフ法を用いた。Fig. 1 に示すように、導体層として 1 ターンのミアンダ形状の Mo(モリブデン)膜を、また、その上下に長方形の $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$ アモルファス磁性層(幅 100 μm , 長さ 5 mm)をガラス基板上に成膜した。膜厚は導体層, 磁性層ともに 1.0 μm とした。成膜後に 400 $^{\circ}\text{C}$ で回転磁界(3 kOe)および、静磁界(3 kOe)を印加して熱処理を行い、素子幅方向に異方性を誘導した。また、インピーダンスの計測にはネットワークアナライザを用いた。

3. 結果

Fig. 3 に幅 100 μm の積層構造型センサへ 200 MHz のキャリア電流を通電した際の外部磁界-インピーダンス特性を示す。外部磁界は素子長手方向へ -16 Oe から +16 Oe まで印加した。約 6 Oe 付近で 37.6 Ω のインピーダンスの最大値を示し、概ね低インピーダンスを実現できている。この磁界印加範囲におけるインピーダンスの変化量は最大で 23.6 Ω で、変化率は約 169 % となった。外部磁界が 5 ~ 6 Oe の範囲で最も急峻なインピーダンス変化を示し、その傾きは約 35.4 Ω/Oe となった。また、約 -2 ~ 2 Oe の範囲に緩やかなインピーダンスの変化が見られる。これは、Fig. 3 に示す磁区構造写真において、素子長手方向への印加磁界が大きくなるほど、還流磁区が成長し、キャリア電流から発生する励磁磁界に対して直交する成分が増加したことが原因と考えられる。これらの結果を考慮し、Kerr 効果顕微鏡による磁界印加時のセンサ素子の磁区構造変化の観察、およびインピーダンスの測定結果から、導体層を設けた磁界センサ素子のさらなる感度向上のための素子構造を検討する。

参考文献

- 1) H. Uetake, et al., IEEE Trans. Magn., 51, 4005003 (2015).
- 2) H. Kikuchi, et al., J. Magn. Magn. Master., 420, 269 (2016).
- 3) H. Mawatari, et al, J. Magn. Soc. Jpn., 27, 414-418 (2003).

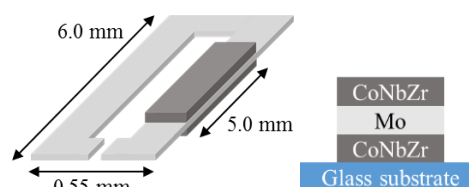


Fig. 1 Schematic diagram and cross sectional view of the sensor

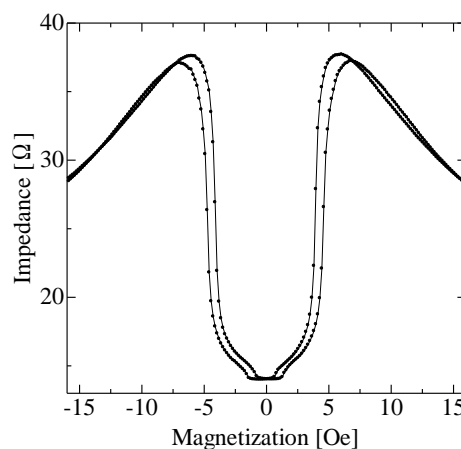


Fig. 2 Impedance change of the sensor element

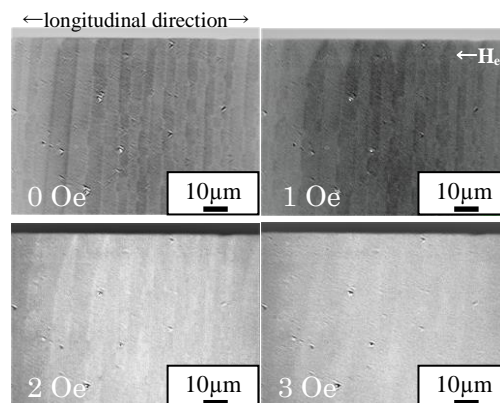


Fig. 3 Domain structure of the sensor element

MI センサによる複合磁気ワイヤの磁壁移動速度の測定

棚村祐悟、星山弘樹、竹渕哲聡、藤永直矢、山田努、竹村泰司
(横浜国立大学)

Measurement of domain wall velocity in magnetic wire using MI sensor
Yugo Tanamura, Hiroki Hoshiyama, Akitoshi Takebuchi, Naoya Fujinaga,
Tsutomu Yamada, Yasushi Takemura
(Yokohama National University)

はじめに

熱ひねり加工を施した FeCoV 複合磁気ワイヤは、大バルクハウゼンジャンプと呼ばれる高速な磁壁移動によって急峻な磁化反転を生じ、検出コイルを設置することでこの磁化反転からパルス出力が得られる。この出力は無電源で得られることや外部磁界の時間変化に依存しないなどの特徴を有しており、エネルギー・ハーベスティング素子への応用が着目されている。本研究では、MI センサを用いて複合磁気ワイヤに生じる磁壁の移動速度を測定した。

実験方法

本研究では、長さ 20 mm の FeCoV 複合磁気ワイヤを用いた。二つの MI センサ(AICHI MI 社 MI-CB-1DH)をワイヤの近傍に置き、励磁用磁石をワイヤに対して水平に近づけ(Fig.1)、磁壁移動により生じる漏れ磁束のピークの時間差から磁壁移動速度を計算した。一方向の磁壁を観測するために励磁位置に対して片一方に二つの MI センサを配置した。また励磁位置を変え磁壁移動速度の変化を測定した。

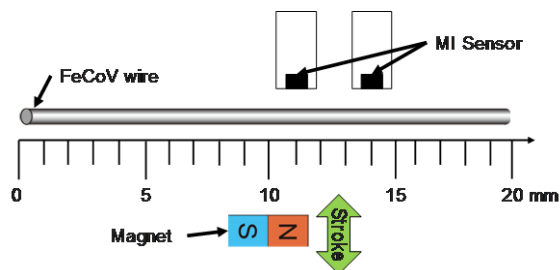


Fig. 1 Configuration of magnetic wire, magnet and MI sensor.

実験結果

ワイヤの中心を励磁し、検出コイルを用いた磁壁移動速度の測定結果を Fig.2 のようになる。これは同じ励磁位置では励磁磁場を変化させても同じ磁壁移動速度が得られることを示す³⁾。次に MI センサを用いた測定結果を Fig.3 に示す。励磁位置がワイヤの中心に近づくにつれて磁壁移動速度が上昇することが得られた。検出コイルを用いた場合においても移動速度が上昇していることが得られた。MI センサを用いることで検出コイルと同様に磁壁移動速度を測定できることを示した。

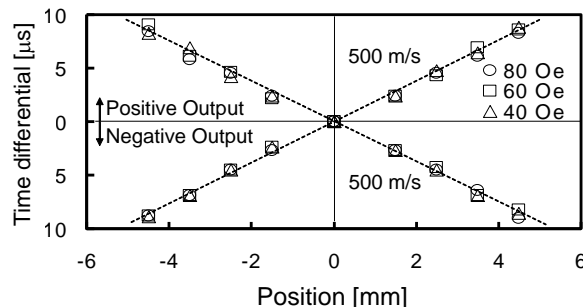


Fig. 2 Time difference measured by detection coil.

具体的な励磁方法や MI の位置等の詳細は当日発表する。

謝辞：FeCoV 磁性線は、ニッコーシ株式会社様のご好意により、提供いただいたものです

参考文献

- 1) J. R. Wiegand, et al., U.S. Patent 3,820,090, 1974.
- 2) R. Malmhall, K. Mohri, F. B. Humphrey, T. Manabe, H. Kawamura, J. Yamasaki, I. Ogasawara, *IEEE Trans. Magn.* **23**, 3242 (1987).
- 3) H. Tanaka, et al., *IEEE Trans Magn*, 43(6), 2399, 2007.

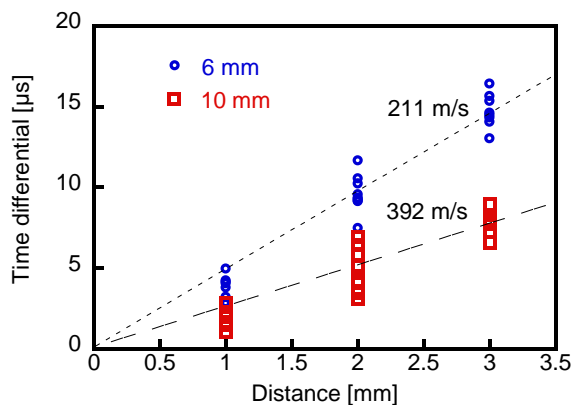


Fig. 3 Time difference measured by MI sensor.

Wiegand パルスを用いたエネルギーハーベスティングによる ホール素子の無電源駆動

藤永直矢、竹渕哲聡、山田努、竹村泰司
(横浜国立大学)

Battery-less operation of Hall sensor by energy harvesting from a single Wiegand pulse
Naoya Fujinaga, Akitoshi Takebuchi, Tsutomu Yamada, Yasushi Takemura
(Yokohama National University)

はじめに

ひねり加工を施した FeCoV ワイヤ (以下、複合磁気ワイヤと記述する) に、一定以上の強度の磁場を印加すると大バルクハウゼンジャンプを伴う急峻な磁化反転が生じる^{1,2)}。検出コイル等を用いることによりこの磁化反転からパルス電圧出力を得ることができ、Wiegand パルスと呼ばれている。このパルス出力は印加磁場の時間変化率に依存しないといった特徴を持つために、回転センサ等へ応用されてきた。近年、集積回路への給電が可能との報告もなされている³⁾。我々はエネルギー・ハーベスティング素子としての応用に着目し、本稿では複合磁気ワイヤを電源として用いた場合のホール素子の無電源駆動を試みた。

実験方法

長さ 20 mm、線径 0.25 mm の複合磁気ワイヤに 3000 turn の検出コイルを巻いた。ローターに装着した $3 \times 3 \times 5 \text{ mm}^3$ の NdFeB 磁石を複合磁気ワイヤ近傍で動かすことで励磁を行い、磁化反転を誘導した⁴⁾。複合磁気ワイヤの磁化反転によって検出されたコイルのパルス出力をホール素子 (THS119, Toshiba) の駆動電源として使用した。評価を行うために、ホール素子に 100-300 mT の直流磁場を印加し、複合磁気ワイヤを電源として用いた場合の出力波形を観測した。また複合磁気ワイヤを電源として用いた場合と直流安定化電源を用いた場合でのホール素子の出力特性の比較を行った。

実験結果

複合磁気ワイヤのパルス出力を電源として用いた場合と直流安定化電源を用いた場合のそれぞれのホール素子の出力特性を Fig. 1 に示す⁵⁾。この時、ホール素子に入力される電流最大値はどちらも 1.3 mA である。ホール素子の出力波形は入力波形と同様な波形が観測され、素子に印加する直流磁場を変化させると、磁場の大きさに対応した出力波高値が観測された。複合磁気ワイヤを電源として用いた場合においても、直流磁場に対して、ホール素子の出力電圧が比例であることが観測された。これらの結果より複合磁気ワイヤを用いたホール素子の無電源駆動が確認された。その他のセンサやデバイス、IoT 分野でのエネルギー・ハーベスティング素子としての応用が期待される。

謝辞：FeCoV 磁性線は、ニッコーン株式会社様のご好意により、提供いただいたものです。

参考文献

- 1) J. R. Wiegand, and M. Velinsky, U.S. Patent 3,820,090, 1974.
- 2) A. Matsushita, S. Abe, *IEEJ Trans. A*, **99**, 46, 1979.
- 3) <https://www.ichaus.de/product/iC-PM>
- 4) A. Takebuchi, T. Yamada, and Y. Takemura, *J. Mag. Soc. Jpn.*, **41**, 24, 2017.
- 5) Y. Takemura, N. Fujinaga, A. Takebuchi, and T. Yamada, *IEEE Trans. Magn.*, accepted for publication, 2017.

