

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289082

研究課題名(和文)スケールに応じたスピンドYNAMIXの制御とデバイス応用

研究課題名(英文)Control of Spin-dynamics Associated with Scale and its Device Application

研究代表者

遠藤 恭 (ENDO, YASUSHI)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50335379

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、薄膜・微小磁性体形状といったサイズの異なるFe系二元合金、薄膜形状のCo系軟磁性合金におけるスピンドYNAMIXの基本特性に着目し、そのメカニズムの理解と制御法の確立、さらに材料設計指針の確立を目的としている。いずれの合金系も、ダンピング定数と飽和磁気ひずみとは相関があり、そのメカニズムはスピン軌道相互作用に由来している可能性を示している。制御法に関しては、合金組成比、スケールの可変や、第三元素添加により可能である。材料設計指針に関しては、スケールによる反磁界の影響を考慮した強磁性共鳴(FMR)周波数の選定、合金の磁気特性を考慮したFMR線幅の選定に基づいた設計が重要である。

研究成果の概要(英文)：This study reports the fundamental properties of spin-dynamics in Fe-M binary alloys and Co soft magnetic alloys with various shapes, clarifies understanding both the mechanism of spin-dynamics and the control of spin-dynamics, and further suggests the material design guide. All alloys possess the correlation between a damping constant and a saturation magnetostriction regardless of scales. These results reveal that the mechanism of spin-dynamics is derived from the spin-orbital coupling. These results also suggest that the spin dynamics can be controlled by composition ratio, variation in the scales (thickness and size), and other elements addition. Furthermore, as for the material design guides, it is very important to select both the ferromagnetic resonance (FMR) frequency and its line-width carefully: FMR frequency can be estimated by considering the demagnetizing field based on the scale of the alloys. The line-width is designed with the static magnetic properties of the alloys.

研究分野：工学

キーワード：電気・電子材料 スピントロニクス 磁性 高周波伝送線路 スピンドYNAMIX 先端機能デバイス
電子デバイス・機器

1. 研究開始当初の背景

磁性薄膜におけるスピンの動的挙動(スピンドイナミクス)は、不揮発性磁性メモリやスピントルク発振器といったナノスケールの新規スピントロニクスデバイスの設計・実用化を行う上で、データ転送レートや低消費電力化などに直結する主要な基本要素技術である。また、スマートフォンやタブレット型PCといった携帯端末において、RFICチップ内部のマイクロスケール電磁ノイズ抑制体として磁性薄膜を応用する上でも、スピンドイナミクスは抑制帯域幅、抑制周波数を決定づける重要な要素技術である。このように、ナノからマイクロまでの幅広いスケールで、磁性薄膜に関連する国内外の研究開発分野において、工学的な観点から盛んに研究開発が行われている。

スピンドイナミクスは、スピンの歳差運動の時間緩和を表したものであり、材料の磁気共鳴に著しく依存する。したがって、ナノからマイクロまでの幅広いスケールにおけるデバイス応用をめざす上で、材料の磁気共鳴の基本特性にあたるダンピング定数、磁気共鳴周波数、磁気共鳴幅等を理解・把握することが必須である。しかしながら、材料の磁気共鳴は従来の研究では不明な点が多く、そのメカニズムも詳細な検討が行われていない。そのため、磁性薄膜のスピンドイナミクスを制御したナノからマイクロまでの幅広いスケールでのデバイス応用には至っていない。

我々は磁性薄膜のスピンドイナミクスの高精度測定が可能であるベクトルネットワークアナライザ(VNA)とコプレーナ伝送線路(CPW)を組み合わせたブロードバンド強磁性共鳴(Broadband Ferromagnetic Resonance: B-FMR)測定法を開発し、Ni組成の異なるNi-Fe薄膜のダンピング定数に関して、従来のFMR測定と比較することによりB-FMR測定において信頼性の高い結果が得られることを確認済みである(IEEJ Trans. Fund. and Mater. 131 (2011) 505, ICAUMS2010 invited talk, MR研究会招待講演他)。また、膜厚5nmの磁性超薄膜における磁気ひずみを正確に評価できる超高感度薄膜磁歪測定装置を用いてNi組成の異なるNi-Fe薄膜の磁気ひずみを評価した。その結果、Ni組成に対応して材料固有の磁気共鳴は磁気ひずみとの間に相関があり、磁気ひずみの符号・強度に依存することを明らかにした(IEEE Trans. Magn. 48, 3390(2012), J. Appl. Phys. 109, 07D336(2011),他)。

