

令和元年6月18日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04371

研究課題名（和文）磁壁移動を利用した低周波駆動薄膜磁界センサの実現と電磁非破壊評価の高度化への貢献

研究課題名（英文）Enhancement of electromagnetic nondestructive evaluation technique using thin-film magnetoimpedance sensor with domain wall motion at low frequency

研究代表者

菊池 弘昭（Kikuchi, Hiroaki）

岩手大学・理工学部・准教授

研究者番号：30344617

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,600,000円

研究成果の概要（和文）：薄膜を利用した磁気インピーダンスセンサ素子における低周波で確認された特異な現象について、磁壁の移動を考慮した理論計算及び実験的考察から、その要因が磁壁共鳴によることを明らかにした。この現象を利用した磁気センサの可能性について検討し、数10MHzの周波数領域で、高感度な磁界センサの実現可能性があることを明らかにした。また、この磁気センサに関連して直流バイアス電流が素子の感度改善や非対称性を示すことを実験的に示し、その要因が素子断面形状に起因する可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

薄膜の磁界センサは100MHz以上の高周波領域においては、ある程度高感度を期待できるが、駆動・検出回路の作製が高コスト化の要因となった。今回の研究成果により汎用回路の利用で駆動・検出回路と整合する周波数領域で高感度を実現し得ることが明らかにされたので、低コストな高感度センサを期待できる。薄膜利用なことから小型化も期待でき、高い空間分解能の可能性があり、電磁非破壊評価における局所領域の検出に貢献できる。このことは、人々の安心な暮らしの実現に資する。

研究成果の概要（英文）：The anomalous phenomena appeared on thin-film magnetoimpedance sensor element at a relatively lower frequency was analyzed theoretically based on a domain wall equation and discussed by combined with experimental results, which clarified that the phenomena is attributed to domain wall resonance. Moreover, we demonstrated the potential of high sensitive magnetic field sensor at lower frequency using the phenomena. Related to thin-film magnetoimpedance sensor, we also clarified that a bias direct current is effective to improve sensitivity. The bias direct current induces asymmetric impedance properties, which is explained by the effects of cross sectional shape of an element.

研究分野：磁気応用工学

キーワード：磁気インピーダンス 薄膜 磁壁共鳴

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

インフラ社会基盤構造物は1960年代の高度経済成長期に集中的に整備され、高経年化(高齢化)が進んでいる。そのため、構造物の健全性評価技術の高度化への期待は一層増している。一方、社会基盤構造物に多用される鉄鋼材の生産現場では、歩留りや品質向上に加えて品質保証が重要である。これら健全性評価や品質保証に貢献する技術のひとつが非破壊評価である。非破壊評価の手法は多様であるが、渦電流探傷、磁束漏洩、磁気ヒステリシス法などの電磁非破壊評価は、内部組織と磁性の相関利用による亀裂発生前の材質劣化評価や、磁場分布の乱れを利用したサブ mm 以下の内部微小欠陥の検知など幅広く対応する可能性を秘めた手法で、次世代技術としての期待がある。特に、内部微小欠陥の検知では、局所領域での微弱な磁場検出の要望があり、薄膜を利用した磁気センサの開発を進行していた。その中で、数10MHz領域でインピーダンスが大きく変化する現象を実験的に観測しており、これを活用できれば低周波で駆動可能な高感度磁界センサの開発に繋がる可能性を見出した。ただし、このインピーダンス増大のメカニズムについては現時点で不明であり、また、素子構造によって発生の有無に違いを生じるなど再現性を含めて特性制御の方法も確立されていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、磁性薄膜に高周波電流を直接通電して外部から磁場を印加した場合において観測された数MHzから数十MHzの比較的low周波でのインピーダンス変化増大の動作メカニズムについて、不明な点を磁区観察による実験や磁化過程として磁壁移動を考慮に入れた方程式に基づく理論的アプローチにより解明する。得られた知見により、低周波駆動可能な高感度磁界センサの実現を目指す。また、薄膜素子に関連して、直流バイアス電流印加による感度改善の効果について検討する。

