

パルスレーザー蒸着法により作製した L1₀-FeNi 薄膜の異常ネルンスト効果

齊藤真博¹, Himanshu Sharma², 小嗣真人¹, 水口将輝²
(¹東京理科大, ²東北大金研)

Anomalous Nernst effect in L1₀-FeNi thin films fabricated by pulsed laser deposition
Masahiro Saito¹, Himanshu Sharma², Masato Kotsugi¹, Masaki Mizuguchi²
(¹Tokyo Univ. of Sci., ²IMR Tohoku Univ.)

はじめに

低環境負荷のエネルギー源が求められる現代社会において、ゼーベック効果やネルンスト効果といった熱流と電流の変換現象が注目を集めている。ネルンスト効果は、試料の磁化と垂直に熱勾配を印加したとき、両者に垂直な方向に熱起電力が生じる現象であり、近年は L1₀-FePt などの磁気異方性(K_u)の大きな規則合金材料を用いた異常ネルンスト効果の研究が精力的に行われている^[1,2]。その一方で、ユビキタス材料のみで構成される新しい規則合金磁性材料である L1₀-FeNi が、レアメタルフリーの高 K_u 磁性材料として注目を集めている^[3]。本研究では L1₀-FeNi の熱電変換素子への応用の可能性を調査するため、パルスレーザー蒸着法により L1₀-FeNi 薄膜を作製し、その異常ネルンスト効果を測定したので報告する。

実験方法

パルスレーザー蒸着法(PLD)を用いて Cu/Au バッファ層上に単原子交互積層により合計 50 ML の L1₀-FeNi 層を様々な基板温度で作製した。すべての試料は SPring-8 BL46XU に設置されている放射光 XRD を用いて L1₀ 規則相を含んでいることを確認している。物理特性測定装置(PPMS)を用いて試料に対して垂直方向に磁場を印加し、熱流を面内方向に流す配置でゼーベック効果、異常ネルンスト効果を測定した。試料の両端間に印加する温度差は 3 K とし、測定は室温で行った。試料作製時の基板温度を制御することで K_u の異なる試料を複数作製し、異常ネルンスト効果と K_u の関係を調査した。

実験結果

基板温度 300°C で作製した L1₀-FeNi 薄膜について測定したネルンスト効果の測定結果を Fig. 1 に示す。試料の磁化に対応するネルンスト電圧のヒステリシスが観測された。当日は磁気異方性との関係や、異常ホール効果との比較結果などについても報告することになっている。

参考文献

- [1] M. Mizuguchi *et al.*, Appl. Phys. Express **5**, 093002, (2012)
- [2] K. Hasegawa *et al.*, Appl. Phys. Lett. **106**, 252405, (2015)
- [3] T. Kojima *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **51**, 010204, (2012)

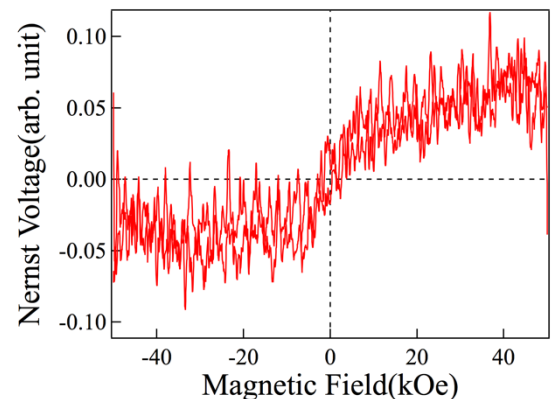


Fig. 1 Nernst voltage of L1₀-FeNi film as a function of applied magnetic field.

スキルミオンバブルの電界駆動特性

劉小晰¹, 馬闌¹, 張溪超¹, 山田侑生¹, 森迫昭光¹, 小野輝男²
(¹信州大学, ²京都大学)

Electrical field induced controllable motion of skyrmion bubbles

Xiaoxi Liu¹, Chuang Ma¹, Xichao Zhang¹, Yusei Yamada¹, Akimitsu Morisako¹, Teruo Ono²
(¹Shinshu University, ²Kyoto University)

はじめに

磁気スキルミオンは磁性体の中の渦巻き状のスピンの配向構造である。その小ささから超高密度記録媒体や論理素子と期待されている。これらの応用を実現するために、より低消費電力な磁気スキルミオンの生成、駆動方法が必要である。本研究では、ジュール熱を出さずに磁気スキルミオンの電界駆動手法を提案し、楔先端を有する磁性細線を作製した。ここでは、電界印加時にスキルミオンバブルの生成及び駆動特性を報告する。

実験方法

マスクレーズ露光装置、金属ステンシルマスク、スパッタリング装置を用いて Pt (0.5 nm)/CoNi (0.5 nm)/Pt (0.5 nm)/CoNi (0.5 nm)/Pt (1 nm) の多層構造で、楔先端を有する細線をガラス基板上に作製した。細線の幅は $6\ \mu\text{m}$ から $100\ \mu\text{m}$ までとした。電極は Pt (5 nm)/Al (100 nm)/Ti (3 nm) 用いて形成した。更に、細線の上に SiO₂ 絶縁層と ITO 電極層を作製した。Fig. 1 に試料構造の断面図を示す。

約 300 nm のスポットに集光できるレーザーマイクロカー測定装置 (自作) を用いて、作製した磁性細線の各所の磁化曲線並びに電界印加時の磁気特性を測定した。カー顕微鏡を用いて、細線の中の磁区構造を観察した。

実験結果

Fig. 2(a) にレーザーマイクロカー測定装置を用いた試料の細線方向 (以下 x 方向) に沿って、磁界を基板の垂直方向に印加時の磁化曲線を示す。x = 1 μm で楔エッジ付近は面内磁気異方性を示すが、x の増加により垂直異方性が増加に伴う。x = 20 μm で完全な垂直磁気異方性を示す。Fig. 2(b) に x = 30 μm 位置でゲート電界を $V_G = 0\ \text{V}$ から $V_G = 8\ \text{V}$ の磁化曲線を示す。Fig. 3 に MOKE による各外部磁界において電界を印加した時の磁区の様子を示す。(a)+2 Oe、(b)0 Oe、(c)-2 Oe のそれぞれの外部磁界を印加しながら電界を印加した時に、全ての結果から磁壁の移動を確認できた。(a)、(b)の場合にスキルミオンバブルの生成を確認できた。また、(d)外部磁界のみの場合と電界印加時の場合の磁壁移動の様子が異なることも確認した。

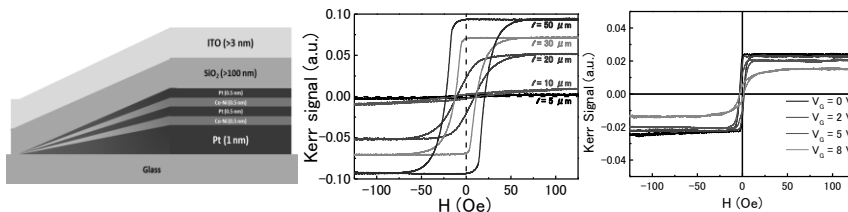


Fig. 1 Illustration of the sample

Fig.2(a) Kerr hysteresis at different thickness in the absence of the EF, (b) Kerr hysteresis x = 30 μm for different applied gate voltage V_G

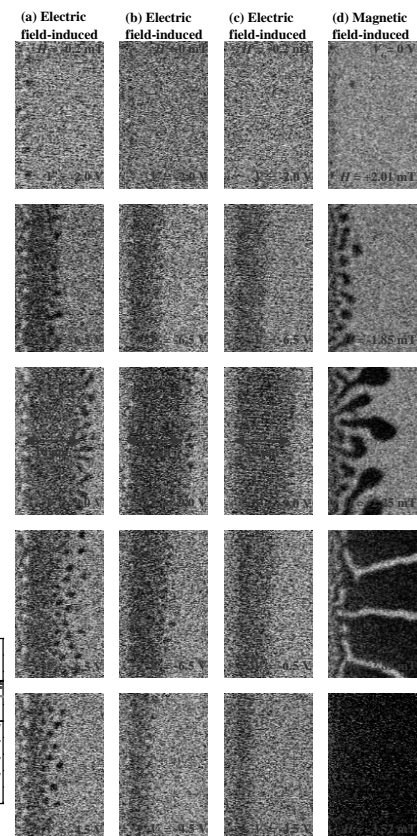


Fig.3 MOKE microscopy images of EF-induced and magnetic field-induced motion of domain walls in the region with the thickness gradient.

電界効果磁気スキルミオントランジスタの作製とその特性

馬闌¹, 荒井遼真¹, 張溪超¹, 山田侑生¹, 森迫昭光¹, 劉小晰¹, 小野輝男²
(¹信州大学, ²京都大学)

Preparation and properties of field-effect magnetic skyrmion transistor

Chuang Ma¹, Ryoma Arai¹, Xichao Zhang¹, Yusei Yamada¹, Akimitsu Morisako¹, Xiaoxi Liu¹, Teruo Ono²,
(¹Shinshu University, ²Kyoto University)

はじめに

磁気スキルミオンはトポロジカル準粒子とみなすスピンの特殊な渦巻き構造である。その小ささと不揮発性、可制御性から次世代不揮発性論理回路への応用を考えられる。本研究では、チャンネルに電界を印加可能な3端子構造を作製し、電界アシスタント磁気スキルミオンの生成、電流駆動磁気スキルミオンの閾値電流密度とそのゲート電圧の影響、電界効果磁気スキルミオントランジスタとしての動作を報告する。

実験方法

試料作製には、ステンシルリソグラフィ法、フォトリソグラフィ法とスパッタリング装置を用いて、Fig. 1に示すような3端子構造を作製した。チャンネルは幅 $4\ \mu\text{m}$ 、長さ約 $20\ \mu\text{m}$ の Pt (0.5 nm)/CoNi (0.4 nm)/Pt (0.5 nm)/CoNi (0.4 nm)/Pt (1 nm) の多層構造と構成された。

作製した素子はレーザーマイクロカー測定装置を用いて電界印加時の磁気特性を測定した。更に、高分解能カー顕微鏡による電界電流印加時の磁区構造と電界印加時の磁壁移動速度を測定した。

実験結果

Fig. 2にチャンネル部にゲート電圧 $V_G = 0\ \text{V}$ と $V_G = 8.5\ \text{V}$ の磁気特性を示す。 $V_G = 0\ \text{V}$ 時は優れた垂直磁気異方性を示し、保磁力 H_c が約 $30\ \text{Oe}$ であった。しかし、 $V_G = 8.5\ \text{V}$ 印加すると磁気特性に大きな変化が見られ、試料の垂直磁気異方性が減少し、保磁力も約 $2\ \text{Oe}$ まで減少した。Fig. 3にチャンネル部のカー顕微鏡によって観察した磁区構造の一例を示す。電流駆動時に、ゲート電圧アシスタントによって磁気スキルミオンバブルが形成したと考えられる。Fig. 4に $V_G = 0\ \text{V}$ から $V_G = 8.5\ \text{V}$ まで増加させた時に電流駆動磁気バブル移動の閾値電流密度 J_c の結果を示す。 $V_G = 0\ \text{V}$ の時の J_c が約 $5.9 \times 10^{11}\ (\text{A}/\text{m}^2)$ であったが、 V_G の増加に伴い J_c が減少し、 $V_G = 8.5\ \text{V}$ の時に J_c が約 $5.1 \times 10^{11}\ (\text{A}/\text{m}^2)$ まで減少した。ゲート電圧印加によってチャンネル部の閾値電流密度の制御を実現した。電流一定の時、電界による磁気スキルミオンの電流駆動の“ON”と“OFF”の確認もできた。

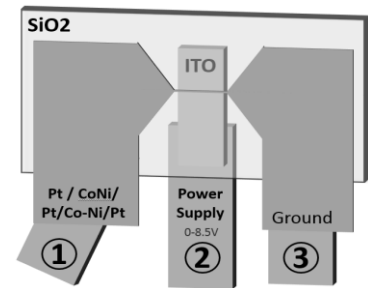


Fig.1 Structure of the device.

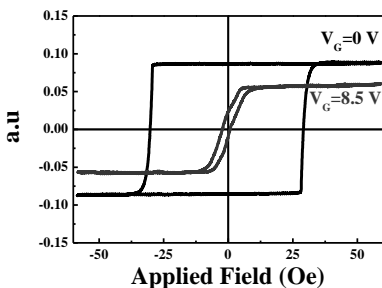


Fig.2 Kerr Hysteresis for $V_G = 0\ \text{V}$ and $V_G = 8\ \text{V}$.

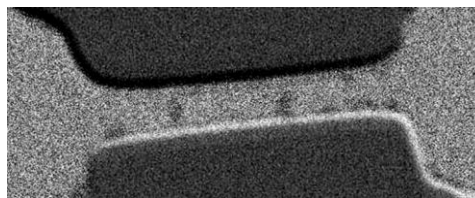


Fig.3 Kerr image

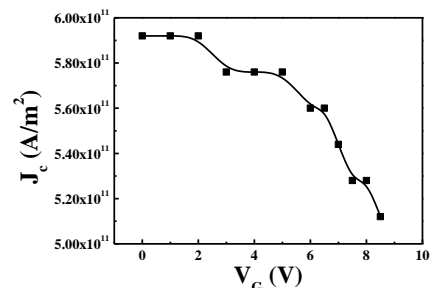


Fig.4 Threshold current density as a function of gate voltage V_G .