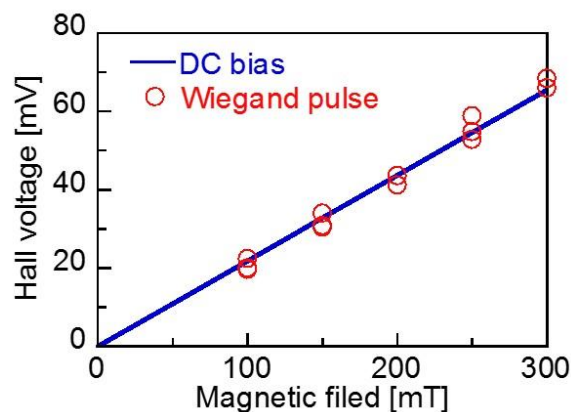


Fig. 1. Hall voltages depending on the intensity of the applied magnetic field. The Hall sensor was operated by conventional DC bias current at 1.3 mA or a single Wiegand pulse voltage⁵⁾.

複合磁気ワイヤを用いたエネルギーハーベスティング素子のフェライトコアによる高出力化

酒井貴史、竹渕哲聡、山田努、竹村泰司
(横浜国立大学)

Higher output voltage from energy harvesting element using compound magnetic wire with ferrite core
Takafumi Sakai, Akitoshi Takebuchi, Tsutomu Yamada, Yasushi Takemura
(Yokohama National University)

はじめに

磁気ワイヤ等における大バルクハウゼンジャンプを伴う急峻な磁化反転は、検出コイルにパルス電圧を誘起する¹⁻³⁾。この電圧を出力とする Wiegand センサが広く研究されてきた¹⁻³⁾。熱ひねり加工処理を施した複合磁気ワイヤにおいても、外部電力が不要であり、外部磁界の時間変化に依存しないパルス出力が得られるなどの特徴を有しており、エネルギーハーベスティング素子への応用が着目されている^{4,5)}。本稿では、複合磁気ワイヤの両端部にフェライトコアを設置したことによる出力の変化を観測したので報告する。

実験方法

FeCoV 複合磁気ワイヤに 200 turn の検出コイルを巻き、その外側を覆うように交流磁場励磁用コイルを設置した。励磁用コイルに電流を流し、40~80 Oe でワイヤ中央を励磁した。その後、フェライトコア(ビーズ)を両端に1つずつ設置して行い、出力電圧と出力を得るために必要な磁場強度の変化を測定した。

実験結果

ワイヤを交流励磁した際のパルス出力電圧を Fig. 1 に示す。フェライトビーズを設置した場合、設置していない場合よりも高い波高値が観測された。これは、フェライトビーズによってワイヤ端部まで励磁され、ワイヤ内部の反転する磁化の量が増加したため、出力が増加したと考えられる。Figure 2 は、パルス出力が生じる、即ち複合磁気ワイヤの磁化反転が生じる印加磁場強度を示している。フェライトビーズを設置すると、出力を得るために強い磁場を印加する必要があることが観測された。詳細は当日報告する。

謝辞：FeCoV 磁性線は、ニッコーシ株式会社様のご好意により、提供いただいたものです

参考文献

- 1) J. R. Wiegand and M. Velinsky, U.S. Patent 3,820,090, (1974).
- 2) R. Malmhall, K. Mohri, F. B. Humphrey, T. Manabe, H. Kawamura, J. Yamasaki, I. Ogasawara, *IEEE Trans. Magn.* **23**, 3242, (1987).
- 3) S. Abe and A. Matsushita, *IEEE Trans. Magn.*, **31**, 3152, (1995).
- 4) R. Serizawa, T. Yamada, S. Masuda, S. Abe, S. Kohno, F. Kaneko, Y. Takemura, *Proc. IEEE Sens. 2012*, 1878, (2012).
- 5) A. Takebuchi, T. Yamada, Y. Takemura, *J. Mag. Soc. Jpn.*, **41**, 34, (2017).

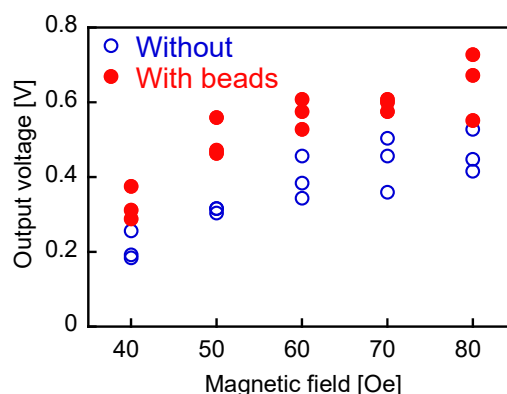


Fig. 1 The output voltage measured by detection coil.

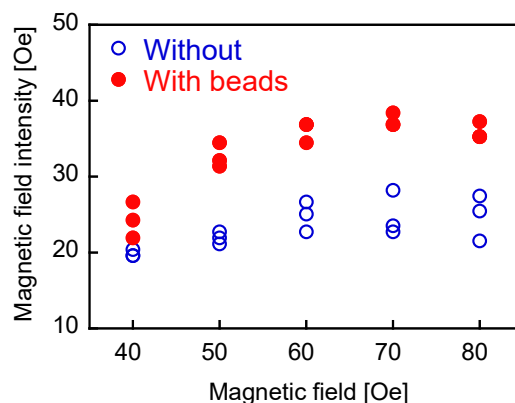


Fig. 2 The magnetic field intensity for magnetization reversal of magnetic wire.

磁気ワイヤを用いた鼓動検出等が可能な無電源 0.6 mm 振動センサ

松澤一平、竹渕哲聡、山田努、竹村泰司
(横浜国立大学)

0.6 mm vibration sensor without power supply using magnetic wire for detection of heart beat

Ipeei Matsuzawa, Akitoshi Takebuchi, Tsutomu Yamada, Yasushi Takemura
(Yokohama National University)

はじめに

FeCoV 複合磁気ワイヤは熱ひねり加工を施すことにより、外部磁場の変化速度に依存せず大バルクハウゼンジャンプと呼ばれる急峻な磁化反転を起こす。この磁化反転は、検出コイルによりパルス出力として取り出すことができ、発電素子として用いることが可能となる。今回我々は、微小振動を検出可能な無電源センサとしての応用に着目した。本稿では、パルス出力を得るために必要な最小ストローク量を調査することを目的とし、磁石の大きさやワイヤ-磁石間距離の変化に対する最小ストローク量を測定した。

実験方法

長さ 11 mm、0.25 mm 径の FeCoV 複合磁気ワイヤに巻数 300 turn の検出コイルを巻きつけた。ワイヤの長手方向に対し、励磁用磁石の着磁方向が垂直になるように配置し、ワイヤに対して平行に励磁用磁石をストロークさせた(Fig. 1)。このとき、出力を得られる最小ストローク量 Stroke [mm]を測定した。同様なことを、ワイヤ-磁石間距離 Distance [mm]と磁石の着磁方向長さを変えて行った。

実験結果

上記の実験結果を Fig. 2 に示す。Distance が小さいほど、Stroke が小さくなり、着磁方向に長さを持つ磁石の Stroke が小さくなる結果を得た。ワイヤの出力に必要な磁場強度を H_r [Oe]としたとき、ワイヤの長手方向に $-H_r$ と H_r を交互に印加する必要がある。Distance や磁石の着磁長さによって $-H_r$ と H_r の距離が変わるため、Stroke が変化したと考えられる(Fig. 3)。同じ Distance において、Fig. 3 に示すように着磁方向に長い磁石のほうが、 $-H_r$ と H_r の距離が近くなり、小さい振動を検出することができる。

最後に、1 mm 以下の最小ストローク量に注目して測定を行った結果、 $4 \times 4 \times 12 \text{ mm}^3$ において最小ストローク量 0.6 mm で出力を観測することができた。よって、1 mm 以下の微小振動による無電源センサとしての有用性が示された。

謝辞：FeCoV 磁性線はニッコーシ株式会社様のご好意により、提供いただいたものです。

参考文献

- 1) J. R. Wiegand, et al., U.S. Patent 3,820,090, 1974.
- 2) S. Abe, et al., IEEE Trans Magn., 33, 3916, 1997.
- 3) A. Takebuchi, T. Yamada, Y. Takemura, J. Mag.Soc. Jpn., 41, 34, 2017.

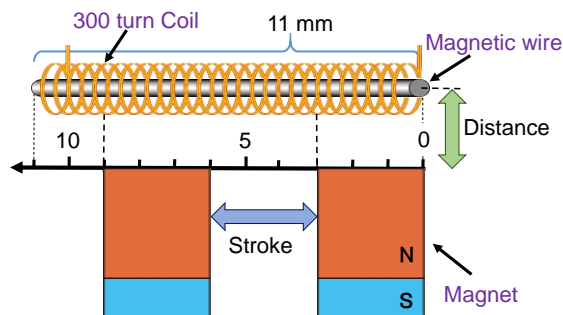


Fig. 1 Configuration of magnetic wire, detection coil and magnet.