3. 研究の方法

(1) 試料準備

アモルファス磁性材料のCoNbZr膜をスパッタ法により成膜し、フォトリソグラフィ技術によりセンサ素子を作製した。磁性体の膜厚は1-2 μm とした。成膜後、磁界中熱処理により異方性の制御を行った。素子の幅方向が磁化容易軸となるように制御した。電極にはCuを用いて、膜厚は2 μm とした。

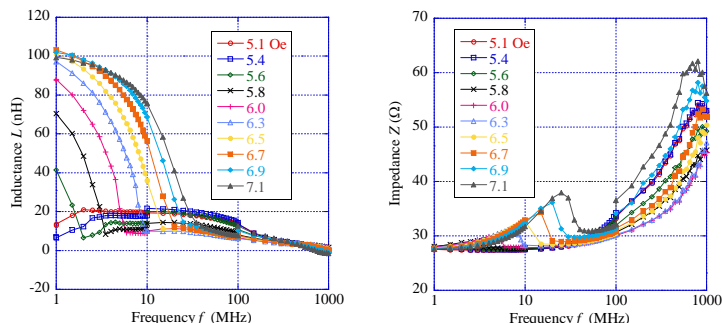
(2) 薄膜磁界センサ素子の評価

ネットワークアナライザ(HP8752A)とウェハープローブを用いて素子のインピーダンスを評価した。インピーダンス計測時には、ヘルムホルツコイルにより素子の長手方向に外部磁界を印加した。素子に通電する高周波電流の周波数は1-1000MHzとし、入力電力は-20~0dBmとした。また、素子の磁区観察をカー効果顕微鏡により行った。

4. 研究成果

(1) 低周波領域におけるインピーダンス特性

図1には素子幅20 μm の素子において外部磁界を変化させながら計測したインダクタンス及びインピーダンスの周波数特性を示した。入力電力は-10dBmである。バイアス磁界が5.1から7.1Oeのときの結果を示しており、10MHz付近でインダクタンスの急激な低下やインピーダンスのピークが見られる。また、このときインダクタンスは低周波で例えば1MHzでは100nH程度の大きな値を示した。一方、素子幅80 μm の場合に同様の測定を実施したが、低周波領域でのピークの増加は見られない。インダクタンスにおいても磁界印加時には低周波領域でインダクタンスは一定の値をとる。通常、このセンサの動作機構としては、磁化回転機構による透磁率変化により表皮効果や強磁性共鳴を介して、高周波になるにつれて素子のインピーダンスが変化する。一方で、低周波では渦電流制動により、磁壁移動が起こらなくなるためインピーダンス変化は小さい。



(a) インダクタンス

(b) インピーダンス

図1 インダクタンス・インピーダンスの周波数特性(H = 5.1 ~ 7.1 Oe)

(2) 磁壁移動の考慮

数 MHz 領域においては、薄膜素子の場合、透磁率変化によるインピーダンス変化は小さいことが理論的にも理解される。一方、実験的には比較的low周波領域で変化が確認されており、数 MHz においては磁壁移動がまだ生じる可能性もあり、何らかの寄与があるものと推測される。また、特性を見ると急峻なインピーダンスのピークとインダクタンスの低下が確認でき、共鳴現象の可能性を示唆している。そこで、磁壁共鳴が可能性として示唆されるので、ここでは理論的に検証した。通常は薄膜素子の場合、磁化回転に基づく強磁性共鳴を考慮したバイアス磁化率の理論により透磁率を算出し、その結果をマクスウェルの方程式から導出されるインピーダンスの式に代入して、インピーダンス変化を説明し、磁壁移動は考慮しない。ここでは、磁壁の運動方程式に基づき、磁壁共鳴を考慮した透磁率を算出した。実際は磁壁方程式に含まれる質量や制動定数、復元力は実測できないので、それらをフィッティングパラメータとして用いて、実験値にフィッティングが可能か検討した。図 2 はその結果の一例を示した。磁化回転のみを考慮した場合、磁場なしの状態では、インピーダンス、インダクタンスともによく実験値と一致するが、磁場印加時、すなわち、磁壁移動が生じ得ると低周波領域では一致しない。それに対し磁壁移動を考慮した式を用いると低周波での変化をうまく説明可能なことが明らかである。