磁気近接効果を用いた Pt/CoFe₂O₄ 超薄膜の磁気特性評価

○野土翔登¹、山本匠¹、柳瀬隆²、島田敏宏²、長浜太郎²
(北大院総化¹、北大院工²)

Evaluation of magnetic property of Pt/CoFe₂O₄ ultra-thin film using magnetic proximity effect

○S. Nodo¹, T. Yamamoto¹, T. Yanase², T. Shimada², T. Nagahama²
(Hokkaido Univ., Graduate school of Chemical Sciences and Engineering¹
Hokkaido Univ., Graduate school of Engineering²)

はじめに

コバルトフェライト (CoFe₂O₄: CFO) はバルクで 793K と高い Curie 温度を持ち、優れた磁気特性から室温動作可能なスピフィルター素子等への応用が期待されている。しかしながら薄膜ではバルクと異なった磁気特性を示し、特に厚さが数 nm 程度の超薄膜では逆位相境界(APBs)やカチオン欠陥等に起因する様々な磁気特性が報告されている^{1),2)}。今回は磁気近接効果の存在が報告されている³⁾ Pt/CFO 二層膜系を用いて、Pt の磁気輸送測定によって CFO 超薄膜の磁気特性の評価を行った。

実験方法

薄膜試料は反応性分子線エピタキシー(MBE)法によって作製した。膜構成は MgO(001)基板/MgO(20 nm)/Pt(2,3 nm)/CFO(2-6 nm)である。Pt/CFO 二層膜の結晶構造は反射高速電子回折(RHEED)によるその場観察、X 線回折(XRD)によって評価した。製膜後は微細加工によって Hall バー構造の素子を作製し、磁気輸送測定(Hall 測定)を行った。

実験結果

Fig.1 に室温における Pt の Hall 測定の結果を示す。今回作製したサンプルで最も CFO 膜厚が厚い 6 nm においても、バルクの保磁力 3000 Oe より小さくなっていることがわかる。また膜厚が小さくなるにつれ、保磁力が低下しており 3.4 nm 以下では保磁力がほぼ 0 と、(超)常磁性的に振る舞っていることがわかった。これは超薄膜化による影響、あるいは既に報告のあるような欠陥密度の増加^{1),2)}によるものと考えられる。

次に最も CFO 膜厚が薄い 2 nm のサンプルについて Pt の Hall 測定の温度依存性を測定した。結果を Fig.2 に示す。保磁力に着目すると温度の低下に伴って単調に減少する傾向が見られ、220 K 以上ではほぼ 0 となった。このことから、CFO 膜厚 2 nm では磁気相転移温度が 220 K 付近にあると考えられる。また、この 220 K におけるデータを Brillouin 関数でフィッティングしたところ、 $J \approx 1500$ となったことから、超常磁性体のように振る舞っていると考えられる。

参考文献

- 1) C. Jin *et al.*, *J. Appl. Phys.* **110**, 013917 (2011)
- 2) Y. K. Wakabayashi *et al.*, *Phys. Rev. B* **96**, 104410 (2017)
- 3) W. Amamou *et al.*, *Phys. Rev. Mater.* **2**, 011401 (2018)

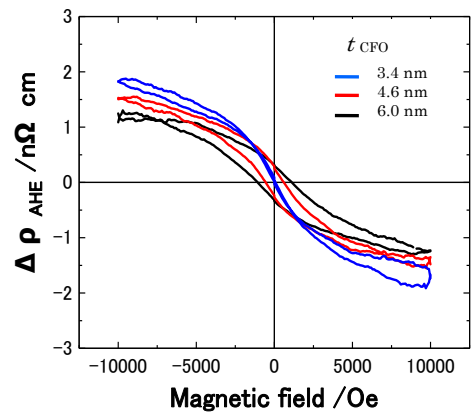


Fig.1 Thickness-dependent Hall measurement in Pt (300 K)

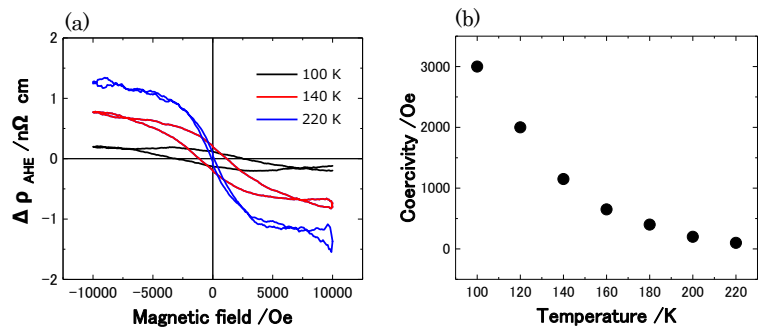


Fig.2 Hall measurement in Pt ($t_{CFO} = 2.0$ nm)
(a) Temperature-dependent Hall measurement (b) Temperature dependence of coercivity

Fe-Ga 膜における磁気特性の Ga 組成による変化

川辺 泰之、遠藤 恭、宮崎 孝道 (東北大学)

Change in Magnetic Properties of Fe-Ga Films with Ga Composition

Yasuyuki Kawabe, Yasushi Endo, Takamichi Miyazaki (Tohoku Univ.)

はじめに Fe-Ga 合金は磁気ひずみが大きく、飽和磁界が低く、機械特性や加工性が良いといった特長を有しており¹⁾、アクチュエータなどの電磁気デバイスへの応用が期待されている。一方、Fe-Ga 膜についても、高速・小型・エネルギー高効率な高周波デバイスへの応用に向けて注目されている²⁾。したがって、これらのデバイス応用の実現を目指して、Fe-Ga 合金や Fe-Ga 薄膜の構造、磁気特性および電気特性に関する検討が行われている。なかでも、磁気特性に関しては、Fe-Ga 合金や Fe-Ga 単結晶薄膜の研究は多数報告されている。しかしながら、Fe-Ga 多結晶薄膜の研究は系統的な報告があまり行われていない。本研究では、Ga 組成の異なる Fe-Ga 膜を作製し、それらの構造および磁気特性を検討した。得られた知見をもとにして Ga 組成による変化について議論する。

実験方法 Fe_{100-x}Ga_x (Fe-Ga) 膜の作製には DC マグネトロンスパッタリングを用いた。作製した膜の構成は石英ガラス基板上に製膜した 50 nm 厚の Fe-Ga 膜である。また、Fe-Ga 膜の Ga 組成 (x) は 18.5 ~ 33.4 at.% と幅広く変化させた。作製した膜の構造に関しては、透過型電子顕微鏡 (TEM) と原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて評価した。膜の結晶構造は Ga 組成に関わらず bcc 多結晶であった。膜の表面粗さは Ga 組成に依存せず Ra ~ 0.9 nm および RMS ~ 1.2 nm であり、また、膜の面内方向の結晶粒径はいずれの Ga 組成でも約 20 nm であった。一方、作製した膜の磁気特性に関しては、振動試料型磁力計 (VSM)、光てこ法を用いた高感度薄膜磁歪装置 (株) 東栄科学産業製) およびベクトルネットワークアナライザと伝送線路を組み合わせたブロードバンド FMR 測定法を用いて評価した。

結果および考察 図 1 は Fe-Ga 膜における飽和磁化 ($4\pi M_s$) の Ga 組成 (x) 依存性である。Ga 組成の増加とともに、 $4\pi M_s$ は単調に減少した。この挙動は、bcc 構造を有する不規則相の Fe-Ga バルク合金の場合と類似している³⁾。飽和磁気ひずみ (λ_s) は Ga 組成に著しく依存した (図 2)。すなわち、Ga 組成が 21.7 at.% 以下では、Ga 組成の増加とともに λ_s は 33 ppm から 47 ppm まで増加した。Ga 組成が 21.7 at.% から 27.2 at.% では、 λ_s は緩やかに減少し、Ga 組成が 27.2 at.% で極小 (44 ppm) となった。Ga 組成が 27.2 at.% では、Ga 組成の増加とともに λ_s はおよそ 54 ppm まで増加した。 λ_s の Ga 組成による変化は、Fe-Ga バルク合金の挙動と類似しているものの、それらの値は従来の Fe-Ga 多結晶膜の結果よりも Ga 組成が 20 at.% 時近傍において低くなった⁴⁾。この原因は、作製した薄膜の結晶粒の結晶軸が磁気ひずみの値を低くする [111] 方向に配向していることによるものと考えられる。また、ダンピング定数 (α) も図 2 に示すように Ga 組成に依存した。すなわち、Ga 組成が 27.2 at.% 以下では Ga 組成の増加とともに α は緩やかに増加して最大 (0.085) となり、Ga 組成が 27.2 at.% 以上では Ga 組成の増加とともに α は減少した。いずれの α の値も、Fe-Ga 単結晶膜の結果²⁾と比べると高くなった。この原因は、物質固有のダンピングに加えて外的要因によるダンピングが重なっていることによるものと考えられる。

謝辞 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と、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とで行われた。また、本研究の一部は、科研費基盤研究 (B) (No. 17H03226) の支援のもとで行われた。

参考文献 1) A. E. Clark et al., IEEE Trans. Magn., 36, 5, 3238 (2000)., 2) B. K. Kuan et al., J. Appl. Phys., 115, 17C112 (2014)., 3) N. Kawamiya et al., J. Phys. Soc. Jpn., 33, 1318 (1972)., 4) A. Javed et al., J. Appl. Phys., 107, 09A944 (2010).

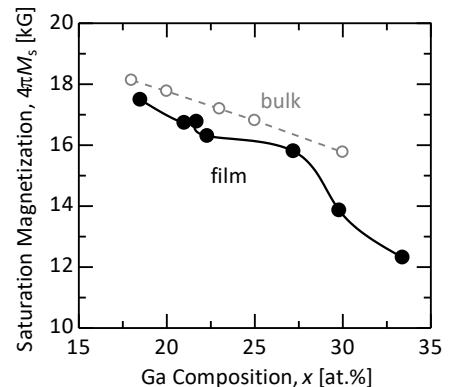


Fig. 1. Dependence of $4\pi M_s$ on the Ga composition (x) for 50-nm thick Fe_{100-x}Ga_x films.

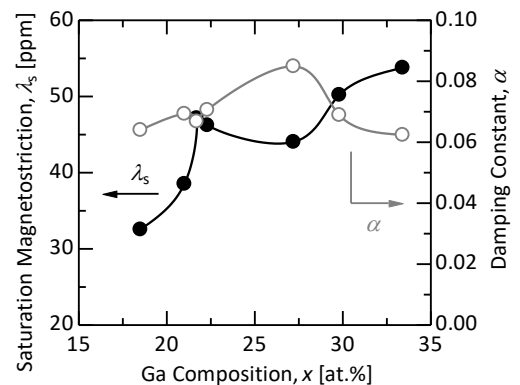


Fig. 2. Relationship between λ_s vs. x and α vs. x for 50-nm thick Fe_{100-x}Ga_x films.

高温超伝導コイルとインダクタンス変調方式 を用いた磁気センサの開発

円福 敬二*, 吉田 悠次郎, 山下 重弥, 松尾 政明, 笹山 瑛由, 吉田 敬
九州大学システム情報科学研究院

Magnetometer Based on Inductance Modulation in Coils Made of High-T_c Superconductor
Keiji Enpuku, Yujiro Yoshida, Shigeeya Yamashita, Masaaki Matsuo, Teruyoshi Sasayama, Takashi Yoshida
Kyushu Univ.