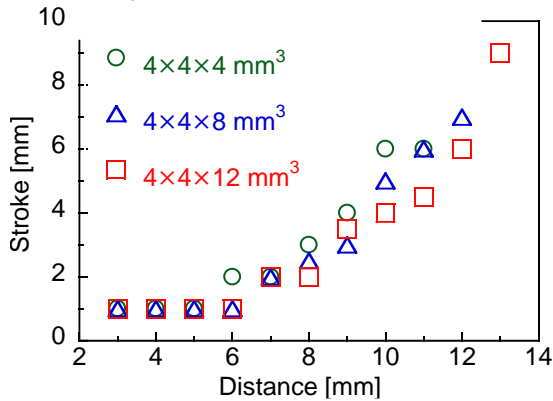


Fig. 2 The length of minimum stroke depending on the distance between magnetic wire and magnet.

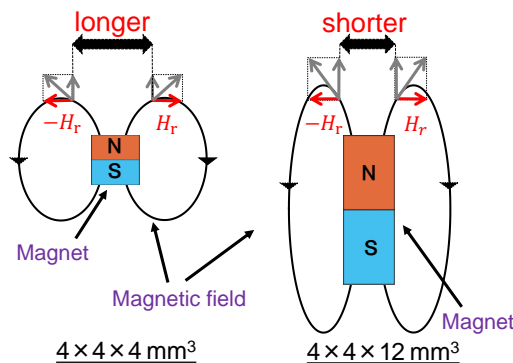


Fig. 3 The Magnetic field about each magnet.

パルスレーザバースト変調による高周波回路素子の近傍磁界分布測定

松本悠人, 立岡大青, 荒井薫, 栢修一郎, 林禎彰, 石山和志
(東北大学電気通信研究所)

Measurement of near magnetic field around high frequency circuit element
using burst modulated pulsed laser

Y. Matsumoto, D. Tatsuoka, K. Arai, S. Hashi, Y. Hayashi, K. Ishiyama
(RIEC Tohoku University)

1. はじめに

高周波近傍磁界計測用プローブとして一般的にループコイルが用いられている[1]が, 金属製のため本来の磁界分布を乱してしまう[2]. そのため本研究では, 金属プローブに比べ磁界を乱しにくい磁気光学結晶のガーネットとパルスレーザを利用し, ストロボ法により交流磁界の位相情報を含んだ低侵襲な高周波近傍磁界計測システム[3]について検討を行っている.

これまでの原理検証実験では被測定磁界側をバースト変調させ高感度な測定を行ってきた[3]が, 測定対象が実際の集積回路等の場合, この方法は適応困難である. そこでパルスレーザ側をバースト変調し, レーザ発振と被測定磁界の相対位相を制御し差分計測する手法を提案し, MSL などの近傍磁界分布測定などをこれまで行ってきた[4].

本報告では, 回路基板上の高周波パワーアンプ近傍の磁界分布をパルスレーザバースト変調方式で測定し, 更なる高感度な測定を目指しノイズの要因等を検討した.

2. 実験方法

Fig. 1 にパルスレーザバースト変調方式での装置構成を示す. パルス幅が約 40ps のパルスレーザを 100MHz で発振させ, 光路に 7.7kHz の回転チョッパを挿入してバースト変調させた. 測定対象には Fig. 2 の回路基板を用い, 高周波パワーアンプに 1GHz, 10dBm の RF 信号を入力したときのアンプ近傍から発生する磁界を計測した.

3. 実験結果

パワーアンプ近傍 5mm 四方の磁界分布計測結果を Fig. 3 に示す. 素子構造からも妥当な磁界分布計測結果と確認できる. ノイズの要因として, チョッパの回転数のジッタが考えられるが, 最適な変調方法や変調器の検討により, 更なる高感度な測定が期待できる.

謝辞
本研究に用いたガーネットをご提供いただいた長岡技術科学大学石橋隆幸教授に深く感謝いたします.

本研究は東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究「磁気光学効果を利用した磁界計測システム」の成果の一部である.

参考文献

- 1) R. Paul: Introduction to Electromagnetic Compatibility 2nd edition, p. 10-11, John Wiley, NewYork (2006).
- 2) M. Takahashi, et al., J. Appl. Phys. 107, 09E711 (2010).
- 3) H. Nasuno, et al., IEEE Trans. Magn., 47, 4011 (2011).
- 4) 松本, 他, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-16-216, 17 (2016).

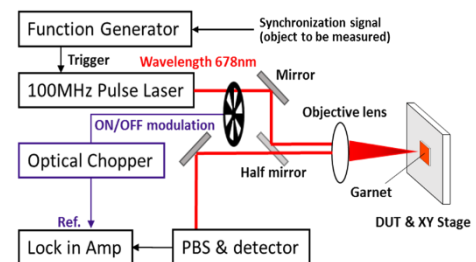


Fig. 1 Configuration diagram of pulsed laser burst modulation



Fig. 2 DUT "RF power amplifier"

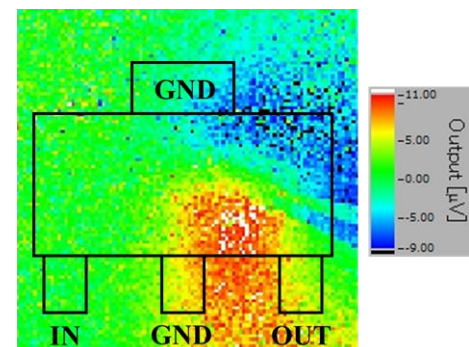


Fig. 3 Measurement result

磁性薄膜における磁気ひずみ新規高周波計測法の開発

遠藤 恭¹, 森 修², 薮上 信³, 内海 良一², 島田 寛²

(¹ 東北大, ²(株)東栄科学産業, ³ 東北学院大)

Development of New Measurement Method for Magnetostriction of Magnetic Thin Film

Yasushi Endo¹, Osamu Mori², Shin Yabukami³, Ryoichi Utsumi², Yutaka Shimada²

(¹ Tohoku Univ., ² Toei Scientific Industrial Co.,Ltd, ³ Tohokugakuin Univ.)

はじめに

近年, 磁性薄膜の磁化ダイナミクスは磁気物性から磁気デバイス応用まで幅広い分野で注目されている. この磁化ダイナミクスを理解する上で, そのダンピング定数 (α) は主要なパラメータのひとつである. 我々の研究グループではこれまでに Ni-Fe 膜や Ni-Fe-M 膜 (M: 添加元素) における α と磁気ひずみとの相関関係を明確にしてきた¹⁻³. これらのパラメータの相関関係をより詳細に把握するためには, α と磁気ひずみとを同時に計測する必要がある. 本研究では, 磁性薄膜として Ni-Fe を選択し, 高周波伝送線路型プローブを Ni-Fe 膜に近接させ, 応力負荷および無負荷による強磁性共鳴周波数の違いから飽和磁気ひずみを評価できる計測法を開発し, α との関係を検討した.

実験方法

50 nm 厚の Ni_{0.78}Fe_{0.22}(Ni-Fe)膜は, 0.15 mm 厚のガラス基板上に DC マグネトロンスパッタを用いて作製した. 作製した試料における磁気ひずみの新規高周波計測は次の通りである. 高周波伝送線路型プローブにはインピーダンス整合を考慮した 2 ポートのマイクロストリップ線路 (Microstripe Line: MSL) 型プローブを用いた. 作製した Ni-Fe 膜を湾曲した試料台に配置して引っ張り応力を付与すると, 膜内部の異方性が変化する. この応力負荷された Ni-Fe 膜表面に, MSL プローブを近接配置して, 強磁性共鳴周波数 (f_{res}) を計測する. 応力負荷時と無負荷時での Ni-Fe 膜の f_{res} の違いから, その飽和磁気ひずみを求める. なお, 本計測の際には, Ni-Fe 膜の磁化困難軸方向を MSL の幅方向と平行にする.

結果および考察

図 1 は応力負荷の有無による 50 nm 厚の Ni-Fe 膜における $\text{Re}[\Delta s_{21}]$ の周波数特性である. 与えた歪みは厚さの変化が約 0.329 mm 程度であり, 曲率半径は約 0.189 m と算出した. 応力負荷による f_{res} の変化は, 外部磁界強度の増加にともない応力の向きに関係なく 123 MHz から 58 MHz となった. これらの変化は, 薄膜容易軸方向へ応力負荷により発生する誘導磁気異方性によるものである. すなわち, 薄膜容易軸方向へ引っ張り応力を与えると f_{res} が高周波帯へ移動している. これらの値を用いて飽和磁気ひずみを算出すると, 2.7 ppm であり, 光てこ法により評価した値 (5 ppm)¹ とほぼ同等である. また, α に関しては, 応力無負荷時には 50 Oe 以上の外部磁界ではほぼ一定となった. その値は 0.0075 である. この値はバルクの結果と一致している. 当日, 他の Ni-Fe 膜の結果について報告する.

謝辞

本研究の一部は, 宮城・仙台富県チャレンジ応援基金事業の成果である. 本研究の一部は, 東北大学スピントロニクス学術連携研究教育センター, 東北大学国際集積エレクトロニクス開発センターの支援のものと行われた. また, 本研究の一部は, 科研費基盤研究 (B) (No. 26289082, No. 17H03226), 科研費特別研究員奨励費 (No. 17F17070) の補助のもとで行われた.

参考文献

1) Y. Endo et al., J. Appl. Phys., 109, 07D336 (2011)., 2) Y. Endo et al., IEEE Trans. Magn., 47, 3324 (2011)., 3) Y. Endo et al., IEEE Trans. Magn., 48, 3390 (2012).

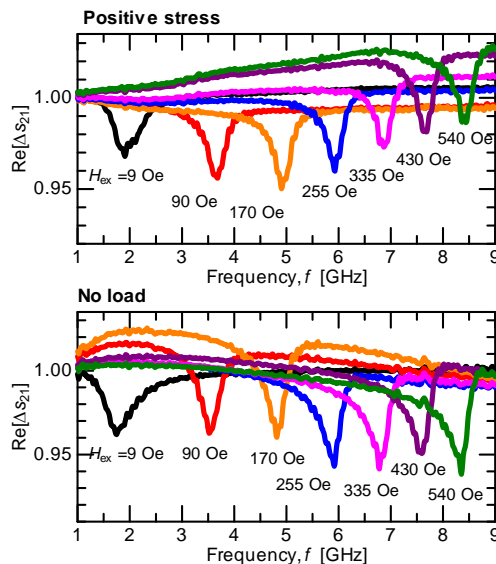


Fig. 1. Frequency dependence of FMR spectrum in 50-nm thick Ni-Fe film with and without stress loading.