2. 研究の目的

本研究課題では、開発したB-FMR測定法をさらに改良することによって、幅広いスケールで磁性薄膜のデバイス応用を行う上で重要であるスピンドイナミクスに基づいた最適な磁性材料の設計指針を確立するために、以下の項目に取り組む。

(1) スピンドイナミクスの基本特性の把握

とメカニズムの理解

(2) スピンドイナミクスの制御法と最適な磁性材料の設計指針の提案

3. 研究の方法

(1) スピンドイナミクスの基本特性の把握とメカニズムの理解

【試料作製方法】

・Fe系二元系合金薄膜およびCo系軟磁性合金薄膜の作製には、DCマグネトロンスパッタもしくはRFスパッタを用いた。作製した薄膜の膜厚に関しては、Fe系二元系合金の場合には3-50もしくは100nmであり、Co系軟磁性合金薄膜の場合には250nmである。基板には、主にガラス基板を用いた。また、Fe系二元系微小磁性体の作製には、電子線リソグラフィ、DCマグネトロンスパッタおよびリフトオフ法を用いた。作製した微小磁性体はサイズおよび隣接ドット間距離の異なる楕円形ドット列(長軸と短軸の比が2:1、長軸:500-5000nm、短軸:250-2500nm、ドット間距離:~50-400nm)と、細線幅の異なる50nm厚の細線(細線幅:200nm-23000nm、細線長:100 μ m)である。

・B-FMR測定法に用いたCPWの作製には、フォトリソグラフィ、DCマグネトロンスパッタおよびリフトオフ法を用いた。作製した線路は、一端が終端された形状の1ポート型コプレーナウェーブガイド(CPW、寸法:信号線幅50ないしは100 μ m、ギャップ幅12ないしは23.5 μ m、グラウンド幅88ないしは176.5 μ m、線路帳500もしくは1000 μ m)である。そのCPWの膜構成は、ガラス基板(厚さ:550 μ m、比誘電率 ϵ_r :7.0)上に積層させたCr(5nm)/Cu(300nm)/Cr(5nm)三層膜である。

【評価方法】

・合金薄膜の構造解析には透過型電子顕微鏡(TEM)を、組成分析にはエネルギー分散型X線分光法(EDX)、静磁気特性評価には振動試料型磁力計(VSM)を用いた。

・微小磁性体の形状観察には走査型電子顕微鏡(SEM)と原子間力顕微鏡(AFM)を、静磁気特性評価には我々が開発した外部磁界掃印型MFMを用いた。

・これらの合金薄膜および微小磁性体のスピンドイナミクスの定量評価には、外部磁界掃印型B-FMR測定法を用いた。この測定法では、CPW上に測定対象である合金薄膜もしくは微小磁性体を設置した。そのCPWを電磁石から発生する漏えい磁界(試料の面内方向に印加される磁界、直流磁界)の中に設置し、高周波プローブを介してVNAからCPWへの交流電流成分を入力する。その時の周波数成分を固定し、直流磁界を可変させながら、CPWのSパラメータの変化を評価した(図1)。なお、スピンドイナミクスの定量評価として外部磁界掃印方式を採用した理由は以下の通りである。磁性薄膜の厚さや、微小磁性体のサイズに関係なく、外部磁界掃印方式を用いた場合、周波数掃印方式ではやや困難とされて

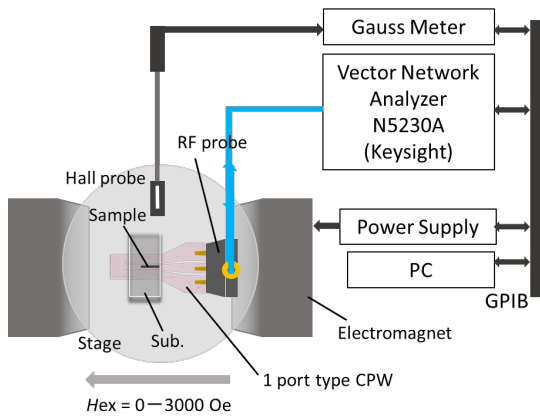


図 1 B-FMR 測定系概略図

きた対称性のよい FMR スペクトルを観測できる。したがって、これらの材料のスピンドイナミクスの定量評価が可能であることがわかったからである。また、スピンドイナミクスのメカニズム解明のために、作製した薄膜試料の磁気ひずみを光てこ法による高感度磁気ひずみ計測法を用いて評価した。