励起磁場中での動作が可能であり、かつ、1 Hz 程度の低周波磁界を高感度に計測する磁気センサはこれまで充分に開発されていない。このため、高温超伝導コイルとインダクタンス変調方式を用いた磁気センサを開発している。[1] Fig. 1(a) にその等価回路を示す。検出コイル(L_p)と変調コイル(L_m)は高温超伝導体で作製し、低抵抗($R_c=27 \mu\Omega$)で接続することにより、閉ループを形成している。信号磁束 Φ_s が検出コイルに鎖交した場合には、閉ループに電流 I_s が流れ磁束が変調コイルに伝達される。この閉ループの時定数は $\tau=(L_p+L_m)/R_c$ で与えられるため、 $L_p+L_m=115 \mu\text{H}$ の場合には $\tau=4.26 \text{ s}$ となり 1 Hz 程度の低周波磁束を伝達できる。また、変調コイルを励起磁界の外に設置すれば励起磁界中での動作が可能となる。

変調コイルに伝達された磁束を電気信号に変換するため、コイルのインダクタンス L_m を時間的に変調する方式を用いた。この方式の原理は直交型基本波フラックスゲートと同様である。すなわち、変調コイル内に磁性ワイヤを挿入し、磁性ワイヤに変調電流 $I_m=I_{DC}+I_{AC}\sin(2\pi f_m t)$ を流すことにより、磁性ワイヤの透磁率を時間的に変化させる。この結果、変調コイルのインダクタンスが $L_m(t)$ と時間的に変調され、センサの端子(P-Q)には $V_s=I_s \times (dL_m/dt)$ の出力電圧が得られる。

検出コイルと変調コイルは高温超伝導テープ線材 (SuperPower 社 SF2050) を用いて作製した。検出コイルのパラメータは平均直径 $D_p=25 \text{ mm}$ 、巻数 $N_p=50$ 、 $L_p=65 \mu\text{H}$ である。また、変調コイルのパラメータは $D_m=20 \text{ mm}$ 、 $N_m=60$ 、 $L_m=50 \mu\text{H}$ である。コイルは液体窒素を用いて冷却して超伝導状態とした。磁性ワイヤは幅 $500 \mu\text{m}$ 、厚さ $35 \mu\text{m}$ の物 (愛知製鋼: 120FC20) を用いた。磁性ワイヤには $I_{DC}=70 \text{ mA}$ 、 $I_{AC}=35 \text{ mA}$ 、 $f_m=400 \text{ kHz}$ の変調電流 I_m を流してインダクタンス L_m を時間的に変調した。この時の磁気センサの電圧感度 (電圧/磁界変換係数) は $K_{VB}=885 \text{ V/T}$ となった。

Fig. 1(b)にセンサの磁界雑音スペクトルを示す。センサの電圧雑音スペクトル $\sqrt{S_V}$ の測定値と電圧感度 K_{VB} を用いて計算した結果($\sqrt{S_B}=\sqrt{S_V}/K_{VB}$)であり、磁界雑音 $\sqrt{S_B}$ は20 Hz以上の周波数帯ではほぼ白色雑音となり、 $1.3 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ となった。20 Hz以下の低周波数帯では磁界雑音は周波数の低下とともに増加する $1/f$ 雑音となり、1 Hzでは $5.6 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ となった。

参考文献

1. K. Enpuku et al, Appl. Phys. Express 10, 113101 (2017).

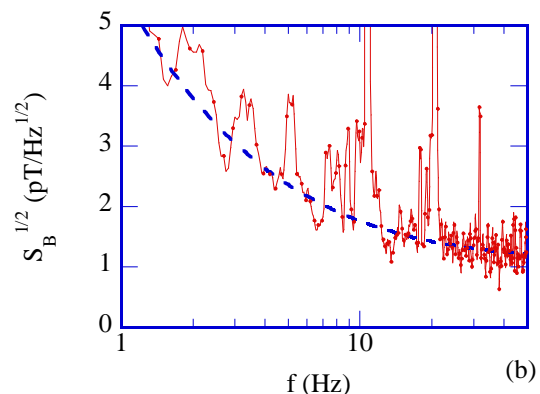
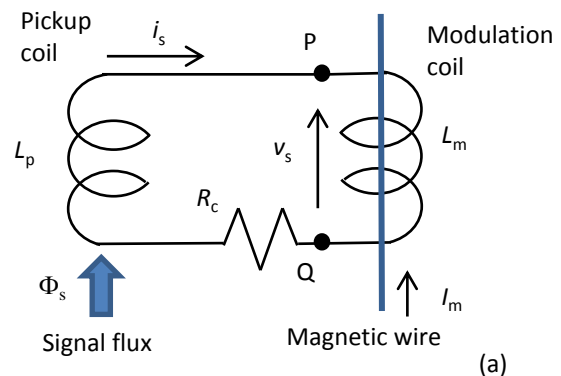


Fig.1. (a) Equivalent circuit of the magnetometer.
(b) Noise spectrum of the magnetometer

Investigation of serial magnetic tunnel junction sensors for high signal-to-noise ratio in eddy current testing

Zhenhu Jin, Muhamad Arif Ihsan, Mikihiko Oogane, Kosuke Fujiwara and Yasuo Ando
Department of Applied Physics, Tohoku University, Sendai, Miyagi, Japan

In recent years, magnetic tunnel junctions (MTJs) based on MgO barrier have been attracted considerable interest due to high tunnel magneto-resistance (TMR). An earlier study reported that TMR sensor based on MTJ can detect small field change, which indicated these devices can be used in eddy current nondestructive testing (ECT) field [1]. However, it is still required to develop a sensor for detection of different defects. Considering that adding serial MTJ number in the sensor can improve sensitivity [2], an optimized serial TMR sensor can provide a high signal-to-noise ratio (SNR) during ECT. Therefore, for achieving high SNR, we fabricated sensor with 4, 16, 28, and 40 serial MTJs in 1, 4, 7, and 10 rows, respectively. Furthermore, we investigated their detectivity and analyzed their output signals to determine the maximum SNR for detection of different defects in ECT.

The magnetic film structure of MTJ was $\text{SiO}_2\text{-sub./Ta(5)/Ru(10)/Ta(5)/Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(70)/\text{Ru}(0.9)/\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}(3)/\text{MgO}(2)/\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}(3)/\text{Ru}(0.9)/\text{Co}_{75}\text{Fe}_{25}(5)/\text{Ir}_{22}\text{Mn}_{78}(10)/\text{Ta}(8)$ (in nm). These series of 4, 16, 28, and 40 MTJs with $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ top pinned layers and $15 \times 60 \mu\text{m}^2$ bottom free layers were fabricated with photolithography and ion milling processes. After fabrication, for achieving excellent R-H curve, the fabricated MTJs were annealed twice in a vacuum chamber using different directions and temperatures [3]. Furthermore, automatic ECT system was composed of an excitation unit with a function generator which delivers excited signal and sensing probe with the prepared MTJ device. The surface and back-side pits with various regimes in aluminum and copper specimens were inspected by using ECT probe with TMR sensors.

Figure 1 showed the dependence of detectivity of the sensor on serial MTJ number N . It is indicated that the TMR sensor with a large MTJ number can offer small detectivity. However, since the inhomogeneous secondary field induced from eddy currents in the specimen, the disturbance of field strongly affected by the distance between individual MTJ and test specimen during defect detection. As shown in Figure 2, the ECT result when different sensors were used to detect a surface crack, the noise amplitude increases with the number of serial MTJs, which indicates the dependence of noise on their number. On the other hand, due to the distribution of secondary field, the crack signal reached a saturation for $N=28$, and highest SNR can be obtained. Although the inner defects of the copper specimen were inspected, the probe with TMR sensor ($N=28$) offered considerable high SNR. This study suggested that the optimized TMR sensors can play an important role in achieving high SNRs during ECT.

Reference

- 1) J. Lenz and A. S. Edelstein, IEEE Sens. J. **6**, 631 (2006).
- 2) R. Guerrero, M. Pannetier-Lecoer, C. Fermon, S. Cardoso, R. Ferreira, and P. P. Freitas, J. Appl. Phys. **105**, 113922 (2009).
- 3) K. Fujiwara, M. Oogane, F. Kou, D. Watanabe, H. Naganuma, and Y. Ando, Jpn. J. Appl. Phys. **50**, 013001 (2011).

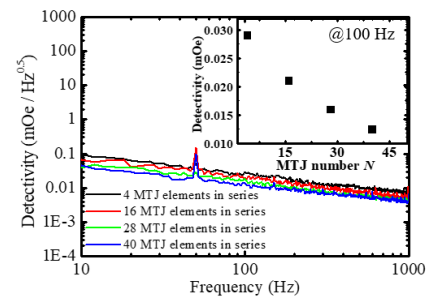


Fig.1 Detectivity for different sensors at different frequencies. Inset: dependence of detectivities on serial MTJ number N at excitation frequency of 100 Hz.

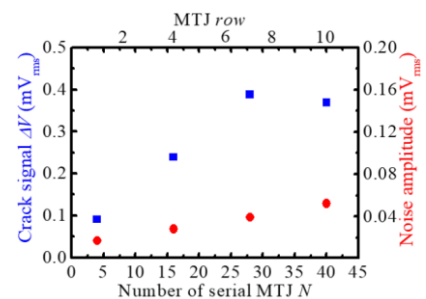


Fig.2 The relationship between amplitude of the crack-free signal and noise during surface inspection with different sensors.

CPW 伝送線路型磁気センサモジュール

早坂淳一, 菅原和幸, 植竹宏明, 藪上 信*, 荒井賢一
(電磁材料研究所, *東北大学)

CPW transmission line type magnetic sensor module

J. Hayasaka, K. Sugawara, H. Uetake, S. Yabukami*, K. I. Arai,
(Research Institute for Electromagnetic Materials, *Tohoku University)

1. はじめに

リチウムイオン二次電池等の高品位な品質検査を目的として、高感度、且つ低ノイズな CPW (Coplanar Waveguide) 伝送線路型磁気センサモジュールを開発した。

2. 実験方法

磁界センサ素子には、心磁図等の生体情報検出素子として期待されている CPW 伝送線路型磁気センサ¹⁾を使用した。線路長, 信号線幅, 信号線-グラウンド間隔は, 各々 $2,000\ \mu\text{m}$, $300\ \mu\text{m}$, $50\ \mu\text{m}$ である。材質は, Cr/Cu/Cr/Au (厚み $0.1/3.0/0.1/0.3\ \mu\text{m}$) である。下層部には, 感磁膜としての CoNbZr アモルファス膜 (厚さ $5\ \mu\text{m}$) を配した。CoNbZr 膜と CPW 線路の絶縁膜には, SrTiO₃ (STO, $3\ \mu\text{m}$) を用いた。素子単体の共振周波数は, $1,600\text{MHz}$ であったが, 実装時の寄生容量により 500MHz 帯に低下した。

信号処理基板としては, 4層 FR-4 多層 PCB 板 (外形寸法 $150\text{mm} \times 100\text{mm}$) 上に, RF 増幅回路, 周波数変換回路, PSD 回路, フィルタ回路等を搭載した信号処理ボード (周波数帯 $500 \pm 50\text{MHz}$) を製作した。キャリアの発生源には, Agilent N9310A を使用した。

最後に, ヘルムホルツコイルを利用し, 製作したセンサモジュールの基本性能を評価した。また, 磁気感度が最大になるように, 同コイルにより 0.5mT の直流磁気バイアスを付与した。

3. 実験結果

Fig. 1 は, 製作した CPW 伝送線路型磁気センサモジュールの磁気感度特性 (交流励磁 100Hz , キャリア周波数 500MHz) である。磁界強度 100nT 付近の線形領域において, 磁気感度は, 0.3mV/nT (Ich_0deg.) であった。また, 磁気シールドが施されていない一般実験室における検出限界は, 約 5nT であった。ノイズは, 主として, 都市雑音のような外的要因によるものである。

Fig. 2 は, 出力信号, および位相の高周波キャリ

ア周波数依存性である。キャリア周波数 500MHz 付近で最大値を示し, 出力値は 0.20V (Ich), 0.38V (Qch) (磁場強度 $1\ \mu\text{T}$) であった。また, 位相は, Ich, Qch とともに約 -20° であった。素子と信号処理ボード間の接続ケーブルによる影響と考えられる。

今後は, センサ素子, および信号処理回路の最適化による更なる高感度化, および外乱の影響低減と多チャンネル化が課題として挙げられる。

参考文献

- 1) 藪上, 他 第 41 回日本磁気学会学術講演概要集 21aD-2 (2017)

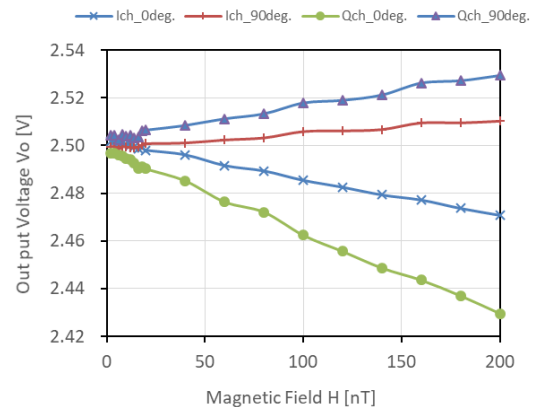


Fig. 1 Magnetic field characteristic

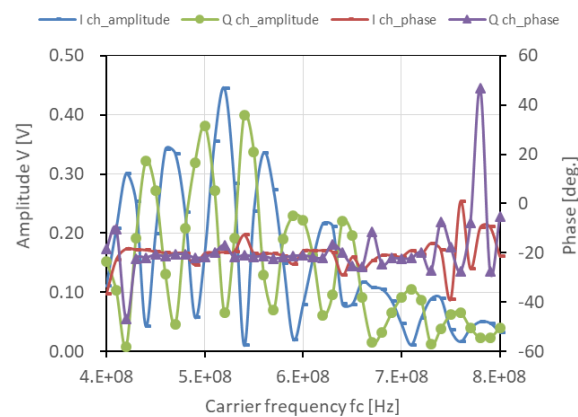


Fig. 2 Carrier frequency dependence of V and phase.