ウェハレベルの磁性薄膜高周波特性評価法の開発

森 修, 遠藤 恭*, 島田 寛*, 藪上 信**, 内海 良一
(東栄科学産業, *東北大学, **東北学院大学)

Development of magnetic thin film high frequency characteristic evaluation method of wafer

O. Mori, Y. Endo*, Y. Shimada*, S. Yabukami**, R. Utsumi

(Toei Scientific Industrial co., ltd, *Tohoku University, **Tohoku Gakuin University)

1 はじめに インピーダンス整合を考慮したマイクロストリップ型プローブをウェハ上に製膜された磁性膜に近接させて計測する透磁率評価法と同時に、磁性膜に応力負荷による磁気共鳴周波数の変化から磁歪も評価できる高周波特性計測法を開発した。

2 計測方法 500 nm 厚の Co-Zr-Nb 膜の作製には RF スパッタを用いた。ウェハは 0.2 mm 厚の 4 インチ Si 基板を用いた。また、応力負荷した磁歪の新規計測は下記の通りである。高周波伝送線路型プローブにはインピーダンス整合を考慮した 2 ポートのマイクロストリップ線路 (Microstripe Line : MSL) 型プローブ¹⁾を用いた。Fig. 1 のように、作製した Co-Zr-Nb 膜を円弧状のアルミ治具に沿わせて固定し、引っ張り応力を付与すると、膜内部の異方性が変化する。この応力負荷された Ni-Fe 膜上部に、MSL プローブを、ポリスチレンフィルムを介して近接配置して、Co-Zr-Nb 膜における強磁性共鳴周波数 f_r の変化を評価する。なお、本計測の際には、Co-Zr-Nb 膜の磁化困難軸方向を MSL の幅方向と平行にする。

3 計測結果 Fig. 2 は応力負荷の有無による 500 nm 厚の Co-Zr-Nb 膜の磁化困難軸方向へ RF 磁界を印加した際の S_{21} から等価的な抵抗成分である $(1-S_{21})/S_{21}$ 実部を評価した結果である。破線は無負荷時の状態、実線は応力負荷時の状態を示している。応力負荷時のウェハの曲率は 278 mm であった。応力負荷による f_r の変化は、外部磁界強度の増加にともない 30 MHz から 4 MHz へと低周波数帯域へシフトした。これらの値と(1)式を用いて磁歪 λ_s を算出した。

$$(f_{r+}^2 - f_{r0}^2)/f_{r0}^2 = \left(\frac{3\lambda_s h_s E_f}{2rM_s} \right) / (H_{kf} + H_{ex}) \quad (1)$$

ただし、 f_{r0} は無負荷時の強磁性共鳴周波数、 f_{r+} は応力負荷時の強磁性共鳴周波数、 r は曲率半径、 M_s は飽和磁化、 H_{ex} は印加した外部磁界、 H_{kf} は薄膜の内部磁界、 h_s はウェハ厚さ、 E_f は薄膜のヤング率である。Fig. 3 は $(f_{r+}^2 - f_{r0}^2)/f_{r0}^2$ と $1/(H_{kf} + H_{ex})$ の関係をプロットしたグラフである。これらのパラメータは線形

関係となっていて、(1)式によるフィッティングが可能である。したがって、フィッティングにより得られた傾きが $(3\lambda_s h_s E_f / 2rM_s)$ にあたるので、各パラメータを用いて磁歪 λ_s を算出したところ、 -7.2×10^{-7} であった。また、短冊形ガラス基板に同条件で作製した Co-Zr-Nb 薄膜に関して光てこ法により磁歪を測定したところ、その値は -1.3×10^{-6} であった。このように、新規に開発した計測法において得られた結果は、光てこ法と同等の結果となった。当日は、他の膜厚の試料の評価に加えて、磁歪と透磁率の同時測定評価を行った結果についても紹介する。

謝辞 Co-Zr-Nb 膜に関しては、東北大学電気通信研究所の石山和志教授、栢修一郎准教授にご提供いただきました。ここに深謝します。本研究の一部は宮城・仙台富県チャレンジ応援基金事業の成果である。

参考文献 1) S. Yabukami, K. Kusunoki, H. Uetake, H. Yamada, T. Ozawa, R. Utsumi, T. Mori izumi, Y. Shimada, "Permeability Measurements of Thin Film Using a Flexible Microstrip Line-Type Probe Up To 40 GHz", *Journal of the Magnetism Society of Japan*, Vol. 41, No. 2, pp. 25-28 (2017).



Fig. 1 Schematic of measurement system.

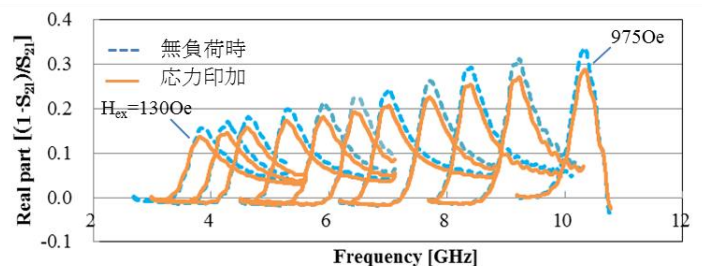


Fig. 2 FMR of CoZrNb film (4inch Wafer, 500nm thick).

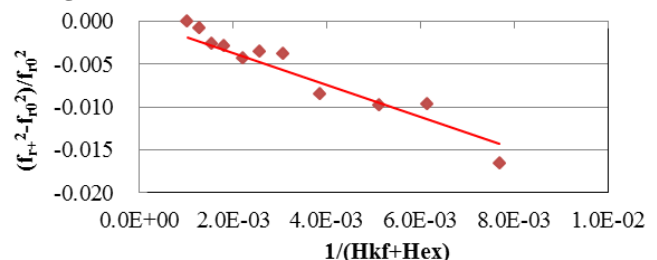


Fig. 3 Magnetic field dependence of resonance frequency.

フェライト装荷逆L型広帯域UHFアンテナの等価回路

三枝淳平、篠田航平、米原正道、中原和宏、栗巣普揮、山本節夫
(山口大)

Equivalent circuit of ferrite loaded inverse L type wide band UHF antenna
J. Mieda, K. Shinoda, M. Yonehara, K. Nakahara, H. Kurisu, and S. Yamamoto
(Yamaguchi Univ.)

はじめに

筆者らは既に、スマートフォンに内蔵可能な地上波デジタルTV放送受信アンテナを提案・試作し、470 MHz から610 MHzに至る非常に広い周波数帯域にわたって実用的な性能が得られることを実証した¹⁾。本研究ではそのアンテナ(フェライトを装荷した逆L型アンテナ)の等価回路について調査した。

アンテナの構造

スマートフォンに内蔵するアンテナは、アンテナエレメントに基板 GND も含めた全体で、ダイポールアンテナ的に動作する。Fig.1 に示すように、スマートフォンの基板 GND 面に、2 本のスリットを互いに逆向きに入れることによって、アンテナ給電部から見たときの基板 GND 長を確保している。誘電体基板上にパターンニングしたアンテナエレメントの上に、フェライト棒を置く(これをサンドイッチ型と称している)ことによって、波長短縮効果によって短いアンテナエレメント長で共振するように設計している。フェライトとしては、(周波数 400 - 800 MHz において比透磁率 3 - 3.1, 比誘電率 4.6, 磁氣的損失 0.039 - 0.04, 誘電正接 0.022 のものを想定した。

アンテナの等価回路

電圧定在波比(VSWR)の周波数特性から、サンドイッチ型アンテナでは550 MHz から720 MHz, まで170 MHz の良好な帯域幅を発現していること、さらに、この広帯域は複共振の発現によってもたらされていることがわかった。このアンテナの動作原理を等価回路の観点から検討した。一般的なダイポールアンテナは、等価回路に置き換えるとRLC直列共振回路で表現される。前述のサンドイッチ型アンテナの2.4 GHzまでのスミスチャートをFig.2に示す。スミスチャートの中心部付近に複共振による滞留がみられる。このアンテナの等価回路は、Fig.3のように、ダイポールアンテナの等価回路に並列インダクタンスが挿入された形となることがわかった。このため、動作としては直列共振の途中で並列共振が起きており、この多モード共振のため複共振の滞留が存在している。提案アンテナの広い帯域幅はこの複共振の活用によって達成された。

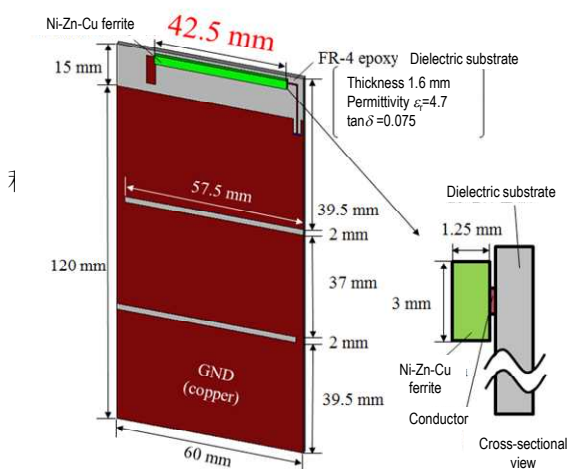


Fig.1 Structure of antenna.

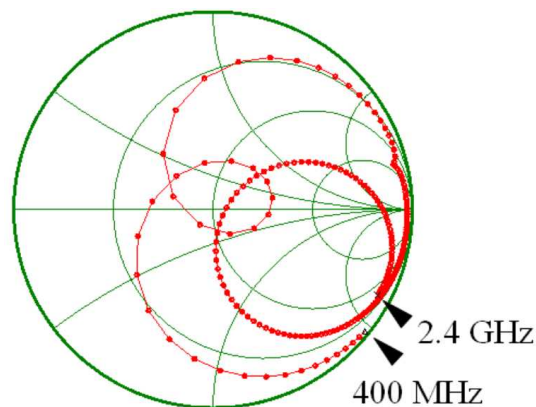


Fig.2 Smith chart of the antenna.

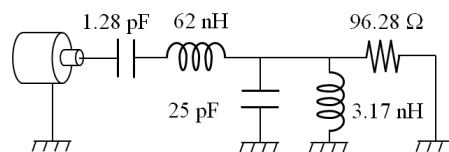


Fig.3 Equivalent circuit of the antenna.

MSL で測定した短冊試料の複素透磁率の反磁界補正

武田 茂, 山崎真之介*

(有) Magnontech, *キーコム (株)

Demagnetization correction of complex permeability of magnetic slab measured by MSL

S. Takeda, and S. Yamasaki*

(Magnontech, Ltd., *KEYCOM Corp.)