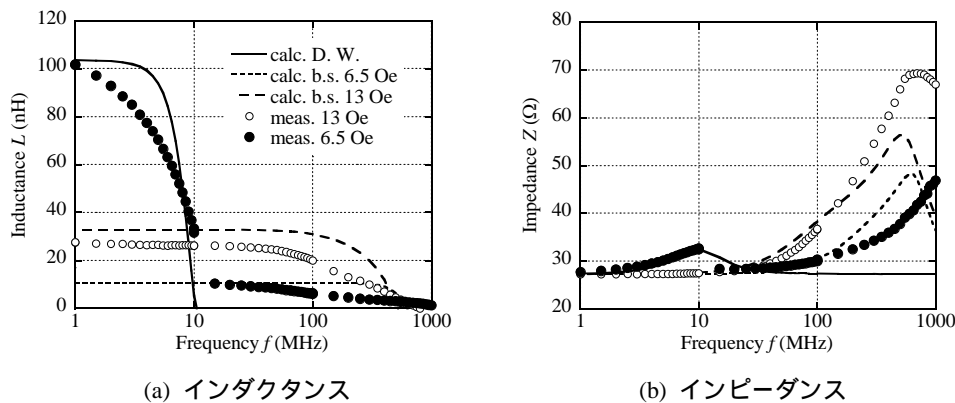


図 2 インダクタンス・インピーダンスの理論計算(磁壁移動考慮)及び実験値

続いて、磁場の強度が変わった場合についても、先のフィッティングパラメータを適当に変化させると図 3 のように周波数特性を表現でき、この結果は実験結果と一致する。以上の結果から、低周波領域におけるインピーダンス、インダクタンスの振る舞いは磁壁共鳴によるものと結論づけた。

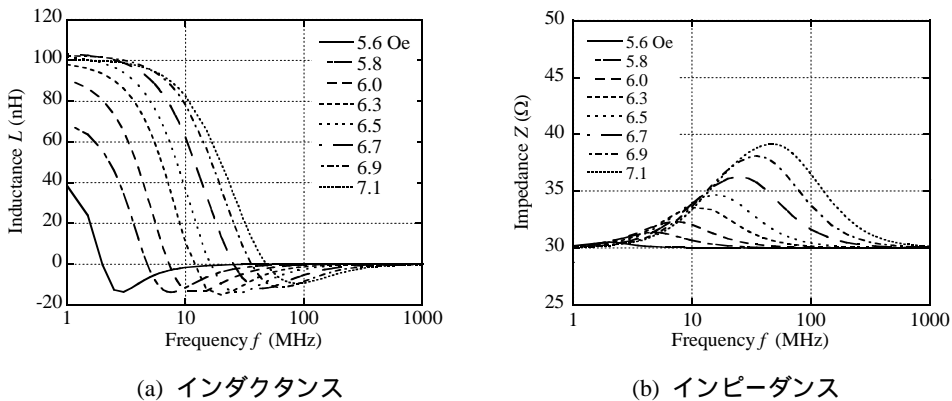
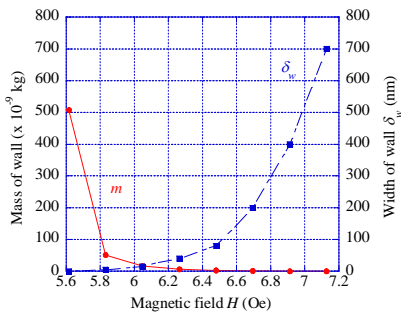
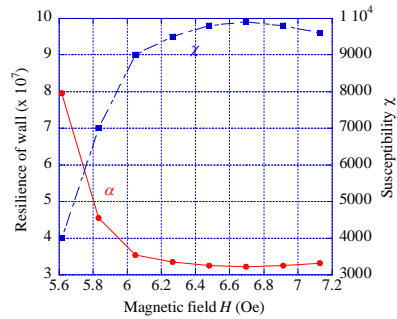