Faraday効果利用型光プローブ電流センサ用磁気ヨーク形状の検討

山崎 健太, 藤城 佑太, 塩田 健太, 岩見 晃希, 曾根原 誠, 佐藤 敏郎
(信州大学)

Study on shape of magnetic-yoke for Faraday-effect optical probe current sensor

K. Yamazaki, Y. Fujishiro, K. Shiota, K. Iwami, M. Sonehara, T. Sato
(Shinshu University)

はじめに

電流センサは、パワーエレクトロニクスにおいて「制御」「監視」「管理」の役割を果たしており、高性能化が求められている。筆者らは、既に小型で電磁ノイズに強く高周波数帯域でも測定可能な電流センサの実現を目指し、強磁性薄膜の Faraday 効果を利用した光プローブ電流センサの研究・開発を進めている¹⁾。また本電流センサの感度増大のためセンサヘッドに磁性微粒子複合材料 (透磁率 $\mu_r' = 20$)²⁾を用いた磁気ヨークを提案した。本稿では、その磁気ヨークの形状を検討し、結果について述べる。

解析方法

Fig. 1 に示すように、磁気ヨークに光ファイバを通過させるための溝を作り、磁性膜をサンドイッチするように、二つの磁気ヨークを対向して配置し、磁性膜に印加される磁界をエンハンスする構成とした。電磁界解析ソフト JMAG を用いて磁気ヨークの下底 a および磁気ヨーク間のギャップ長 L_g を変化させた場合での磁性膜に印加される磁界 H を解析した。なお、解析では磁気ヨークに光の進行方向と同方向に 8.0 kA/m の磁界を印加させた。

解析結果

Fig. 2 に磁気ヨークの下底 a を変化させた場合の磁性膜に印加される磁界 H の関係を示す。同図より、 a が長くなるに伴い磁気ヨークによりエンハンスされる H は約 6 倍まで高められるが、やがて飽和する傾向が示された。これは、 a を長くすることでヨークの面積が増加し、磁極も増加するため、 H が大きくなるがヨークによって集磁できる磁束には上限があるため H が飽和すると考えられる。したがって、磁気ヨークを台形形状にすることにより、磁性膜に加わる H を高められるが、 $a > 5.0 \text{ [mm]}$ は大きな効果が無いことが分かり、また小型化の観点からも $a = 5.0 \text{ [mm]}$ が妥当である。

Fig. 3 (a) に台形磁気ヨークにおけるギャップ長 L_g に対する磁性膜に印加される磁界 H の関係を示す。同図より、 $L_g \approx 0.225 \text{ [mm]}$ で H が極大値を取ることが分かった。Fig. 3 (b) に磁性膜を装荷する磁気ヨーク間付近の磁束密度ベクトルをプロットしたものを示すが、センサ感度の増大に寄与するのは同図で赤丸の箇所、 $L_g \approx 0.225 \text{ [mm]}$ の場合に磁束密度が最も高く、本解析条件では最適であることが分かった。

発表当日は、詳細な解析結果と、試作したヨークの測定結果も述べる。

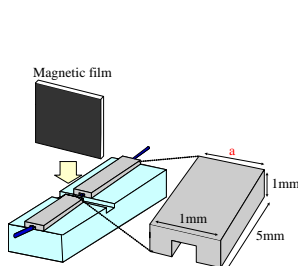


Fig.1 Model of sensor head with yoke.

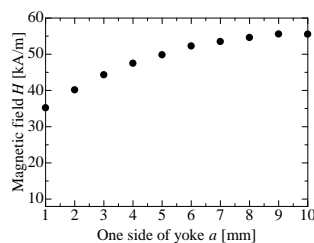
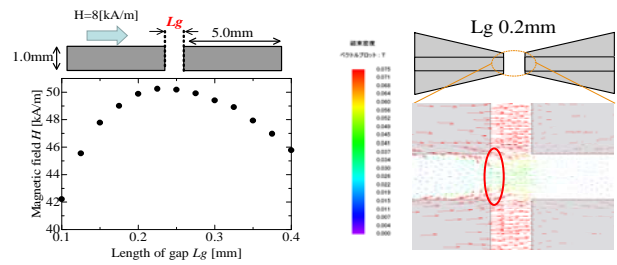


Fig.2 Analysis result in H vs. a



(a) H vs. L_g (b) Magnetic flux density
Fig.3 Analysis results of trapezoidal shape yoke.

参考文献

- 1) M. Miyamoto, et al.: *INTERMAG 2018*, CW-14 (2018).
- 2) N. Yabu, et al.: *The Papers of Tech. Meeting on "Magn."*, IEEJ, MAG-17-156 (2017).

FeCo-MgF ナノグラニューラー薄膜を用いた光磁界センサ

大場裕行、小林伸聖、池田賢司、荒井賢一
(電磁研)

Optical magnetic field sensors using FeCo-MgF nanogranular films

H.Ohba, N.Kobayashi, K.Ikeda, K.I.Arai

(Research Institute for Electromagnetic Materials, DENJIKEN)

はじめに

ナノメートルサイズの強磁性金属粒子が、フッ化物などの絶縁体マトリックスに分散した構造を持つナノグラニューラー薄膜は、光透過性を有すると共に、大きな磁気光学効果（ファラデー効果）を示す¹⁾。またこれらナノグラニューラー薄膜は、超常磁性を有するので、ヒステリシスを持たない磁化特性を示す。本稿では、上述の特徴を有するナノグラニューラー薄膜を、光磁界センサに応用する際に最適な FeCo 組成を求めるため、光吸収係数当たりのベルデ定数を性能指数として評価し、ナノグラニューラー薄膜の FeCo 組成との関係について調べた結果を報告する。

実験方法

ナノグラニューラー薄膜は、厚さ 0.5mm のガラス基板の上に、RF スパッタ装置を用いたタンデム法で作製した。Fig.1 に、光磁界センサの構成を示す。光源には波長 1.55 μm の LD（レーザダイオード）を用いた。光源からのレーザ光は、偏光子によって偏光方向を規定し、ビームスプリッターを経由してナノグラニューラー薄膜に入射する、その後全反射ミラーにて反射され、偏光ビームスプリッターにて互いに直交する 2 つの偏光成分に分離され、それぞれ PD（フォトダイオード）で電気信号に変換される。ファラデー回転角の測定は、試料をヘルムホルツコイル中に置き、直流磁界を加えて行った。

実験結果

Fig.2 は、FeCo 組成が 20mol% 試料のファラデー回転角の外部磁界依存性を示す。外部磁界に対して直線的なファラデー回転角の変化が得られている。ベルデ定数は $1.6 \times 10^{-4} \text{deg}/\mu\text{mOe}$ 、光吸収係数 β は $0.53 \mu\text{m}^{-1}$ である。

Fig.3 に FeCo 組成が 14mol% から 54mol% までの試料の性能指数を示す。性能指数は FeCo 組成が 20mol% で最大値 $3.1 \times 10^{-4} \text{deg}/\text{Oe}$ が得られた。FeCo 組成が 20mol% 以下の試料では、超常磁性を有するので、ファラデー回転角の外部磁界依存性にヒステリシスは見られない。

参考文献

- 1) N.Kobayashi, K.Ikeda, BoGu, S.Takahashi, H.Masumoto, S.Maekawa, Scientific Reports, 8, 4978 (2018)

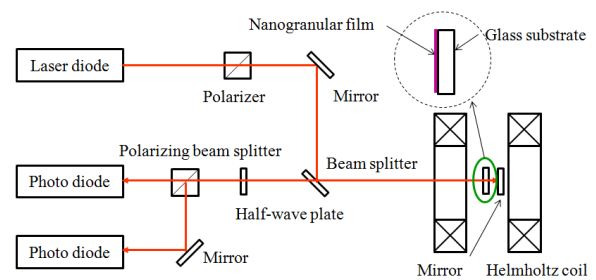


Fig.1 Schematic of the optical magnetic field sensors

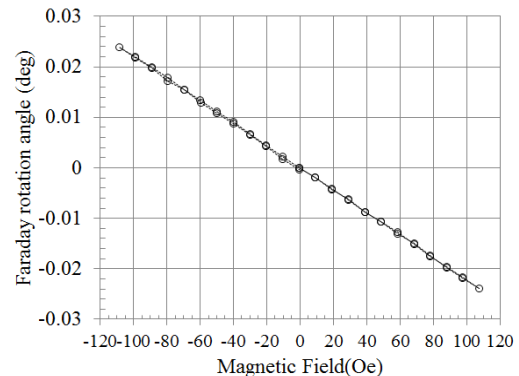


Fig.2 Measured Faraday rotation angle of the $\text{Fe}_{11}\text{Co}_9\text{Mg}_{29}\text{F}_{51}$ nanogranular film under the static magnetic field perpendicular to the film surface

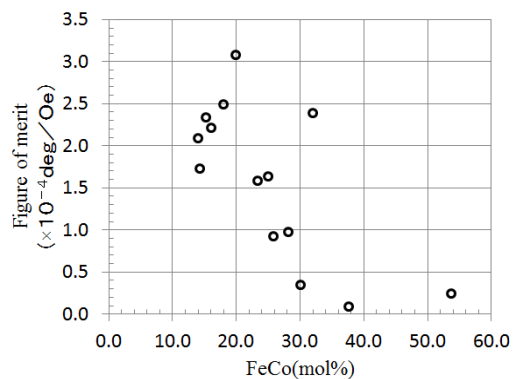


Fig.3. Figure of merit vs. FeCo concentration of the FeCo-MgF nanogranular films

基本波型FGへの適用性から見たアモルファス磁性リボンの評価

笹田一郎

(笹田磁気計測研究所)

Evaluation method of amorphous magnetic ribbons for the FM-OFG magnetometer

Ichiro Sasada

(Sasada Magnetic Instruments Laboratory)

はじめに 基本波型直交フラックスゲート(FM-OFG)は、筆者が2001年の本学会学術講演会で初めて報告したが⁽¹⁾、その後大きく進歩し、36チャンネルで心磁界計測ができるようになった⁽²⁾。ところで、センサのコアに新たな磁性体を用いようとする場合、FM-OFGに適しているかどうか事前に評価できる方法が望ましい。本稿ではセンサヘッドを試作しそのオフセット対直流バイアス電流の関係から適否のみならず動作条件の決定も可能となる1つの方法を示す。また、新たに探索したアモルファス磁性薄帯によって製作したセンサの雑音特性を報告する。

方法 細長いアモルファス磁性リボンを1本、あるいは中央で折り曲げてVの字型にしたものをコアとし、数百ターン～1千ターンの中空ソレノイドコイル型ピックアップコイルを用いてセンサヘッドを試作する。このセンサヘッドを磁気シールド内に置き、コアには交流電流 i_{ac} に直流バイアス電流 i_{dc} を重畳した励磁電流を通電する。このとき発生する誘起電圧の大きさから、コア内に存在する磁気異性のリボン幅方向からの傾きの程度を知ることができる。また、 i_{dc} に対する誘起電圧振幅の変化から、磁気異方性の大きさに関する情報を得ることができる。

結果 広幅Metglas2714Aリボンから幅1 mmにスリットしたもの(熱処理無し)と、これと異なるアモルファスリボンの幅1 mmスリット材に熱処理を施したサンプルについて計測した例をそれぞれFig. 1 (a)および(b)に示す。Fig. 1(a)では $i_{ac}=19.4$ mAとし、同(b)では同17.7 mAとしている。周波数は前者で20 kHz、後者で100 kHzである。両者間で条件が同じでないため、電圧の比較はあまり意味が無いが形に着目する。中央左右2つの縦の破線は $i_{ac}=|i_{dc}|$ の点を示す。Fig. 1(a)の ± 0.1 Aの内側では跳躍的磁化変化のためにノコギリのようになっており、実際この範囲の i_{dc} ではセンサの雑音が大きいの一方(b)では跳躍的磁化回転は i_{dc} の小さい範囲でのみ生じている。また、オフセットは速やかに小さくなることから磁気異方性は小さい。

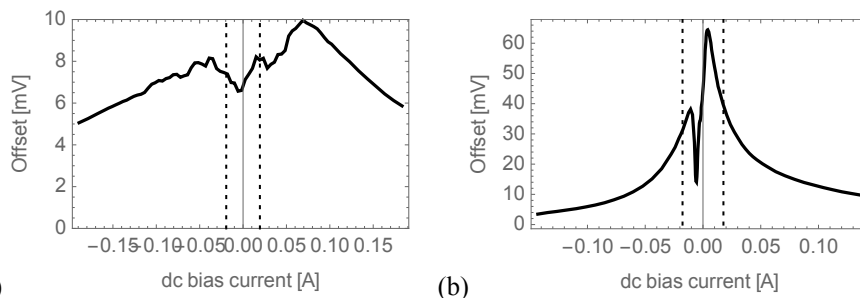


Fig. 1 Offset vs. dc bias current. (a) as slit Metglass 2714A, (b) annealed Co-based amorphous sample.