はじめに これまで、我々は短絡伝送線路を用いて複素透磁率を測定する方法を報告してきた 1)。これには大きく分けて、短絡同軸線路と短絡マイクロストリップ線路 (MSL) の二種類がある。前者の試料はトロイダル形状であり、後者の試料は短冊試料である。前者は円周方向の反磁界は無視できるが、後者は試料端の反磁界の影響を強く受ける。この反磁界補正の方法の概要はすでに ICF11 で報告した。今回、測定帯域を拡大し、精度を上げ、より微細構造が議論できるようになったので報告する。

測定器具 Fig.1 に短絡同軸線路を、Fig.2 に短絡マイクロストリップ線路の概略構造断面図を示す。前者はトロイダル試料($a=3\text{mm}\phi$, $b=7\text{mm}\phi$, $l_1=0.33\text{mm}$)が内外導体に緊密に接触した状態で挿入されている。後者は短冊状試料($l_2=1\text{mm}$, $w=16\text{mm}$, $d=0.33\text{mm}$)が MSL の短絡部の角の部分に固定される。それぞれの試料は厚み 0.33mm の同じ NSS (Noise Suppression Sheet) から切り出されたものであり、同じ物性値を持っている。これらの器具の S11 から実効透磁率を導き出す方法は既に報告した。ただし、前者の場合は、円周方向の反磁界はゼロであり、かつ結合係数 $\eta=1$ であることから絶対測定が可能である。これより導出された透磁率を真の透磁率 μ_t と仮定する。ところが、後者の場合は、短冊試料の長辺方向に磁化されるが反磁界が作用し、測定される実効透磁率 μ_e はこれを含んだものとなる。

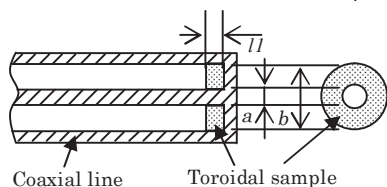


Fig.1 Short circuited coaxial line

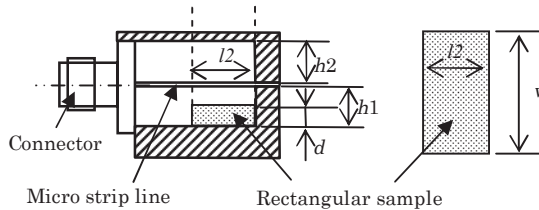


Fig.2 Short circuited micro strip line

反磁界補正理論 真の透磁率 μ_t と反磁界係数 N を含んだ透磁率 μ_e の関係は、次の式により与えられる 2)。 $\mu_t=(1-N)\mu_e/(1-N\mu_e)$ --- (1) この式は複素透磁率にも成立し、実数部、虚数部に相当する式を導くことができる。 N をパラメータに MSL の結果を計算し、同軸線路の結果に合わせるとするのが主眼である。これにより MSL で測定した場合の反磁界係数 N を逆問題として決定することができる。この N は、第一近似として材料によらないとすれば、同じ形状の未知の材料の真の複素透磁率を短冊試料の測定結果から推定することができる。これは実用上極めて有効であると考えた。

実験結果 Fig.3(a)は MSL による測定結果を、(b)は同軸線路による測定結果を示す。(c)は MSL の結果を反磁界係数 $N=0.04$ として補正し、同軸線路の結果と比較したものである。1GHz 以下の両者は極めてよい一致を示した。1GHz 以上で両者に差が見られたが、これは MSL と同軸線路の構造上の違いによるものである。精度が向上し、このような微細構造の差異が見られるようになった。

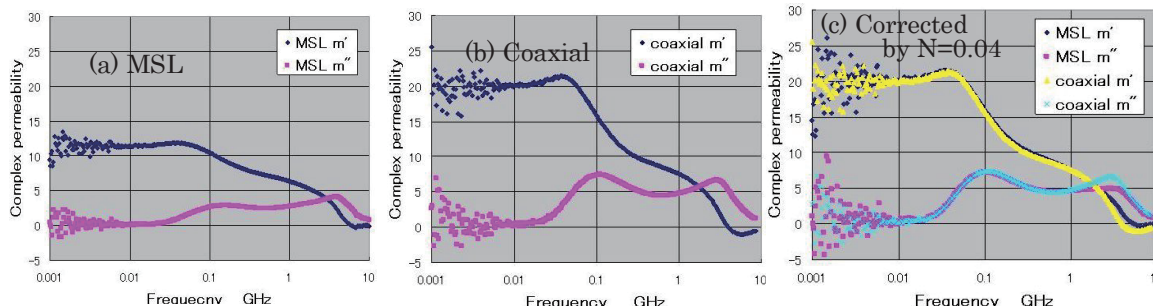


Fig.3 Measurement results ; (a) as measured by MSL, (b) as measured by Coaxial, (c) comparison between the corrected MSL result by $N=0.04$ and the coaxial result.

参考文献 1) S. Takeda, T. Hotch, S. Motomura, and H. Suzuki, *Journal of the Japan Society of Powder & Powder Metallurgy*, vol.61, (2014), No.S1, S303-307,
2) 大田恵造著「磁気工学の基礎(I)」共立出版、p.41, (1973)

負の透磁率材料を用いた円形多層線路における表皮効果抑制の検証

森山 竜太, 鮎澤 祥史, 黒川 勇太, 中山英俊
(長野工業高等専門学校)

Consideration of Skin Effect Suppression in Cylinder Multi-layer Transmission Line
with Negative Permeability Material

Ryuta MORIYAMA, Yasufumi AIZAWA, Yuta KUROKAWA and Hidetoshi NAKAYAMA
(National Institute of Technology, Nagano College)

はじめに

高周波線路では表皮効果による損失の増大が、低損失化の大きな課題である。同課題を解決する革新的手法として、負の透磁率材料を用いた表皮効果抑制に関する研究^{1),2)}が進められ、山口らの先行研究により、その抑制効果が実証された¹⁾。同研究では、薄膜積層構造による矩形断面線路の表皮効果抑制の設計指針を示したが、矩形線路は複雑な電磁界メカニズムであるため、最適設計を見出す詳細な検討は有限要素法解析等に頼らざるを得ない。本研究では、負の透磁率材料の適用効果の原理的検証のため、まずは円形断面線路を対象にして理論検証を行っており、以前に2層モデルについて報告した結果を踏まえて、多層モデルに展開して検証した結果を報告する。

負の透磁率材料を用いた高周波伝送線路理論

本研究では原理検証のため、最も単純な円形断面構造の線路を対象に、Fig. 1 に示す電磁界モデルで検討した。同心円状の多層線路の電流密度分布は、電磁界理論式の導出により式(1)で求められる³⁾。正の透磁率材料は、導電率 σ_1 、透磁率 $\mu_1 > 0$ として、負の透磁率材料は、導電率 σ_2 、透磁率 $\mu_2 > 0$ として、それぞれの内部の電流密度 $i_{z1}(r)$ および $i_{z2}(r)$ は式(1)により算出できる(なお、3層目以降も同様にして求められる)。

$$i_{z1}(r) = \frac{k_1 I_1 J_0(k_1 r)}{2\pi a J_1(k_1 a)}, \quad i_{z2}(r) = \frac{\sigma_2 J_0(k_1 a) k_1 I_1 J_0(k_2 r)}{\sigma_1 J_0(k_2 a) 2\pi a J_1(k_1 a)} \dots (1)$$

ここで、 k_1 および k_2 は各材料特性に基づく係数であり、 J_0 および J_1 は Bessel 関数を示す³⁾。

結果と考察

Fig. 2 に、2層および4層構造の円形断面線路の電流密度分布 $i_z(r)$ の一例を示す。設定条件は、最外層の半径 $r_{max} = 8 \mu\text{m}$ 、周波数 $f = 3 \text{ GHz}$ とし、2つの材料の導電率を Cu と同等($\sigma_1 = \sigma_2 = 5.81 \times 10^7 \text{ S/m}$)とし、比透磁率の大きさが1である正/負の透磁率材料($\mu_{r1} = +1, \mu_{r2} = -1$)を想定した。2層および4層構造の各半径を調整し、損失が小さくなる条件を検討した結果である。Fig. 2 (b)に示される電流密度の位相 $\angle i_z(r)$ が各層の境界面で変曲し、位相変化を相殺することにより、低損失化が図れた。以前に報告した2層に対して、4層では更に低損失な特性が得られた。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 17K14674 および総務省 SCOPE 若手ワイヤレス研究者等育成型 165104001 の助成を受けており、ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Yamaguchi et al.: MWE 2008 Microwave Workshop Digest, 207-210 (2008).
- 2) Moriyama et al.: Digest of the 40th Annual Conf. Magn. Jpn., 40, 82 (2016).
- 3) Mizuno et al.: The Papers of Technical Meeting on Magn., IEE Jpn., MAG-06-82~87, 7-15 (2006).

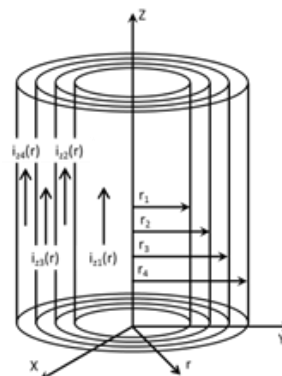
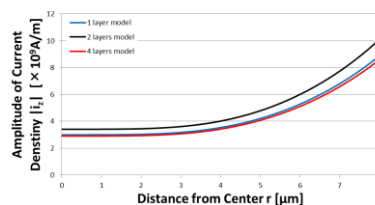
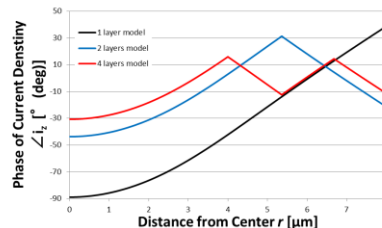


Fig. 1 Structure of cylinder transmission line.



(a) Intensity of current density



(b) Phase of current density

Fig. 2 Current density vs. distance from the center ($f = 3 \text{ GHz}, r_{max} = 8 \mu\text{m}$).