図 3 磁壁移動を考慮したインダクタンス・インピーダンスの周波数特性 (計算値)

図 4 は磁壁移動考慮した式中に現れる、磁壁の質量 m 、復元力 α の外部磁界に対する変化を示したものである。ここで磁壁の質量や復元力は磁壁の幅 δ_w や磁化率 χ と結びつけられている。外部磁界印加とともに復元力、質量は低下している。実験結果から磁界印加とともに磁壁の共鳴周波数は増加しており、復元力の低下と比べて質量の低下がより顕著に進行することを示している。また、質量が低下することから、磁壁の幅が外部磁界増加とともに広がることを示している。



(a) 質量 m 及び磁壁幅 δ_m

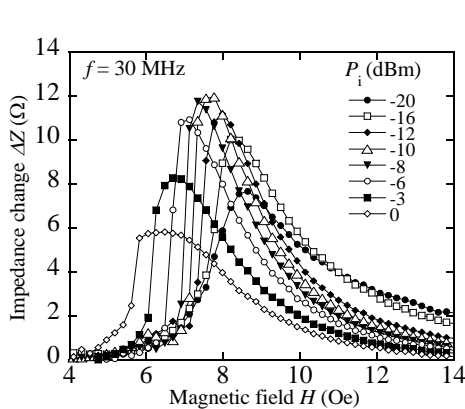


(b) 磁化率 χ 及び復元力 α

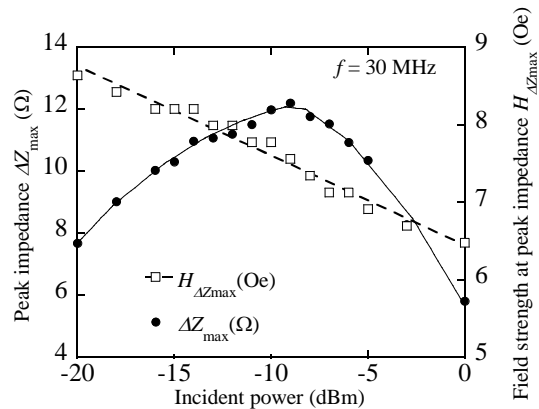
図 4 磁壁移動を考慮した場合のパラメータと印加磁場の関係

(3) 磁壁共鳴の入力電力依存性

低周波領域におけるインピーダンス変化が磁壁共鳴であることを明らかにしたが、この現象は常に生じるわけではないことも実験的に明らかとなっている。(1)で述べたように、幅 80 μm の素子において、入力電力-10dBm では、顕著な共鳴は確認されなかった。ここでは、入力電力に対する依存について明らかになった点を述べる。図 5(a)は 30 MHz に周波数を固定して、入力電力を変化させた場合のインピーダンス変化の外部磁界依存性を示したものである。また、(b)は 5(a) に基づき、インピーダンスの変化が最大となった時の変化量及びそのときの磁界強度を入力電力に対してプロットした図である。入力電力が低い時や高い時はインピーダンス変化が小さくなっている。入力電力が低すぎても磁壁共鳴が顕著には起こらず、高すぎても抑制する効果があることが判明した。幅 20 μm の素子では 30 MHz で動作させる場合-10 dBm が最適となる。