紙面の都合でセンサの雑音スペクトル密度の結果の図は省くが、Fig. 1(a)のサンプルでは $i_{dc} \approx 0.2$ Aとすることで、1 Hzで5 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 以下、10 Hzで2 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 以下となる結果が得られている⁽³⁾。(b)については、 $i_{dc}=35$ mAで、1 Hzで5 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 、10 Hzで2 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ と大幅に小さな励磁電流で優れた結果を得た。

参考文献

- 1) 笹田一郎, 基本波型直交フラックスゲート, 日本応用磁気学会学術講演会, 26pD-3, 2001
- 2) 加呂光他, 36チャンネルフラックスゲートセンサを用いた心磁界計測, 電気学会論文誌E Vol. 136 No. 6 pp. 224-228 (2016)
- 3) Ichiro Sasada, Low noise fundamental mode orthogonal fluxgate (FM-OFG) magnetometer built with an amorphous ribbon core, IEEE Trans Magn, 掲載予定, DOI 10.1109/TMAG.2018.2840500

アモルファス磁性合金薄帯用磁気ひずみ計測法の開発

遠藤 恭¹, 島田 寛², 川邊 泰之¹, 方 冰川¹, 森 修², 佐藤 茂行², 内海 良一²
 (¹ 東北大、² (株)東栄科学産業)

Development of New Measurement Method for Magnetostriction of Magnetic Amorphous Alloy Ribbon

Y. Endo¹, Y. Shimada², Y. Kawabe¹, B. Fang¹, O. Mori², S. Sato², R. Utsumi²
 (¹ Tohoku Univ., ² Toei Scientific Industrial Co.,Ltd)

はじめに

近年、アモルファス磁性合金薄帯は低損失電力用変圧器の実用化により環境負荷軽減型デバイスを構成する材料の一つとして注目されている。この薄帯は低保磁力、高透磁率、低高周波損失、低磁気ひずみなどの優れた磁気特性を有している。薄帯の磁気ひずみ評価に関しては、従来の容量変化法、ひずみゲージ等の計測法では、薄帯に電磁気的な変化を印加して機械的な変化を引き起こして、物理的な変化を検出することにより磁気ひずみ定数を算出する¹⁾。これらの計測法では、薄帯を何枚も重ねた試料の作製や試料サイズが大きといった欠点がある。したがって、従来の計測法とは異なるより簡便な磁気ひずみ計測法の開発が急務となっている。本研究では、アモルファス磁性合金薄帯として市販の薄帯を選択して、その薄帯に異なる応力を付与してインダクタンスの磁界変化を検出し、応力の違いによる磁界変化量から薄帯の磁気ひずみを評価できる計測法を開発した。

実験方法

磁気ひずみ計測に用いたアモルファス磁性合金薄帯はFe系アモルファス薄帯である。薄帯の新規磁気ひずみ計測は次の通りである。信号検出にはコイルを用いた。薄帯の一端を固定して、その中央部分をコイル内部に挿入する。もう一方の端部に荷重(応力)を付与すると、薄帯内部の異方性が変化する。したがって、異なる応力($\sigma_{//1}$, $\sigma_{//2}$)を薄帯に付与した状態で薄帯の幅方向に直流磁界(H_{dc})を印加する。このときの応力負荷された薄帯が挿入されたコイルのインダクタンス(L)を検出し、応力の違いによるインダクタンスの逆数($1/(L-L_0)$)と H_{dc} の関係を得る(なお、 L_0 は空心コイルのインダクタンスである)。得られた結果をもとにして、同じの $1/(L-L_0)$ 値に対する直流磁界の応力の違いによる変化量($\Delta H = H_{dc1} - H_{dc2}$)を求めて、

$$\Delta H = \frac{3\lambda_s}{M_s} (\sigma_{//1} - \sigma_{//2}) \quad (1)$$

にあてはめて薄帯の磁気ひずみ(λ_s)を評価する。ここで、 M_s は薄帯の飽和磁化である。

結果および考察

図1は、異なる応力を付与したときのFe系アモルファス薄帯における $1/(L-L_0)$ と H_{dc} の関係である。応力の大きさに関係なく、1000 Oe以上の H_{dc} では、いずれの $1/(L-L_0)$ も直線的に増加している。また、応力の増加にとともに、同じ $1/(L-L_0)$ 値に対して直流磁界が増加している。したがって、この直流磁界の変化分(増加分)とそのときの応力の変化量を、(1)式にあてはめてFe系アモルファス薄帯の λ_s を算出した。300 g以下の荷重領域では、 λ_s の値は27~32 ppmとなった。これらの値はほぼ薄帯の公称値と一致している。一方、300 g以上の応力領域では、 λ_s の値はおよそ63 ppmとなり、公称値に比べて大きくなった。この原因は、応力を強くした場合、材料の機械特性に何らかの変化が生じる、あるいは、測定システムに残る誤差の可能性を考えている。当日、今回開発した測定法の原理等の詳細を報告する。

謝辞 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の支援のものと行われた。

参考文献

1) 荒井賢一, 津屋昇, 日本応用磁気学会 2, 5 (1978).

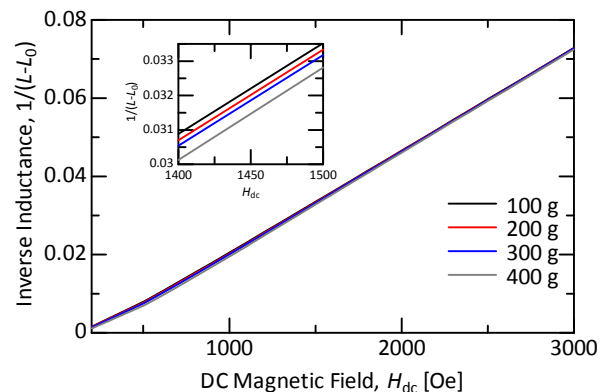


Fig.1 Relationship between inverse inductance and DC magnetic field for an Fe-system amorphous ribbon.

回転磁場を用いたバルクハウゼンノイズ計測による応力評価

小野 拓也、中島 悠也
(富士電機)

Stress evaluation by Barkhausen noise measurement under rotating magnetic field

Takuya Ono and Yuya Nakashima
(Fuji Electric Co., Ltd.)

はじめに

近年、インフラ関連製品の劣化診断技術のニーズが高まっている。なかでも、鋼材への表面処理などで発生する残留応力は、応力腐食割れ(SCC)などの損傷の要因となるので、製作時・出荷前に検査する必要がある。磁気バルクハウゼンノイズ(MBN)による応力評価法は、非破壊かつ短時間の残留応力測定が可能な方法として開発が進められ、一部、製品適用も行われている。しかし、MBNに影響する因子としては、応力のほかに、結晶粒径・析出物等があり、応力を精度よく評価する手法の開発が求められる。本研究では、回転磁場下でのMBN計測を行い、MBN強度の磁場角度依存性に基づいて応力評価精度の向上を図った。

方法

マルテンサイト系 13Cr ステンレス鋼に、一軸引張試験機を用いて引張応力を印加した。MBN測定は、励磁コイルを巻いた軟磁性ヨークとセンサコイルを評価鋼材に接近させ、評価鋼材表面に長手方向の磁場を印加しながら、センサコイルによって評価鋼材からの漏れ磁束を計測して行った。鋼材表面内で磁場方向を回転させ、MBNの磁場角度依存性を取得した。MBNは出力電圧の二乗平均平方根(RMS)として算出し、さらに励磁電流依存性の移動平均処理による平滑化を経て、MBNプロファイルを得た。MBN積分強度は、MBNプロファイルからバックグラウンドを差し引いたうえで算出した。

結果

Fig. 1に引張応力(413 MPa)の下で測定したMBNプロファイルの磁場角度依存性を示す。磁場角度増加に伴いMBN強度の単調減少が見られ、両者の強い相関性を示唆する。一軸の磁気異方性を持つ磁性材料では、MBN強度は $\alpha \cos^2 \theta_m + \beta$ のような角度依存性を有する(θ_m : 磁化容易軸を基準とする磁場角度)¹⁾。逆磁歪エネルギーは $-(3/2)\lambda\sigma(\cos^2\phi - 1/3)$ で表され(ϕ : 応力方向を表す角度)、磁気異方性エネルギーと同形式の角度依存性を有するので、一軸応力下のMBNの角度依存性は、一軸磁気異方性下のそれと同様と推定される。Fig. 2にMBN積分強度(I_{MBN})の $\cos^2\theta$ 依存性を示す(θ : 応力方向を基準とする磁場角度)。 I_{MBN} は $\cos^2\theta$ に対し線形変化しており、上記の推察が正しいことを示唆する。さらに、Fig. 3に示すように、応力と、関係式 $I_{MBN} = \alpha \cos^2\theta + \beta$ から求めた傾き(α)に強い相関が見られ、MBNの磁場角度依存性から応力が評価できることが示された。

参考文献 1) T. W. Krause, L. Clapham, and D. L. Atherton, J. Appl. Phys. **75**, 7983 (1994).

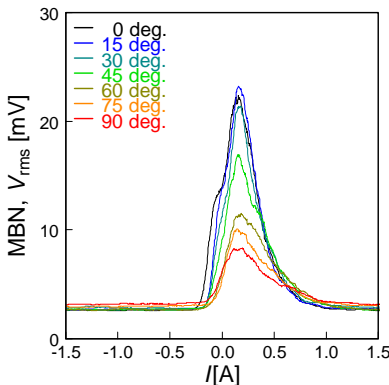


Fig. 1 MBN profiles under the various magnetic field angles and tensile stress of 413 MPa.

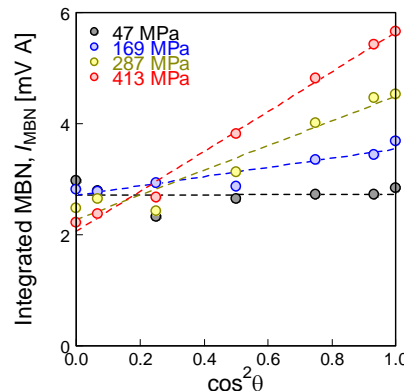


Fig. 2 $\cos^2\theta$ dependences of the integrated MBN, I_{MBN} , under the various stresses.

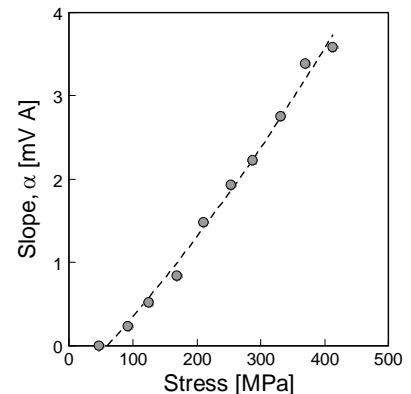


Fig. 3 stress dependence of the slopes, α , of the I_{MBN} - $\cos^2\theta$ relations.

マイケルソン光干渉法による磁歪測定装置の作製

佐藤睦規、吉田悠人、鈴木貴彦、高橋豊、小池邦博、稲葉信幸
(山形大学大学院理工学研究科)

Magnetostriction measurement system of magnetic thin films with Michelson interference

M.Sato, Y. Yoshida, T. Suzuki, Y. Takahashi, K. Koike, N. Inaba
(Yamagata Univ. Graduate School of Science and Engineering)

はじめに Ni-Fe系合金では、ダンピング定数 α と磁歪との間に相関があることが報告¹⁾されており、薄膜での磁歪を知ることは HDD や MRAM 応用の観点から重要である。また、磁歪により磁気異方性が誘起されることから、ナノコンポジット磁性材料の特性向上においても薄膜での磁歪を知ることは有用である。MgO 単結晶基板上に成長させた磁性単結晶薄膜の磁歪を測定しようとする、MgO 基板のヤング率がガラス基板に比べ3倍以上大きく、磁歪による試料のたわみ量が 100 nm 程度で、従来の光てこ法では測定が困難である。このため、本研究では光学系を用いた高分解能な変位測定法として知られているマイケルソン干渉計を応用した磁歪測定装置を製作したので報告する。

装置構成 装置の概略図を Fig.1 に、作製した装置の写真を Fig.2 に示す。光源から出た光は、ハーフミラーにより固定ミラー側と可動ミラーの2光路に分けられ、両者からの反射光を再度合成することで検出器に干渉縞が結像される。図のように片持ち固定した短冊状の試料に磁界を印加すると、磁歪により試料がたわみ、反射光の光路長が変化する。このとき、反射光の位相が変化し、干渉縞が移動する。例えば、たわみ量が光源の光の波長/2 に相当する場合は干渉縞の位相が1周期変化することとなる。本測定装置では、光源に He-Ne レーザー(波長 $\lambda = 633$ nm)を用いた。また、デジタルカメラの撮像素子(CCD)上に直接結像し、干渉縞を検出している。得られた干渉縞画像は画像解析ソフト ImageJ²⁾で解析を行い、干渉縞の移動量からたわみ量を算出した。

実験結果 0.2 mm 厚の MgO(100)単結晶基板上にスパッタリング法を用いてエピタキシャル成長させた膜厚 300 nm の Fe(001)単結晶薄膜試料を準備した。短冊状試料の長辺方向が Fe[110]であり、この方向に磁界を印加して試料のたわみ量の磁界依存性の測定を行った。Fig.3 にたわみ量の磁界依存性を示す。 $H = \pm 2$ kOe 以上で一定(平均値 $d = 54$ nm)となり、式(1)を用いて Fe[110]方向の磁歪定数を算出³⁾すると、 $\lambda = -21 \times 10^{-6}$ となった。これは bulk の磁歪定数と比べ、2 倍ほど大きい値である。

$$\lambda = \frac{t_s^2 E_s (1 + \nu_f)}{3t_f l^2 E_f (1 - \nu_s)} d \quad (1)$$

ここで、 t_s は基板厚、 E_s は基板のヤング率、 ν_s は基板のポアソン比、 t_f は膜厚、 E_f は薄膜のヤング率、 ν_f は薄膜のポアソン比、 l はレーザースポット位置、 d はたわみ量である。

1) Y.Endo et al. *J. Appl. Phys.*, **109**, pp.07D336 (2011).