交番磁気力顕微鏡を用いた NdFeB 焼結磁石 の可逆的な磁壁移動の検出

曹 永澤、趙 越、吉村 哲、榎 智仁*、西内 武司*、齊藤 準
(秋田大、日立金属*)

Detection of reversible magnetic domain wall movement by alternating magnetic force microscopy
for NdFeB sintered magnets

Y. Z. Cao, Y. Zhao, S. Yoshimura, *T. Maki, *T. Nishiuchi, H. Saito
(Akita Univ., *Hitachi Metals, Ltd.)

はじめに 磁性材料の特性向上には、磁気特性や磁気物性と構造との相関の解明に加えて、磁区構造を把握し制御することが重要となる。本研究で用いる交番磁気力顕微鏡(alternating magnetic force microscopy; A-MFM)は、磁区観察に広く用いられている磁気力顕微鏡(MFM)をベースとして開発された、高い空間分解能を有し機能性に優れた手法である¹⁾。本報告ではA-MFMの新たな機能として、可逆的な磁壁移動を高感度で検出・画像化する手法を提案する。

方法 A-MFMは、探針の磁化を交流磁場の印加により周期的に変化させることで、試料から発生する磁場を、探針試料間の交番磁気力を利用して計測する。A-MFMでは超常磁性探針を用いることで、磁場の計測方向を探針に印加する交流磁場の方向に固定した磁場計測を行うことができる。A-MFMでは通常は探針に印加する交流磁場により試料磁化が変化しない範囲で、試料から発生する直流磁場を計測しているが、交流磁場により試料磁化が変化する場合、試料から発生する交流磁場の計測も同時に可能になる。磁場による試料磁化の変化には、試料磁化の磁化回転と磁壁移動があるが、本研究では磁壁移動の検出に着目し、交流磁場による可逆的な磁壁移動の検出を試みた。観察試料として、消磁状態のNdFeB異方性焼結磁石(中程度の配向度)のab面を用いて、試料面に垂直方向に交流磁場を印加して、直上の自作したCo-Gd₂O₃系超常磁性探針を励磁し、試料から発生する試料面に垂直方向の直流磁場と交流磁場を大気雰囲気下で同時計測した。

結果 図1に、ab面における垂直磁場の、(a)直流磁場像、(b)交流磁場像を示す。圧粉成形時の磁場の印加方向は図の水平方向である。図中の点線は結晶粒界の位置である。試料空間に印加した交流磁場の振幅は8000eである。直流磁場像では、結晶粒内で、多磁区構造が明瞭に観察されている。交流磁場像では、直流磁場像の明暗の境界に位置する磁壁の可逆的な移動に伴って発生する交流磁場を観察できる。図では磁壁の場所の違いにより移動幅や交流磁場強度が異なることがわかる。磁壁移動は振幅2000e以上で検出された。この値は試料面に垂直方向に直流磁場を印加したときに磁壁が移動を始める磁場と同様であった。従来の磁壁移動の検出には直流磁場を変化させながら磁壁位置を比較することが必要であったのに対して、本手法では、像の比較なしに、磁壁移動を高感度で計測できるので、本手法は、磁壁移動の容易さや、磁壁のピンング箇所等を評価する上で、有用と考えている。講演では、A-MFMで得られる直流磁場像および交流磁場像の計測信号を、可逆的な磁壁移動をモデル化して行ったシミュレーション結果と比較することで、計測理論を検討した結果についても報告する。

参考文献 1) H. Saito, まぐね/*Magnetics Jpn.*, 11, 214 (2016).

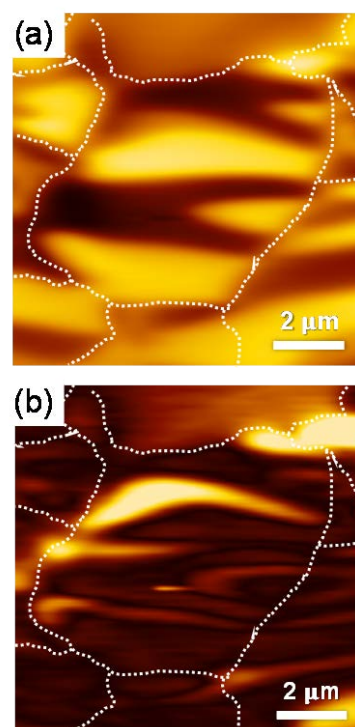


図1 A-MFMによる試料面に垂直方向の、(a)直流磁場像、(b)交流磁場像

交番磁気力顕微鏡を用いた強磁場イメージングに向けた 高磁化率・超常磁性 Co-Gd₂O₃ グラニューラー合金薄膜の作製

鈴木 雄大, Cao Yongze, 吉村 哲, 齊藤 準
(秋田大学)

Fabrication of superparamagnetic Co-Gd₂O₃ granular films with high susceptibility
for alternating magnetic force microscopy for high magnetic field imaging
Y. Suzuki, Y. Z. Cao, S. Yoshimura, H. Saito
(Akita Univ.)

はじめに 我々は、試料表面近傍での磁場計測を実現することで空間分解能を向上させた交番磁気力顕微鏡 (alternating magnetic force microscopy; A-MFM) を開発した^{1,2)}。本手法を用いたハード磁性材料の直流磁場計測には、通常は飽和磁化の大きなソフト磁性探針を使用し、探針磁化を交流磁場印加により周期的に変化させて探針試料間に交番磁気力を発生させ、この交番磁気力が誘起する探針振動の周波数変調現象を利用する。しかしながら、永久磁石等の強磁場発生試料の磁区観察では、ソフト磁性探針の磁化が試料からの強い磁場により飽和し、交流磁場を印加しても磁化が変化せず探針振動に周波数変調が生じない問題が発生する。この解決には、磁化が飽和しない、高磁化率の超常磁性薄膜ならびにそれを用いる探針の開発が必要となる。

我々は、これまで超常磁性薄膜として Co-Ag グラニューラー合金薄膜³⁾を Si 探針母材に 100 nm 成膜した超常磁性探針を作製することで永久磁石の A-MFM 観察に成功している⁴⁾。超常磁性探針の空間分解能向上には、計測感度を維持した上で探針の先鋭化が求められ、高磁化率・超常磁性薄膜の開発による成膜膜厚の低減が必要となる。このため本研究では、FeCo 系グラニューラー合金薄膜の非磁性マトリックス材料の検討を行った。

方法 本研究では、FeCo 系グラニューラー合金薄膜の非磁性マトリックス材料として新たに Al₂O₃ と Gd₂O₃ を用い、本グラニューラー合金薄膜を、強磁性ターゲットとマトリックス材料用の非磁性ターゲットを用いた 2 元同時マグネトロンスパッタリングにより熱酸化膜付き Si 基板上に 100 nm の膜厚で室温成膜した。薄膜の磁化曲線を振動試料型磁力計 (VSM) により測定し、磁化曲線から磁化率 χ および磁化曲線の線形性 FWHM を評価した。 χ は ± 100 Oe の範囲における磁化曲線の平均の傾きとして算出し、FWHM は、磁化曲線の傾きがゼロ磁場付近のそれに対して半分になるときの印加磁場の値として算出した。

結果 Fig.1 に各種超常磁性薄膜の室温での χ と FWHM の関係を示す。薄膜作製では薄膜の強磁性元素含有量をマトリックス材料ターゲットへの印加電力を一定にし、強磁性ターゲットへの印加電力を変えて変化した。いずれのマトリックス材料の場合でも、強磁性元素の含有量が增大すると、 χ が大きくなり FWHM が減少するトレードオフが見られた。これは、各磁化曲線におけるランジュバン関数のフィッティングの結果から、磁性粒径が増大したことによると考えられ、例えば Co-Gd₂O₃ の場合、Co 含有量の 20 vol% から 40 vol% への増加に伴い、Co 粒径が平均 9 nm から 20 nm に増大したと見積もられた。40 vol% 以上の Co 含有量の Co-Gd₂O₃ 薄膜では、磁化曲線にヒステリシスが見られ、強磁性と超常磁性との混相になった。 χ の最大値 1.7×10^{-5} H/m は、超常磁性単相が得られる最大 Co 含有量 (40 vol%) で得られた。この χ は、超常磁性薄膜でこれまでに報告されている Co₃₆Al₂₂O₄₂ (0.26×10^{-5} H/m)⁵⁾と比較して 7 倍程度大きい。

マトリックス材料が Ag, Al₂O₃, Gd₂O₃ の場合に、超常磁性単相が得られる最大の Co 含有量は、各々、23, 33, 40 vol% となり、その順番で χ も大きくなった。この原因として、Gd が高い酸素親和性を有することによる Co の酸化の抑制、微細組織の変化、が考えられ、後者については講演で詳細を述べる予定である。

参考文献 1) H. Saito et al., *J. Appl. Phys.*, **109**, 07E330 (2011).

2) 伊藤, 他 第 35 回日本磁気学会学術講演概要集, 27pD-2. 3) 吉村, 他 第 38 回日本磁気学会学術講演概要集, 4pA-6.

4) 中山, 他 第 38 回日本磁気学会学術講演概要集, 4pA-10. 5) K. Yakushiji et al., *J. Magn. Magn. Mater.*, **212**, 75-81 (2000).

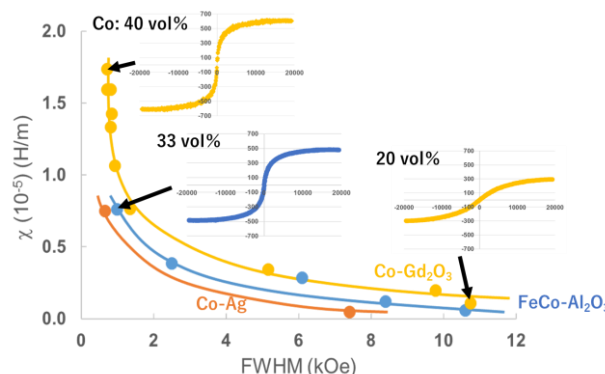


Fig.1 Relationship between susceptibility and linearity of $M-H$ curves for each superparamagnetic films.