(a) ΔZ vs. H

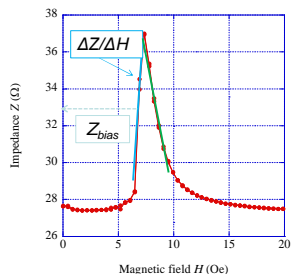


(b) $\Delta Z_{\text{max}}, H_{\Delta Z_{\text{max}}}$ vs. P_i

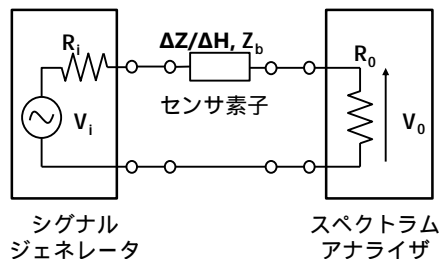
図 5 インピーダンス変化の磁場依存性及びインピーダンス変化の最大値・ピークを取る磁界強度の入力電力との関係

(4) 低周波領域でのセンサ動作の可能性及び感度見積

図 6 (a) は 20 MHz, -10dBm で計測した場合のインピーダンスの外部磁界依存性である。図中にあるように最大傾きを $\Delta Z/\Delta H$ として定義し、その点でのインピーダンスを Z_b とする。図 6 (b) のような測定回路を想定し、スペクトラムアナライザの雑音を熱雑音レベルまで低減できるものと仮定して、検出磁界感度を求めると 10^{-7} Oe 台の検出が可能であることが明らかになった。以上の結果から、数 10 MHz 領域の低周波領域においても、磁壁共鳴を利用することで、高感度な磁界センサが実現可能であることを示すことができた。この周波数は汎用の駆動・検出回路との整合性も良いことから安価な磁気センサの実現が期待される。



(a) 20 MHz でのインピーダンス変化



(b) 検出回路

図 6 インピーダンスプロファイル及び検出回路

(5) 直流バイアス電流により感度増加

素子に直流のバイアス電流を印加することで、感度改善が図られることを見出した。さらに、異方性の角度は幅方向から少し傾いた場合に高感度を実現し得る。バイアス電流を印加した場合の外部磁界依存性は、Z軸に関して非対称性を示し、この要因としては、素子の断面構造が台形形状であることが一つとして挙げられることを明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計8件)

H. Kikuchi, C. Sumida, Observation of changes in static domain structures of thin-film magnetoimpedance elements with DC bias current, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 55, No. 2, article # 4001405, pp. 1–5, 2019. 査読有 DOI: 10.1109/TMAG.2018.2860582

H. Kikuchi, H. Nakamura, C. Sumida, Influence of Direct DC Bias Current on Stepped Magnetoimpedance Profile and Changes in Domain Structure, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 59, No. 1, pp. 123–128, 2018. 査読有 DOI: 10.3233/JAE-171095

H. Kikuchi, C. Sumida, Incident power influence on magnetoimpedance element with domain wall resonance, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 54, No. 11, #4001605, pp. 1–5, 2018. 査読有 DOI: 10.1109/TMAG.2018.2854863

H. Kikuchi, C. Sumida, Analysis of asymmetric property with DC bias current on thin-film magnetoimpedance element, AIP Advances, Vol. 8, No. 5, #056618, pp. 1–5, 2018. 査読有 DOI: 10.1063/1.5006709

菊池弘昭, 住田千尋, 中居倫夫, 柮修一郎, 石山和志, 直流バイアス電流印加時の薄膜 MI 素子の挙動とその解析, 電気学会研究会資料, MAG-17-222, 2017. 査読無

H. Kikuchi, C. Sumida, T. Nakai, S. Hashi, K. Ishiyama, Effects of dc bias current on behavior and sensitivity of thin-film magnetoimpedance element, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 53, No. 11, #4003704, pp. 1–4, 2017. 査読有 DOI: 10.1109/TMAG.2017.2703886

H. Kikuchi, C. Sumida, H. Uetake, S. Yabukami, S. Hashi, K. Ishiyama, AIP Advances, Vol. 7, #056617, pp. 1–6, 2017. 査読有 DOI: 10.1063/1.4973760

住田千尋, 菊池弘昭, 植竹宏明, 藪上信, 柮修一郎, 石山和志, 電気学会研究会資料, MAG-16-120, 2016. 査読無

〔学会発表〕(計10件)

H. Kikuchi, C. Sumida, Observation of changes in static domain structures of thin-film magnetoimpedance element with dc bias current, ICM2018, San Francisco, USA, July 15–20, 2018.