2) W.S.Rasband, ImageJ, U.S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <http://rsb.info.nih.gov/ij/>, 1997 -2012.

3) A.C.Tam et al. *IEEE Trans. Magn.*, **25** NO.3 (1989).

謝辞 本研究の一部は科研費 B(No.16H0448)の補助を受けています。

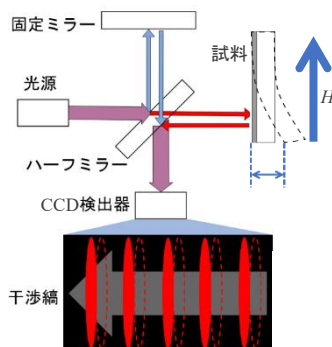


Fig.1 Schematic picture of measurement system with Michelson interferometer

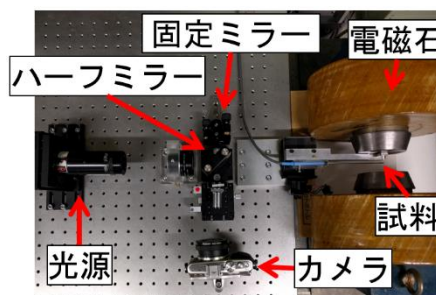


Fig.2 Picture of the magnetostriction measurement system

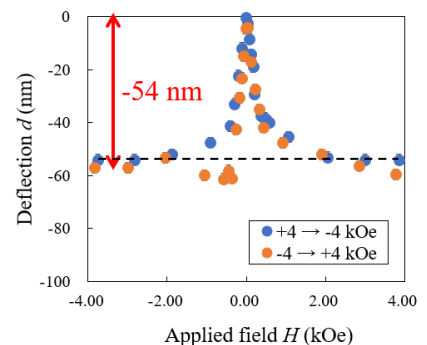


Fig.3 Variation of deflection for the Fe single crystal in magnetic field

巻線応力が環状試料の直流磁気特性に及ぼす影響

馬場康壽

(神奈川県立産業技術総合研究所)

Effect of Winding Stress on DC Magnetic Properties of Ring Sample

Y.Baba

(Kanagawa Institute of Industrial Science and Technology)

はじめに

磁性材料は発電機や電磁弁の鉄心など磁気回路の構成に広く使用されており、高性能化するためには用途に適した材料を選択する必要がある。磁性材料の特性を測定する方法の一つとして、環状試料を用いた積分方式直流 B-H 測定方法があるが、この方法は試料に一次コイルと二次コイルを巻きつけるので、試料に締め付ける力が加わる。そのため、多くの磁性材料には磁歪現象があることから、手巻き程度の応力でも逆磁歪効果によって、測定した磁化特性が本来の磁化特性とは異なることが懸念される。そこで、本研究では積分方式直流 B-H 測定方法において、手巻き程度の強さの巻線応力が磁化特性に与える影響について調べた。

実験方法

環状試料には正磁歪の大きいパーメンジュール (FeCoV) を用いて、樹脂ケースに入れてから巻線をした試料に応力が加わらない場合と試料にコイルと絶縁用テープを直接巻いて応力を加えた場合について磁化特性を比較した。環状試料は外径 45mm、内径 37.5mm、高さ 3mm とし、巻線は一次コイルに 50 ターン、二次コイルに 161 ターンを手巻きした。また、理研電子(株)製の B-H カーブトレーサ BHU-60 を用いて、最大磁界強度 $H_m=10\sim 1000\text{A/m}$ の範囲で直流 B-H 特性を測定した。測定には同一の環状試料を用いて、先に応力を加えない場合を測定して、この後に応力を加えた場合を測定した。ただし、試料をケースに入れたときの測定結果については二次コイルと試料間の空隙の磁束を補正した。

測定結果

$H_m=150\text{A/m}$ の時の B-H 曲線を Fig.1 に示す。コイルを直接巻いて環状試料に巻線応力を与えたときは B-H 曲線が磁化容易に変化した。環状試料の磁化方向は円周方向であり、コイルや絶縁テープが締め付ける力は環状試料の円周を伸ばすように作用することから、この結果は逆磁歪現象と合致している。また、各 B-H 曲線において磁束密度から磁気分極 J を算出してそれぞれの J-H ループを求めた。これから最大磁気分極 J_m を変化させた時の残留磁気分極 J_r と J-H ループの面積 S_h の特性を求めた (Fig.2)。試料に巻線応力が加わると J_r は大きくなったが、 S_h には大きな差異が見られなかった。したがって、手巻き程度の巻線応力の有無において J-H ループのヒステリシス損失はあまり変わらない。

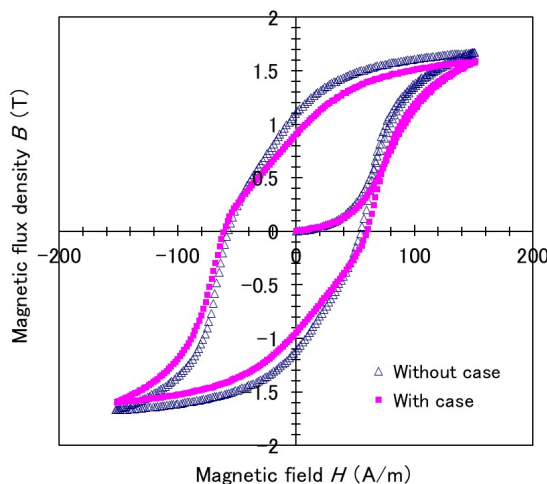


Fig.1 B-H loops (■) with and (△) without polymer case.

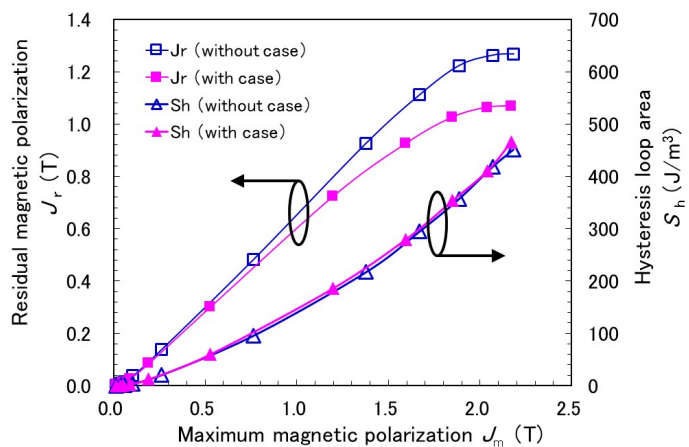


Fig.2 Characteristics of residual magnetic polarization and J-H hysteresis loop area with varied maximum magnetic polarization.

ローラー型永久磁石式磁場源の設計

佐久間洋志, 菊地敏明*

(宇都宮大, *ハヤマ)

Design of mangle type magnetic field source using permanent magnets

H. Sakuma, T. Kikuchi*

(Utsunomiya Univ., *Hayama)

はじめに

Halbach シリンダー[1,2]はその内部に強力な均一な磁場を発生させることが可能であり、2つのシリンダーを組み合わせると、磁場強度を変化させることも可能である。しかしながら Halbach シリンダーは特殊なくさび型の永久磁石を必要とし、また強力な磁力に逆らって組み立てる必要があり、これらのことがコストを増大させる要因となっている。本研究では、円柱型の小型ネオジウム磁石を用いて、低コスト、小型・軽量、省エネ・冷却不要の永久磁石式磁場源を開発することを目的とする。本講演では、磁石の大きさや位置が磁場強度や均一性、磁石自体に働くトルクに及ぼす影響について検討する。

構造と計算方法

Fig. 1 に示すように、径方向に着磁した6本の円柱型ネオジウム磁石を正六角形に配置したローラー型磁場源を考える。各磁石の角度を Fig. 1(a)のように設定すると、磁石で囲まれた空間に最大の磁場が生じる。一方、磁石の角度が Fig. 1(b)のとき、内部の磁場はゼロとなる[3]。様々な磁石の大きさや距離、角度において磁石周辺の磁場と永久磁石に働くトルクを2次元有限要素法 (Field Precision, TriComp) により計算した。磁石の磁束密度は1.1 Tとした。また、減磁特性は理想的な傾き-1の直線と仮定した。

計算結果

Fig. 2 に示すように、磁石の直径を20 mmに固定して、磁石(の中心)間距離を近づけていくと、最大磁場は強くなるが、磁場の均一性は低くなる。また、当然ながら試料や測定器具を設置する空間は狭くなる。さらに、磁石を回転させるためのトルクも大きくなるため、用途に応じて最適な設計をする必要がある。一般的なホール効果測定や磁気光学効果測定において、最大磁束密度0.5 Tが一つの目安となるだろう。計算結果から、直径20 mmのネオジウム磁石を用いて、0.5 Tの磁束密度を得る場合、直径30 mm程度の空間を確保できることがわかる。また、最大トルクは30 Nm/m程度であり、小型のモーターとギアを用いて回転させることが可能である。講演では、試作機を製作し、計算と比較した結果も紹介する予定である。

参考文献

- 1) K. Halbach, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* NS-26, 3882 (1979)
- 2) M. Kumada *et al.*, *CERN Courier* 41, 9 (2001)
- 3) R. Bjørk *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.* 322, 3664 (2010)

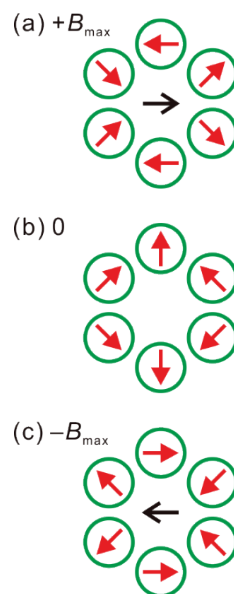


Fig. 1 Magnetic field produced by mangle type magnetic field source.

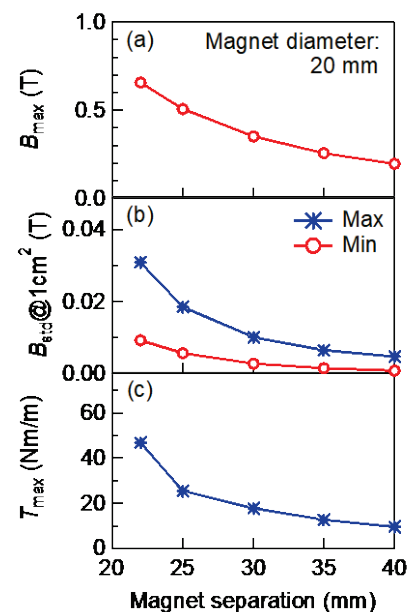


Fig. 2 Maximum flux density, standard deviation of flux density, and maximum torque as functions of magnet separation.

高周波磁化過程測定の高精度化と材料特性評価

小野寺礼尚¹、黒岩拓也^{2*}、柳原英人³、金甫根⁴、藏裕彰⁴、喜多英治¹
 (¹茨城高専、²筑波大学大学院(現シャープ)、³筑波大学、⁴(株)デンソー)

Improvement of accuracy in a high frequency magnetization process measurement and characterization of magnetic materials

R. Onodera¹, T. Kuroiwa², H. Yanagihara², M. Kin³, H. Kura³ and E. Kita¹
 (¹NIT Ibaraki College, ²Univ. of Tsukuba, ³DENSO CORPORATION)

はじめに

近年、磁性材料の高周波応用に関する研究開発が盛んになされている。例えば、電源などパワーデバイスの小型化に伴い、駆動周波数の高周波化が求められており、搭載されるリアクトル用コア材として用いられる軟磁性材料は磁性材料由来の損失（鉄損）の抑制が強く求められている。一方、磁性材料を高周波磁界下で保持することで発生する熱をがん治療に用いるハイパーサーミア技術では効率の良い発熱のため鉄損の大きな磁性材料が必要となる。どちらの技術も磁性材料の高周波磁界下での磁気応答を正確に把握することがデバイス設計のために重要である。

本研究では、コア材料および発熱体としての磁性粒子の開発に資する、高周波における高精度な磁化曲線計測と周波数特性評価から材料特性の正確な見積もりが可能な装置を構築することとする。

実験方法

本装置の磁場発生部は磁場発生用空芯コイルとコンデンサからなる直列 LC 共振回路と高周波電源(1 kW)で構成されており、20 k~1 MHz の範囲で高周波磁場を発生させることができる¹⁾。

磁化検出には、磁化・磁場検出コイルとデジタルオシロスコープを使用し、磁化測定の精度と周波数依存性を評価するために、標準試料として常磁性 Dy₂O₃ 粉末、YIG 3 mm 球などを使用して周波数 60 k-200 kHz、磁場振幅 600 Oe の範囲で測定を行なった。

結果

Figure 1 は YIG 球を周波数 58 kHz、磁場振幅を約 600 Oe で測定した結果である。反磁場係数に依存する飽和磁場が観測され、その値により磁場と磁化の較正が可能である。挿図には原点付近の拡大図を示している。Fig. 2 は Dy₂O₃ 粉末を 82 kHz、約 100 Oe で測定した結果である。磁化は磁場変化に対して非常に良い線形性を示している。挿図には原点付近の拡大図を示した。Fig. 1, 2 における見かけの保磁力はそれぞれ、2、0.2 Oe ほどである。どちらの測定においても磁化曲線は原点付近を通過するべきであるが、このような誤差が生じてしまう。この誤差は、主に信号検出の分解能や、磁化検出コイルにおけるキャンセルのアンバランスから生じるバックグラウンド信号などが原因で生じると考えられる。誤差は測定条件に依存するが、磁場振幅の小さな領域では約 0.2 Oe であり、低損失材料の特性評価に応用可能なレベルまで抑制できつつある。誤差の低減は今後の課題でもあるが、信号測定装置の高分解能化や、検出コイルの空間配置の検討により、高精度化を達成できると考えている。

当日は、典型的なコア材料や磁性流体の高周波測定結果についても報告する。

参考文献

1) A. Seki, *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser., **521** (2014) 012014.