交番磁気力顕微鏡用高分解能ソフト磁性探針の開発 — 高磁歪・Fe系非晶質磁性薄膜の極薄化 —

赤石 悠輔, M. Makarova, K. Srinivasa Rao, 吉村 哲, 齊藤 準
(秋田大学)

Development of high resolution soft magnetic tips for alternating magnetic force microscopy:
thin Fe-based amorphous films with high magnetostriction

Y. Akaishi, M. Makarova, K. Srinivasa Rao, S. Yoshimura, H. Saito
(Akita Univ.)

はじめに 近年、磁気力顕微鏡においては高密度磁気記録媒体等の進展により空間分解能の向上が強く求められている。我々は分解能の向上に有効となる試料表面近傍での磁場検出を実現した、交番磁気力顕微鏡 (Alternating Magnetic Force Microscopy; A-MFM)を開発して、垂直磁気記録媒体の磁区観察を行い、高い飽和磁化と低い飽和磁場を有する FeCoSiB 非晶質薄膜(25 nm)を Si 探針母材に成膜したソフト磁性探針を用いることで、5 nm 程度の高い空間分解能を得ている¹⁾。FeCoSiB 非晶質合金は飽和磁歪定数 λ_s が 10^{-5} オーダーと大きいにも関わらず高い空間分解能が得られているが、そのメカニズムは現在のところ不明である。

本研究では、Fe系非晶質合金探針の空間分解能をさらに向上させることを目的として、FeCoSiB 非晶質合金探針、および FeCoSiB 非晶質合金と同等の磁歪を示し、さらに耐蝕性が優れる FeCoB 非晶質合金探針を、磁性膜厚を減少させて作製し、熱処理ならびに磁場中熱処理を施す。得られた結果を低磁歪の CoZrNb 非晶質合金 (λ_s は 10^{-7} 以下) を成膜した探針の場合と比較することで、高分解能化のメカニズムを検討する。

方法 先端がピラミッド形状の Si 探針母材にターゲット組成が Fe₅₆Co₂₄Si₁₀B₁₀, Co₈₀Zr₁₅Nb₅ の磁性膜をそれぞれ 6, 8, 15, 25 nm の膜厚でスパッタリング法を用いて成膜し、非晶質ソフト磁性探針を作製した。熱処理は磁場印加機構を持った熱処理装置を使用した。A-MFM は市販の走査型プローブ顕微鏡(L-Trace II, 日立ハイテクサイエンス製)に、小型フェライトコア (交流磁場源)、PLL (周波数復調器)、ロックインアンプを加えて構成した。観察試料には CoCrPt-SiO₂ 垂直磁気記録媒体 (記録密度 500 kfc) を使い、探針試料間距離 2~3 nm で直流磁場観察を行った。探針に印加する交流磁場の周波数は 89 Hz とし、振幅を 50~200 Oe の範囲で変化させた。

結果 Fig.1 に一例として熱処理前の磁性膜厚が 8 nm の FeCoSiB 探針に、交流磁場振幅 200 Oe を印加して観察した CoCrPt-SiO₂ 垂直磁気記録媒体の直流磁場像とその空間周波数スペクトルを示す。Fig.2 に熱処理前の FeCoSiB 探針および CoZrNb 探針に対して、直流磁場像の空間周波数スペクトルから評価した磁気記録ビットの信号強度の磁性膜厚依存性を示す。FeCoSiB 探針では、磁性膜厚を 6 nm まで薄くしても信号強度が減衰しないが、低磁歪 CoZrNb 探針では膜厚の低減に伴い、記録ビットの信号強度が大きく減少し、膜厚 8 nm の探針では膜厚 25 nm の探針と比較し、測定感度が 10 分の 1 以下になった。Fig.1 から空間分解能を最小検出波長の半値で評価すると、3 nm 程度であった。本探針で高い信号強度が得られた原因として、交流磁場印加により発生する磁歪による応力が探針先端に集中し、先端部の磁化状態を周期的に変化させていることを考えている。膜厚を減少させて先端を先鋭化させても検出感度が低下しない探針は、空間分解能の向上に有効となる。

講演では、Fe系高磁歪非晶質合金探針の高分解能に及ぼす熱処理効果についても報告し、高分解能化のメカニズムを提案する予定である。

参考文献 1) K. S. Rao 他, 第 39 回日本磁気学会学術講演概要集, 8pD-3 (2015).

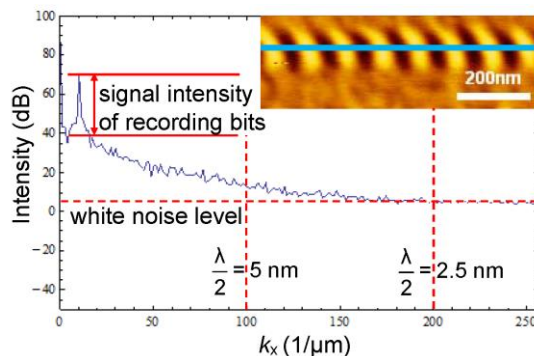


Fig. 1 A-MFM image of CoCrPt-SiO₂ perpendicular magnetic recording medium obtained using the tip coated with 8 nm thick FeCoSiB soft magnetic film (inset). Power spectrum of the line profile.

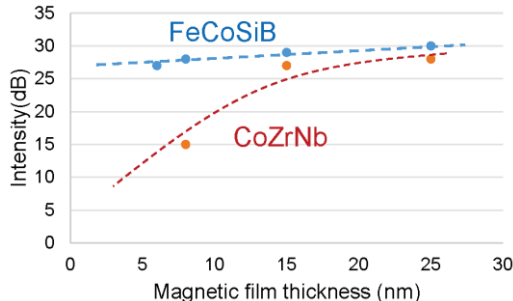


Fig.2 Dependence of A-MFM signal intensity on the thickness of coating magnetic film for the soft magnetic MFM tips.

パルス磁場印加・磁気力顕微鏡を用いた 磁気力顕微鏡探針の磁化曲線計測

工藤 開世, K. Srinivasa Rao, 吉村 哲, 齊藤 準

(秋田大学)

Measurement of magnetization curve of MFM tips by pulse magnetic field MFM

K. Kudo, K. Srinivasa Rao, S. Yoshimura, H. Saito

(Akita Univ.)

はじめに 磁性材料の特性向上には、巨視的な磁気特性に加えて、微視的な磁気特性の分布を知ることが重要となる。微視的な磁気特性の評価は、種々の磁気イメージング手法を用いて磁場中で磁区観察することにより広く行われている。ここで永久磁石等の保磁力の大きな磁性材料では強磁場が必要になる。本研究では、磁気力顕微鏡(MFM)にパルス磁石を組み込むことで、磁区観察後に任意の場所で局所的な磁化曲線を計測できる装置の開発を目的として、磁性探針と試料との相互作用により得られる MFM 信号の解釈に必要な、MFM 探針の磁化曲線の計測方法を最初に検討した。

方法 Fig.1 に実験装置の模式図を示す。MFM に観察試料を設置せずに、MFM 内の加振した MFM 探針にパルス磁場を印加した。パルス磁場の印加方向は、試料ホルダーの試料面に垂直方向である。パルス磁場印加に伴う探針振動の位相変化をロックインアンプで検出し、オシロスコープで信号を計測した。実験に用いた MFM 探針は、自作した FePt-MgO 系ハード磁性探針である。本探針はプラズマ酸化した Si 探針母材に FePt-MgO 薄膜をマグネトロンスパッタリング法により成膜後、熱処理して作製した。

結果 一例として、磁性膜厚が 30 nm の FePt-MgO 系ハード磁性探針について、Fig.2(a)にパルス磁場 H_z の時間変化を、Fig.2(b)にパルス磁場印加後の振動位相 θ の時間変化を示す。ここで z 方向はパルス磁場の印加方向とした。磁性探針は、測定前にパルス磁場の印加方向と逆向きに 60 kOe で着磁した。 θ は探針磁化 M_z と磁場 H_z の勾配と次式の関係がある。

$\theta(t) \propto M_z(t) (\partial^2 H_z(t) / \partial z^2)$ 図に見るように、 θ はパルス磁場印加後に負方向(斥力方向)に増加した後に、正(引力方向)に変化する。ここで θ がゼロになる磁場は M_z がゼロになる保磁力に対応している。

Fig.3(a)に θ の H_z に対する変化を示す。 θ に係わる前式の $(\partial^2 H_z(t) / \partial z^2)$ は、 $H_z(t)$ と同様にパルス磁石に流れる電流に比例して変化するので、 $(\partial^2 H_z(t) / \partial z^2) \propto H_z(t)$ の関係が成り立ち、 θ を H_z で除することにより、 $\theta(t) / H_z(t) \propto M_z(t)$ となり、 $\theta(t) / H_z(t)$ を評価することで、探針磁化 M_z の計測が可能になることがわかる。Fig.3(b)に θ / H_z のパルス磁場印加に伴う変化を示す。図に見るように、 θ / H_z 曲線はハード磁性材料に特徴的な磁化曲線の形状を示すことがわかる。一方、探針をパルス磁場と同方向に着磁した探針では、磁化値がほぼ一定となる θ / H_z 曲線も得られている。MFM 探針の磁化曲線を評価することはこれまででは容易ではなかったが、本手法を用いることにより MFM 探針の磁気特性を、成膜した磁性材料の平坦膜の磁気特性と比較することが可能となる。本手法は MFM 探針を開発する上で有用なツールになると考えられる。

学会では、上記の MFM 探針の磁化曲線測定法の詳細とともに、本手法により磁気特性を評価した MFM 探針を用いて、永久磁石試料の局所的な磁化曲線の計測をパルス磁場印加 MFM により検討した結果についても報告する予定である。

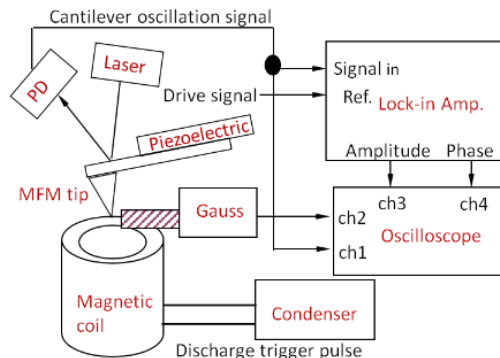


Fig.1 Schematic diagram of pulse magnetic field MFM

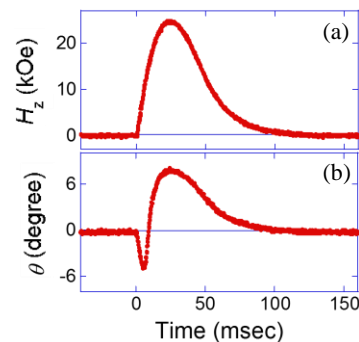


Fig.2 Time dependence of (a) applied pulse magnetic field and (b) MFM phase signal for FePt-MgO hard magnetic MFM tip.

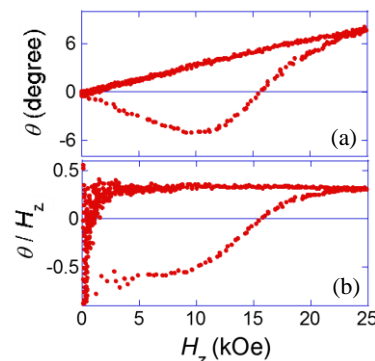


Fig.3 Magnetic field dependence of (a) MFM phase signal θ and (b) θ / H_z for FePt-MgO hard magnetic MFM tip.