C. Sumida, H. Kikuchi, Potential of magnetic field detection with relatively lower frequency carrier using thin-film magnetoimpedance element, EMSA2018, Athens, Greece, July 1–4, 2018.

C. Sumida, H. Kikuchi, Incident power dependence on magnetoimpedance element with domain wall resonance, Intermag2018, Singapore, Apr. 23–27, 2018.

菊池弘昭, 住田千尋, 中居倫夫, 柮修一郎, 石山和志, 直流バイアス電流印加時の薄膜 MI 素子の挙動とその解析, 電気学会マグネティクス研究会, 姫路・西はりま地場産業センター, 2017. 12. 14–15, MAG-17-222.

H. Kikuchi, C. Sumida, Analysis of asymmetric magnetoimpedance property on thin-film element with dc bias current, The 62nd Annual Magnetism and Magnetic Materials (MMM) Conference Pittsburgh, PA, USA, Nov. 10–16, 2017.

H. Nakamura, C. Sumida, H. Kikuchi, Influence of Direct DC Bias Current on Stepped Magnetoimpedance Profile and Changes in Domain Structure, ISEM2017, Chamonix - Mont-Blanc, France, Sep. 3–6, 2017.

C. Sumida, H. Kikuchi, T. Nakai, S. Hashi, K. Ishiyama, Effect of dc bias current on sensitivity of thin-film magnetoimpedance element, Intermag2017, Dublin, Ireland, Apr. 24–28, 2017.

C. Sumida, H. Kikuchi, H. Uetake, S. Yabukami, S. Hashi, K. Ishiyama, Analysis of thin-film magnetoimpedance behavior at low MHz region based on domain wall equation and bias susceptibility theory, The 61st Annual Magnetism and Magnetic Materials (MMM) Conference, New Orleans, Louisiana, USA, Oct. 31–Nov. 4, 2016.

住田千尋, 菊池弘昭, 植竹宏明, 藪上信, 柮修一郎, 石山和志, 低周波領域における薄膜 MI 素子の磁壁移動に伴う特性変化とその解析, 電気学会マグネティクス研究会, 横浜国立大学, 2016. 9.20–21, MAG-16-120.

住田千尋, 菊池弘昭, 植竹宏明, 藪上信, 柮修一郎, 石山和志, 磁壁共鳴を利用した MHz 帯域での直接通電型薄膜磁気インピーダンスセンサの可能性, 第40回日本磁気学会学術講演会, 金沢大学, 2016. 9.5–9.8, 6pB-9.

〔図書〕(計1件)

菊池弘昭他, 磁性材料・部品の最新開発事例と応用技術 [技術情報協会], 第5章 磁気計測、

磁気センサへ向けた磁性材料開発と高感度化 第4節 磁気インピーダンス効果を用いた小型高感度磁気センサ素子の開発, pp. 213–219, 2018.

6 . 研究組織

(1) 連携研究者

連携研究者氏名：石山 和志
ローマ字氏名：(ISHIYAMA, kazushi)
所属研究機関名：東北大学
部局名：電気通信研究所
職名：教授
研究者番号：20203036

連携研究者氏名：杓 修一郎
ローマ字氏名：(HASHI, shuichiro)
所属研究機関名：東北大学
部局名：電気通信研究所
職名：准教授
研究者番号：90324285

連携研究者氏名：藪上 信
ローマ字氏名：(YABUKAMI, shin)
所属研究機関名：東北大学
部局名：医工学研究科
職名：教授
研究者番号：00302232

連携研究者氏名：竹澤 昌晃
ローマ字氏名：(TAKEZAWA, masaaki)
所属研究機関名：九州工業大学
部局名：大学院工学研究院
職名：教授
研究者番号：20312671

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。