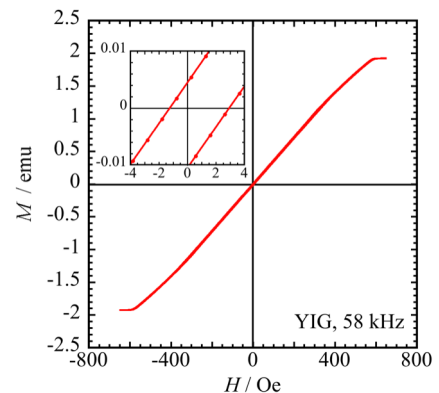


Fig. 1 Magnetization curve of YIG sphere (ϕ 3 mm) at 58 kHz. Inset shows enlarged view around the origin.

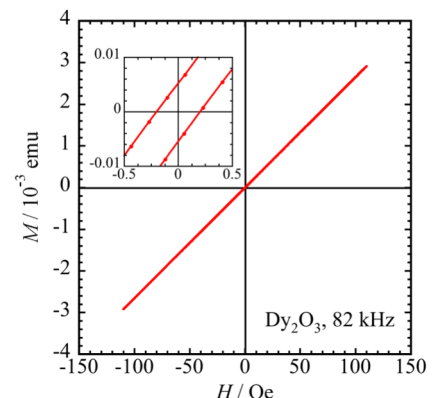


Fig. 2 Magnetization curve of Dy₂O₃ powder at 82 kHz. Inset shows enlarged view around the origin.

ウェハレベルの磁性薄膜高周波磁歪定数・分布評価法の開発

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)

Measurement of local magnetostriction for a thin film deposited on Si wafer

O. Mori, Y. Endo*, Y. Shimada, S. Yabukami*, R. Utsumi
(Toei Scientific Industrial co., ltd, *Tohoku 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磁性膜に近接させて計測する透磁率評価法と同時に、応力負荷による磁気弾性効果を利用して局所的な磁歪も評価できる高周波特性計測法を開発した。この計測法を用いてウェハ上薄膜の局所的磁歪の測定評価を行った。

2 計測方法 50 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計測方法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 (Microstrip 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。計測は Fig. 1 のウェハ中心位置 O および中心から前後左右 30mm 位置 A~D の 5 点で行う。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 はウェハ位置 O の応力負荷の有無による 50 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 289 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約 30 MHz 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。(1)式の $(f_{r+}^2 - f_{r0}^2)/f_{r0}^2$ と $1/(H_{kf} + H_{ex})$ は線形関係となっていて、各 H_{ex} におけるフィッティングが可能である。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、 -3.46×10^{-6} であった。また、A~O それぞれの位置で測定した結果を Table. 1 に示す。この結果から、ウェハ上のいずれの位置でも磁性膜の磁歪はほぼ均一となっている事が解った。

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.

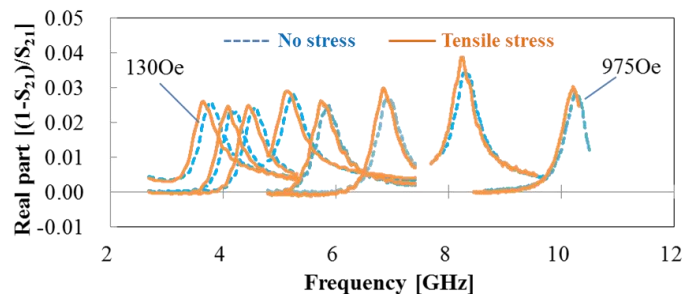


Fig. 2 FMR of CoZrNb film (4inch Wafer, 50nm thick).

table. 1 The magnetostriction distribution in each position.

Position	λ_s
O	-3.46×10^{-6}
A	-4.03×10^{-6}
B	-3.60×10^{-6}
C	-3.63×10^{-6}
D	-3.75×10^{-6}

短絡同軸線路による磁性薄膜の 30GHz までの複素透磁率測定

武田 茂、青木 英恵*、山崎真之介**、増本 博*、鈴木洋介**
 (Magnontech, *東北大学, **キーコム株)

Complex permeability measurement of magnetic thin film up to 30 GHz by short-circuited coaxial line

S. Takeda, H. Aoki*, S. Yamasaki**, H. Masumoto*, H. Suzuki**
 (Magnontech, Ltd., *Tohoku University, **KEYCOM Corp.)

はじめに 遮蔽型短絡マイクロストリップ線路(MSL)を用いて磁性薄膜の複素透磁率¹⁾及び短絡同軸線路(SCL)を用いて磁性シートの複素透磁率の測定方法も報告した²⁾。今回、短絡同軸線路を用いてトロイダル形状の面内等方性磁性薄膜の複素透磁率を 30GHz まで測定したので報告する。

実験方法と解析方法 短絡同軸線路としては APC-7 を用いた。磁性薄膜(Co-SiO₂³⁾)は、トロイダル形状の 7 mmφ x 3 mmφ x 0.5 mm のガラス基板の上にスパッタ法で作製し、その厚みは 1.5 μm である。磁性薄膜は垂直異方性を有し、面内の異方性はほとんどない。複素透磁率測定の際のゼロ点補正は強い静磁界(5240 Oe)を印加する field 法を用いた。Fig.1 に短絡同軸線路に薄膜試料を挿入した場合の概略断面図を示す。試料面は短絡部に接触するようにする。このとき、電源側の基板面を標準面として短絡部側を集中定数近似し、等価回路を LC 並列回路として解析した。結合係数は $h = t/(d+t) = 0.03$ と比較的正確に求められるので、絶対測定が可能である。d=0.5 mm は基板の厚み、t=1.5 μm は薄膜の厚みである。ただし、MSL と異なり、Fig.2 に示すように、field 法を採用し外部から静磁界 H_{ext}を加えた場合、A 部、C 部は H_{ext} と h_{rf} は平行で、この部分は $\mu=1$ と考えられるが、D 部と B 部は垂直であり H_{ext} による強磁性共鳴の信号(FMR2)が残る。この信号を LLG 方程式より算出したものと同じと仮定して差し引き、磁性薄膜材料自体の透磁率(FMR1)を導出した。Fig.3 が検出された信号であり、Fig.4 が外部磁界 H_{ext} による強磁性共鳴の信号を差し引いた材料自体の値(FMR1)である。

参考文献

- 1) S. Takeda, M. Naoe, *J. Magn. Mang. Mater.*, **449** (2018) 530-537,
- 2) 武田、Ranjit Sai, 青木、山口、発知、本村、鈴木、「短絡同軸線路を用いた高周波透磁率の測定—30GHz への挑戦」、電気学会マグネティックス研究会資料 MAG-15-170 (2016), 於富山高専,
- 3) H. K. Aoki, S. Takeda, S. Ohnuma, H. Masumoto, *IEEE Magn. Lett.* (2018), in press.

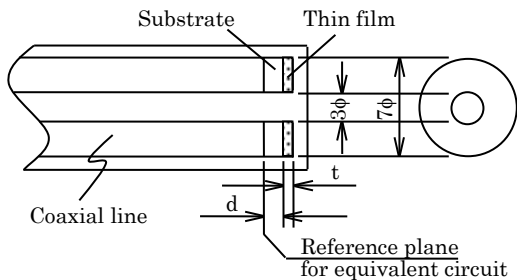


Fig.1 Cross-sectional view of short-circuited coaxial line loading a toroidal thin film.

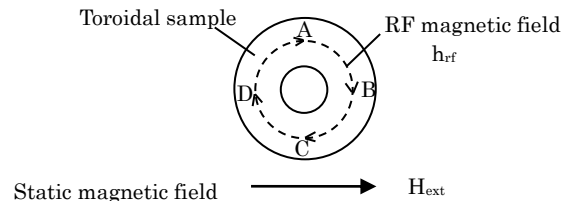


Fig.2 Schematic configuration of static magnetic field and RF magnetic field in the toroidal sample.

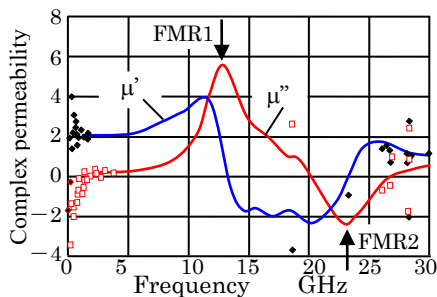


Fig.3 Measured μ - f curve of magnetic thin film on 0.50 mm substrate with 1.5 μm thickness by field method (5.3kOe)

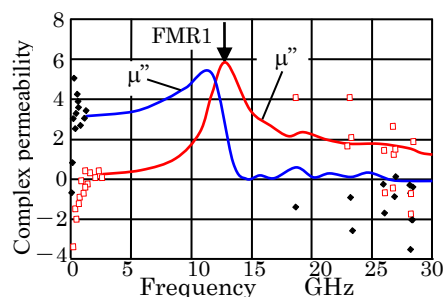


Fig.4 Corrected μ - f curve of Fig.3 by LLG equation.

高周波複素透磁率測定における反磁界効果

武田 茂、田口 実*、山崎真之介*、本村貞美*、発知富夫*、鈴木洋介*
(Magnontech, *キーコム)

Demagnetization effect in high frequency complex permeability measurement

S. Takeda, M. Taguchi*, S. Yamasaki*, S. Motomura*, T. Hotchi*, H. Suzuki*

(Magnontech, Ltd., *KEYCOM Corp.)

はじめに 高周波複素透磁率 $\mu' - j\mu''$ を測定する場合、遮蔽型短絡マイクロストリップ線路(MSL)を用いて短冊状試料を測定した結果と、短絡同軸線路(SCL)を用いてトロイダル試料の複素透磁率を測定した結果は異なる。前者の低域の透磁率 μ' は減少し、高域における μ'' のピーク周波数 f_r (自然共鳴周波数)は高周波側にシフトする。MSLとSCLの関係は、マクロ反磁界係数 N で1対1に対応させることができる¹⁾²⁾³⁾。一方、高周波磁気工学ではLLG方程式で導入されるミクロな反磁界係数 N_x, N_y, N_z がある。今回、LLG方程式の計算結果でも N_x が大きくなると自然共鳴周波数が高域に移動するという現象を確認した。

実験結果 まず、同じ132 μm のNSS (Noise Suppression Sheet) から5 mm x 16 mmの短冊試料及び7 mm ϕ x 3 mm ϕ のトロイダル試料を切り出す。Fig.1は、それぞれの $\mu - f$ 特性をMSL、SCLで測定した結果を示す。SCLはAPC-7、MSLの諸元は、ストリップ線路幅 $w=7.5$ mm、線路高さ $h_1=2$ mm、 $h_2=6.7$ mm、治具長 $l=8$ mmである。トロイダル試料の場合、1 MHzで $\mu'=90$ であるが、10 MHzから漸減しはじめ1 GHzでは5程度となる。また、 μ'' は約200 MHzでピークを取る。この周波数が自然共鳴周波数 f_r である。一方、短冊試料では、1 MHzで $\mu'=40$ と低下し、自然共鳴周波数 f_r は750 MHzまで上昇する。次に、MSLのデータを補正し、SCLの結果に一致させた。そのとき得られたマクロ反磁界係数は $N=0.0149$ であった。

計算結果と考察 ミクロ反磁界との関係を調べるためにLLG方程式を計算した。その結果をFig.2に示す。トロイダル試料を5 mm x 2000 mmの短冊試料と仮定した。このときの反磁界係数をチャージモデルで計算し、 $N_x=0, N_y=0.983, N_z=0.0168$ を得た。トロイダルの円周方向に相当する高周波磁界の方向がx方向である。半径方向がz方向、厚み方向がy方向である。ここでは、磁性材料の飽和磁化 $4\pi M_s=5000$ G、z方向の異方性磁界 $H_z=140$ Oe、緩和係数 $\alpha=1$ とした。このときの自然共鳴周波数 f_r は約170 MHzであった。実験の200 MHzより少し低い。また、10 MHz以上で漸減する現象は計算では再現できない。一方、短冊試料の実際の寸法は5 mm x 16 mmであるが、x方向の反磁界係数 $N_x=N=0.0149$ となるように、5 mm x 4.28 mmの短冊試料とした。このときの反磁界係数は $N_x=0.0149, N_y=0.974, N_z=0.0109$ である。Fig.2に示すように、1 MHzでの μ' は30程度と低下し、自然共鳴周波数 f_r は500 MHzにシフトした。定量的な一致は見られなかったが、ミクロ反磁界が増加すると自然共鳴周波数が増加する現象を確認できた。

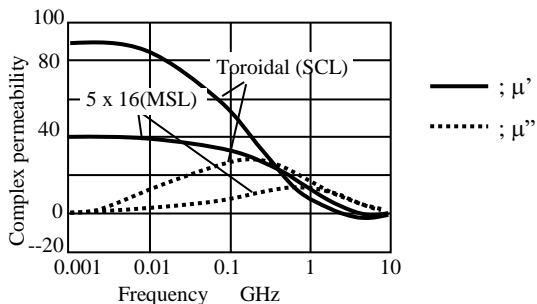


Fig.1 Measured results of NSS by MSL jig and SCL jig ($N=0.0149$).