脳磁計のセンサ位置精度が信号源推定に与える影響

小山大介, 足立善昭, 上原 弦
(金沢工業大学 先端電子技術応用研究所)

Influence of Sensor Positioning Accuracy on Signal Source Estimation of Magnetoencephalography

Daisuke Oyama, Yoshiaki Adachi, and Gen Uehara

(Applied Electronics Laboratory, Kanazawa Institute of Technology)

はじめに 近年, 冷媒による冷却が不要な磁気センサの高感度化が進み, 脳磁図等の生体磁気計測への応用に関する研究が進められている. これらのセンサは生体磁気計測に一般的に使われている超伝導磁気センサに比べて感度が劣るが, 信号源に近づけられることが利点として挙げられている. 著者らはこれまでに, 脳磁計ファントムを利用した計測実験により, 室温磁気センサによる脳磁図計測の実現可能性について検証した¹⁾. 他方, 脳磁計においては実際の磁気センサの位置が設計した場所とは異なったり, 機械的な位置と実効的な感度点の位置が異なったりする場合がある. センサが信号源に近い場合には, 遠い場合に比べて磁場勾配が大きいので, センサの位置ずれの影響を大きく受ける事が示唆されていた. そこで本研究では, 脳磁計のセンサ位置精度が信号源推定精度に与える影響をシミュレーションによって明らかにした.

実験方法 1)で報告した脳磁計用ファントムと室温磁気センサを用いた実験に合わせ, 信号源である等価電流双極子(Equivalent Current Dipole: ECD)とその周辺に円筒面状に配置した54チャンネルのセンサアレイによるシミュレーション実験を行った. Fig. 1にECDとセンサアレイの配置を示す. 本研究では, z 軸からの距離(r)が76 mmと96 mmの2種類のセンサアレイについて比較する. 前者は室温磁気センサによる脳磁計を, 後者は一般的なSQUIDによる脳磁計を想定したセンサアレイ配置である.

まず, 設定した各センサ位置に対して擬似乱数を用いて最大 e_p の位置ずれを与えて仮想的なセンサ配列を構成し, Sarvas の式²⁾により各センサが検出する磁気信号の大きさを計算する. 次に, 計算した磁気信号の大きさと元のセンサ位置情報を用いて逆問題を解き, 信号源位置を推定する. 得られた信号源位置と最初に設定したECD位置とのずれを信号源推定誤差とする. e_p の値を0.1~5.0 mmとしてそれぞれに対して擬似乱数の値を変えながら100回繰り返し, 各 e_p 値における信号源推定誤差の平均値を導出した.

実験結果 Fig. 2にシミュレーション結果を示す. $r = 76$ mm, 96 mm 双方の場合において, センサ位置ずれが大きくなるにつれて信号源推定誤差も大きくなる. 特に $r = 76$ mm の場合にはセンサ位置ずれが2 mmを超えると急激に信号源推定誤差も大きくなっていることが分かる. 本結果から, センサを信号源に近い位置に配置する場合には, センサ位置をより高い精度で決める必要があることが分かった.

参考文献

- 1) D. Oyama, Y. Adachi, and G. Uehara: *Journal of the Magnetics Society of Japan*, early access 1706R001 (2017)
- 2) J. Sarvas: *Physics in Medicine and Biology*, **32**, 11 (1987)

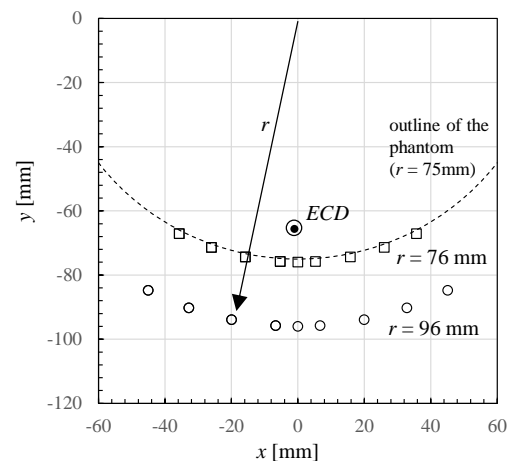


Fig. 1 Positions of the signal source (ECD) and the sensors. The squares and circles indicate the sensor positions with $r = 76$ mm and 96 mm, respectively.

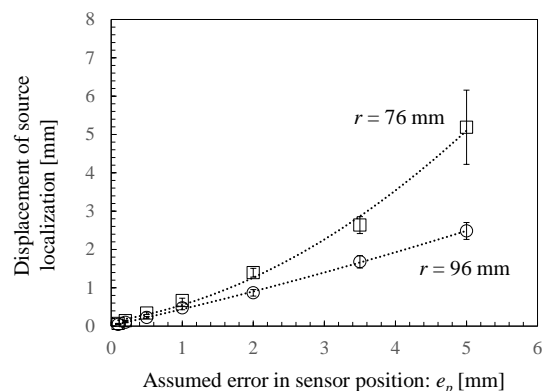


Fig. 2 Displacement of source localization as a function of the error in sensor position

10^5 dyne·cm 対応トルク磁力計による 六方晶 Co バルク単結晶の一軸性トルク曲線の計測

°中村 壮太^{a)}, 佐藤 和也^{a)}, 金野 志保^{a)}, 五月女 容之^{a)}, 日向 慎太郎^{a)},
菊地 敏明^{b)}, 玉川 克紀^{c)}, 小川 智之^{a)}, 斎藤 伸^{a)} (^{a)}東北大学, ^{b)}ハヤマ, ^{c)}玉川製作所)

Uniaxial torque curve of hexagonal Co bulk single crystal
measured by torque magnetometer capable for 10^5 dyne·cm

°Sota Nakamura^{a)}, Kazuya Sato^{a)}, Shiho Kinno^{a)}, Yoshiyuki Sotome^{a)}, Shintaro Hinata^{a)}, Toshiaki Kikuchi^{b)},
Katsuki Tamakawa^{c)}, Tomoyuki Ogawa^{a)}, and Shin Saito^{a)} (^{a)}Tohoku University, ^{b)}Hayama, ^{c)}Tamakawa.)

はじめに 強磁性体バルク単結晶の結晶磁気異方性の評価は、材料固有の磁気特性を導出するために重要である。磁気異方性の評価は、通常振動試料型磁力計により測定した磁化容易/困難方向に磁化を飽和させるのに要するエネルギー差や、トルク磁力計により測定されるトルク曲線の各高調波成分の飽和振幅によって評価される。特に後者は単磁区状態での測定となり、交換結合エネルギーを考慮する必要がないことから、高精度の測定を行う際に用いられる。しかしながら、高い飽和磁化を有する Co (~ 1420 emu/cm³)¹⁾ のようなバルク単結晶試料の測定においては、わずかな磁界勾配においても巨大な引き付けが発生し、試料棒の鉛直軸からのずれおよび試料のホルダからの脱離が生じるため、測定が非常に困難となる。本研究では、引き付けによる影響を抑制する機構を設けたバルク試料用のトルク磁力計を用い、試料固定法を工夫して実際に 10^5 dyne·cm のトルク振幅を有する六方晶 Co バルク単結晶のトルク曲線を計測したので報告する。

装置構成 試料棒の鉛直軸からのずれについては、引き付けを抑制しつつ、磁気トルクには極力影響を与えない機構を採用している。本機構では試料棒に 2 つのベアリングが固定されており、アイリスシャッターがそのベアリングを周囲から押さえつける。試料ホルダからの試料の脱離については、試料固定ホルダの構造を改良することで抑制を行なった。Fig. 1 には改良した試料取付機構を示す。本機構は A) 試料大に円盤状の段付け加工がされた直方体部品 (底から円錐状の穴が空けられている)、B) 円錐状部品、および C) 試料固定用ねじで構成されている。試料は A の窪み上に嵌め込まれ、厚みの半分が A から飛び出た状態となる。これによりひきつけによる水平方向への脱離は抑制される。固定は C のねじを締めることで B が押し上げられ、B により A が押し上げられ、試料がホルダの上面に圧迫されることにより行われる。この際、ねじによる圧力は部品 B と A の円錐部品の噛み合わせによって円錐の接触面へと分散される。そのため A は均等な圧力を試料に伝え、十分な摩擦力を以って試料を圧迫する。

実験結果 Fig. 2 には実際に本機構を用いて測定したトルク曲線を示す。試料は厚さ 0.5 mm、直径 6 mm の円盤状六方晶 Co 単結晶試料であり、*c* 軸は円盤の面内方向である。測定は外部磁界 20 kOe を試料面内方向に印加し、電磁石を正/逆転させ、光てこ法によってトルク振幅を評価した。図から、雑音の少ない振幅約 10^5 dyne·cm の正弦波的な 2θ トルク曲線が得られていることがわかる。これはトルク磁力計によってほぼ飽和した六方晶 Co の一軸結晶磁気異方性に起因するトルク曲線を測定できたことを示唆している。また、試料の一軸結晶磁気異方性をトルク 2θ 成分の飽和振幅から導出したところ、 5.7×10^6 erg/cm³ となり、文献値 6.0 erg/cm³²⁾ とほぼ同様の値をとった。講演では試料棒の鉛直軸からのずれを抑制するアイリスシャッター機構についてもより詳細に紹介する。

参考文献 1) A. J. P. Meyer and P. Taglang, C. R. Hebd. *Seances Acad. Sci.* **231**, 612 (1950). 2) R. Pauthenet, Y. Barnier, and G. Rimet, *J. Phys. Soc. Jpn.* **17**, 309 (1962).

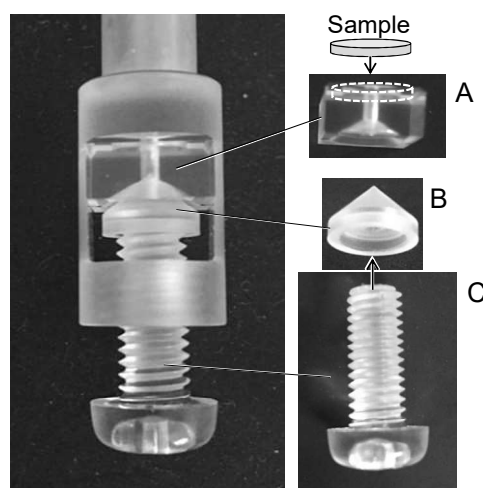


Fig. 1 Sample holder for the torque magnetometer. A) Rectangular component with cone- and disk-shaped hole, B) conical component, C) screw.

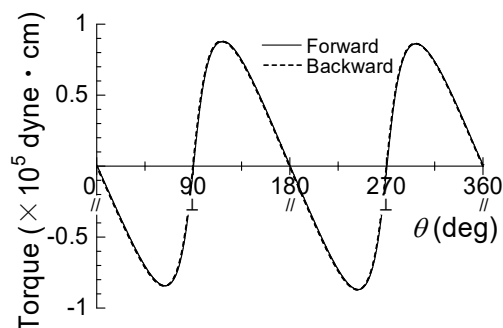


Fig. 2 Magnetic torque curves with $H = 20$ kOe for Co bulk sample.