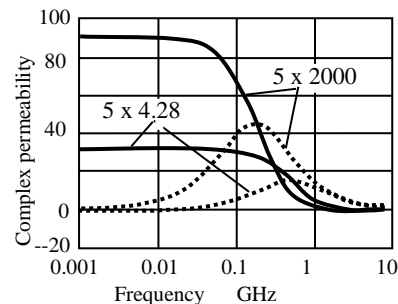


Fig.2 Calculated results by LLG equation for 5 x 2000 ($N_x=0, N_y=0.958, N_z=0.042$) and 5 x 4.28 ($N_x=0.0149, N_y=0.974, N_z=0.0109$).

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) S. Takeda, et al., *J. Magn. Soc. Jpn.*, **39**, 227-231 (2015),
- 3) S. Takeda, et al., *J. Magn. Soc. Jpn.*, **39**, 116-120 (2015),

正／負透磁率材料の積層伝送線路の表皮効果抑制に関する理論的検討

鮎澤 祥史, 森山竜太, 久保村航大, 中山英俊
(長野工業高等専門学校)

Theoretical Study on Skin Effect Loss Reduction of Cylinder Multi-layer Transmission Line with Positive/Negative Permeability Materials
Yasufumi AIZAWA, Ryuta MORIYAMA, Kodai KUBOMURA 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⁾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理論検証のため、まずは円形断面線路を対象として検討しており、以前に多層モデルについて報告した結果²⁾を踏まえて、複素透磁率の虚部による磁性損失を考慮して検証した結果を報告する。

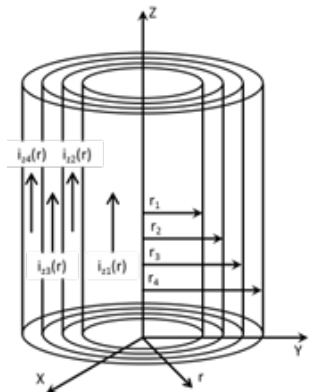


Fig. 1 Structure of cylinder transmission line.

正／負透磁率材料の積層構造による高周波伝送線路理論

本研究では理論的検証のため、単純な円形積層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と銅損は既報²⁾で示され、式(1)第1項に相当する。第1項は、各層の材料の導電率 σ_n と電流密度 $i_{zn}(r)$ により求められる銅損である。第2項は、従来研究で未対応であった磁性材料の複素透磁率の虚部による磁性損失である。磁性損失は、局所的な磁界 $H(r)$ と複素透磁率の虚部 μ'' から求められる。銅損と磁性損失を合わせた n 層目の損失 L_n を式(1)で評価でき、低損失な積層構造の設計を得ることができる。

$$L_n = \int_{r_{n-1}}^{r_n} \frac{|i_{zn}(r)|^2}{\sigma_n} \cdot 2\pi r \cdot dr + \int_{r_{n-1}}^{r_n} \frac{1}{2} \cdot \omega \cdot \mu_n'' \cdot H(r)^2 \cdot 2\pi r \cdot dr \quad (1)$$

計算結果及び今後の展望

正／負透磁率材料の2層構造において、2つの材料の導電率 σ_1 および σ_2 をCuと同等 (5.81×10^7 S/m)とし、比透磁率の大きさがともに1である正／負透磁率材料($|\mu_{r1}| = |\mu_{r2}| = 1$)を想定し、負の透磁率材料は、複素透磁率の実部が負($\mu = \mu' - j\mu'', \mu' < 0$)で、そのQ値($= |\mu'|/\mu''$)の大きさを変化させた場合の損失を比較検討した。設定条件は、周波数 $f = 1$ GHz、最外層の半径 $r_{max} = 8 \mu\text{m}$ とし、内側の負の透磁率材料の積層半径 $r_1 = 5.67 \mu\text{m}$ とし、Q値に対する伝送線路全体の損失と、そのうち銅損の大きさを計算した結果をFig. 2に示す。Fig. 2における伝送線路全体の損失と銅損との差が、今回新たに考慮した磁性損失を示している。結果として、Q値が小さいほど磁性損失も大きくなり、全体損失に占める磁性損失の割合を計算することができた。

今後は、複素透磁率の虚部による磁性損失を含めて、適用周波数や想定する材料値等の条件を変化させ、積層伝送線路の表皮効果抑制および損失低減を目的とした構造設計の検討を進める予定である。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 17K14674 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 41th Annual Conf. Magn. Jpn., 41, 184 (2017).

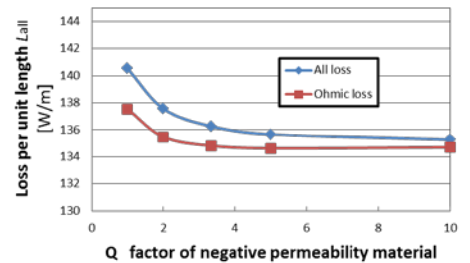


Fig. 2 Loss per unit length vs. Q factor of negative permeability material.

スプレーコート法によるコンポジット磁性膜の磁気特性の測定

原 健、山口 正洋*、小西 淳一**

(リコー電子デバイス株式会社、*東北大学、**株式会社リコー)

Measurement of magnetic properties of a thin soft ferrite film by spray-coat method

T. Hara, M. Yamaguchi*, J. Konishi**

(RICOH Electronic Devices Co., Ltd., *Tohoku University, **RICOH Co., Ltd.)

はじめに

IoT ワイヤレスセンサノードと呼ばれる端末機器には、小型で高効率な電源制御回路が必要とされている。これを実現するべく、DCDC コンバータ用 IC とインダクタを一体型にする技術が広く検討されている⁽¹⁾。そのような中で、簡便かつ低コストに製造可能な薄膜インダクタの実現が期待されている。

本稿では、薄膜インダクタ向け磁性層の製膜工程にスプレーコート法を提案し、本工法によるコンポジット磁性膜の基本的な磁気特性を測定した内容を報告する。

実験方法

スプレーコート法とは、塗布材の噴霧することにより凹凸な表面への塗布に適した工法である。Si 基板上にスプレーコート法で Ni-Zn-Cu 系ソフトフェライト粉末 (平均粒径 = 0.61 μm 、初透磁率 = 544 @ 1 MHz) と、エポキシ系樹脂とのコンポジット材を形成した。フェライト粉末の充填率は 19.5 wt%、膜厚は 62.6 μm とした。スプレーコートを行う際には希釈液として樹脂用溶剤と PGMEA 溶剤を用い、大気下・室温で塗布を行い、直後に 80 $^{\circ}\text{C}$ にて 2 分間の乾燥を行った。M-H 曲線は VSM で、複素透磁率はシールドループコイル型高周波透磁率測定装置を用いて測定した。

実験結果

Fig.1 に本研究で作成した磁性膜の M-H 曲線を示す。コンポジット材としての飽和磁化 M_s は 80 emu/cc と Ni-Zn-Cu 系ソフトフェライト粉末の M_s に比べて低く、フェライト粉末の充填率を 19.5 wt% としたことが理由として挙げられる。

次に、Fig.2 に複素透磁率を示す。バイアス DC 磁界を増加させることで、低周波帯では実部が減少し、周波数に対して一定となり、また、高周波帯では共鳴周波数が高周波側にシフトしており、一般的な磁性膜の傾向と一致した。

あとがき

本稿では、スプレーコート法を適用したコンポジット磁性膜の磁気特性を測定し、混合攪拌やスプレープロセスによる応力の影響は無視でき、所期の磁気特性が得られることが確認できた。インダクタへ適用するため今後の課題として、磁性体粉末の体積濃度の向上化が挙げられる。

参考文献

- 1) A. W. Lotfi, et al, "Integrated, High-Frequency DC-DC Converter Technologies Leading to Monolithic Power Conversion, CIPS 2012, Paper 07.5 (2012).

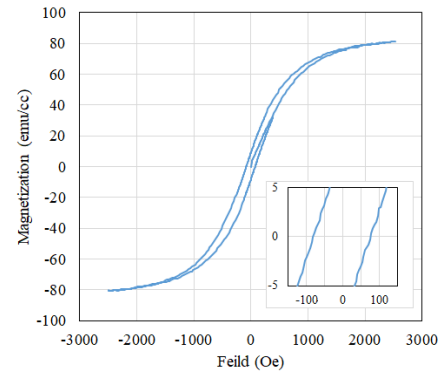


Fig.1 Static magnetization curve

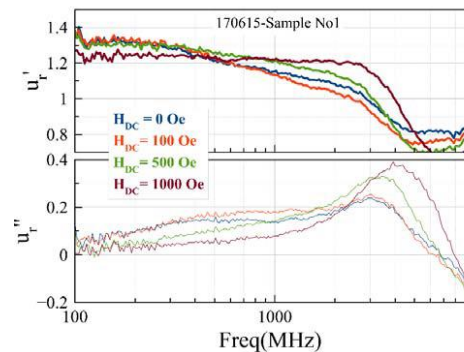


Fig.2 Complex Permeability

Study on the Magnetic Nonlinear Mixing Frequency Technique and Its Application in Mechanical Properties Assessment

Yu Chang^{1,2}, Jingpin Jiao¹, Satoru Kobayashi², Cunfu He¹, Bin Wu¹

¹College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing, China

²Department of Physical Science and Materials Engineering, Faculty of Science and Engineering, Iwate University, Iwate, Japan

Assessment of the mechanical properties is of high importance, both for safety and economical in the modern industrial. The majority of conventional non-destructive evaluation techniques are insensitive to the degradation in the microstructure of the metal. However, it is well known that the nonlinearity of magnetic hysteresis in ferromagnetic materials is completely depended on the material microstructure [1] and the mixing frequency method can precisely measure the nonlinear effect [2]. We investigate a new micromagnetic method that exploits the magnetic mixing frequency technique to induce the magnetic nonlinearity. Figure 1 shows a typical example of mixed B-H loop with a set of minor loops superposing on the saturation loop. Then, the minor loss coefficient and the magnetic nonlinear factor are used to characterize the mechanical properties of materials. An experiment result of case harden which assessed by the magnetic nonlinear factor is shown in Figure 2. Also, the magnetic nonlinear mixing frequency method was used to evaluate the fatigue damage of the steel. Compared to the traditional non-destructive evaluation methods, the studied method has an advantage in assessing the subtle changes in microstructural mechanical properties. It has the potential to be used as a non-destructive technique.

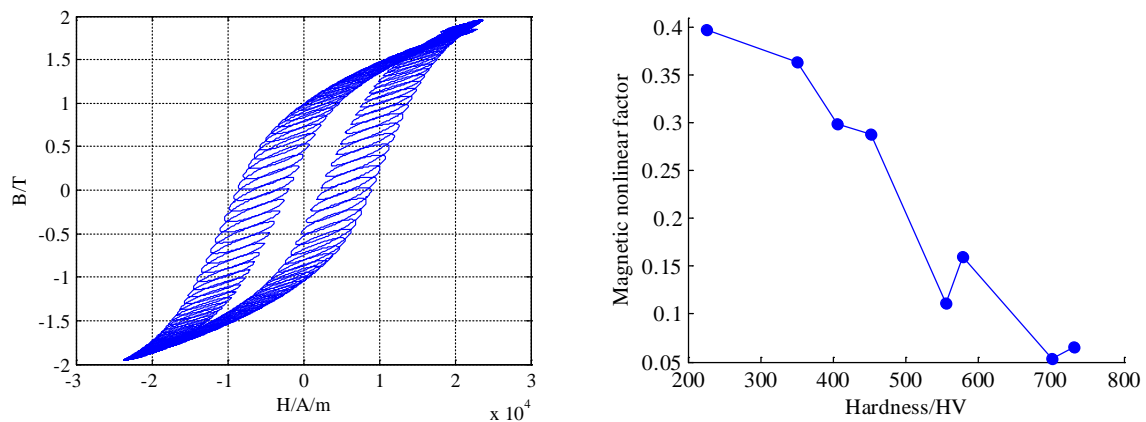


Fig1. Hysteresis loop of mixing frequency excitation Fig 2. Hardness dependencies of the magnetic nonlinear factors

Reference

- 1) Jiles, David C, and Y. Melikhov. "Modelling of Nonlinear Behaviour and Hysteresis in Magnetic Materials," Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Materials. John Wiley & Sons, Ltd, pp.71-81. 2007.
- 2) Ficko, B. W., P. Giacometti, and S. G. Diamond. "Nonlinear Susceptibility Magnitude Imaging of Magnetic Nanoparticles," Journal of Magnetism & Magnetic Materials, vol. 378, pp. 267-277. 2015.