(2) スピンドイナミクスの制御法および最適な磁性材料の設計指針の提案

研究項目(1)により得られた知見を元にして、スピンドイナミクスの制御法を提案する。また、基本要素技術であるスピンドイナミクスの合金組成効果を把握した上で、磁性薄膜(磁性材料)とデバイス動作周波数、帯域幅の対応関係(対応表の作成)を明らかにする。その結果をもとにして、ナノからマイクロまでの幅広いスケールで磁性薄膜のデバイス応用を行う上での最適な磁性材料の設計指針を提案する。

4. 研究成果

(1) スピンドイナミクスの基本特性の把握とメカニズムの理解

Fe 系二元合金として Ni-Fe, Fe-Co, Fe-Si, Fe-Ga に着目した。まず Ni-Fe 合金に関しては、その超薄膜のスピンドイナミクスを検討した。熱膨張係数の異なる基板(石英、ガラス、テンパックス)上に作製した Ni-Fe 合金超薄膜のダンピング定数は膜厚には依存せず、基板の種類に依存している。この原因は基板の熱膨張係数の違いにより、Ni-Fe 合金超薄膜の初期成長過程での結晶粒の成長モードが異なることによるものである()。したがって、ダンピング定数と結晶粒(膜面および膜厚方向)の大きさとの間には相関関係があることがわかった。また、Ni-Fe 合金微小磁性ドットおよび細線のスピンドイナミクスを検討した。ドットに関しては、ドットサイズが $1 \mu\text{m}$ 以下減少にともないダンピング定数が増加している。この原因はドット端部での反磁界の不均一性が強くなり、静磁エネルギーが増加することによるものである。

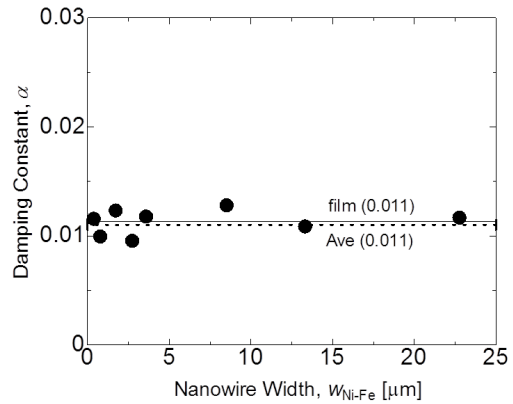


図 2 Ni-Fe 合金細線におけるダンピング定数の細線線幅に対する変化

細線に関しては、ダンピング定数は細線幅に依存せずほぼ一定であり、その値は 0.011 程度であり、Ni-Fe 合金超薄膜と一致している(図 2)。これらの結果は、ドットは細線と比べるとスケール(サイズ)の減少にともない端部での磁気的不均一性によるスピンドイナミクスへの影響が顕著であることを示唆している。

Fe-Co 合金に関しては、高飽和磁化を有する 30 - 50 at.% の Co 組成範囲での Fe-Co 合金薄膜のスピンドイナミクスを検討した。ダンピング定数は 40 at.% の Co 組成を境にして Co 組成の低い領域では 0.015 程度と低く、Co 組成の高い領域では 0.035 程度と高くなっている。この結果は飽和磁気ひずみの組成依存性と類似しており、飽和磁気ひずみとの相関性を示唆するものである。また、得られた実験値が他の文献に比べて一桁程度高く、この原因として 2 - マグノン散乱等による磁気的不均一性が強くなっていることによると考えられる。

Fe-Si 合金に関しては、その薄膜のスピンドイナミクスを検討した。ダンピング定数と飽和磁気ひずみが Si 組成の増加にともないわずかに増加し、両パラメータに相関があることを示している。また、Fe-Ga 合金に関しては、スピンドイナミクスの膜厚による変化を検討した。ダンピング定数と FMR 線幅は膜

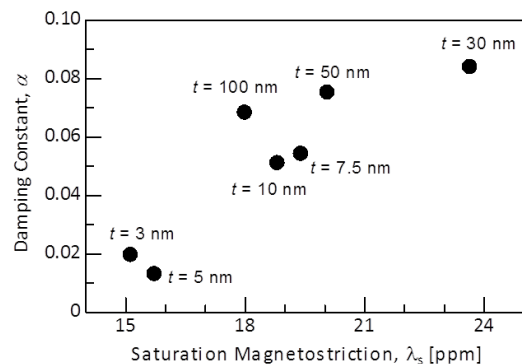


図 3 Fe-Ga 合金薄膜におけるダンピング定数と飽和磁気ひずみの関係

厚の増加にともない急激に増加した後、減少した。飽和磁気ひずみの膜厚による変化も同様の挙動を示している。図3からわかるように、ダンピング定数と飽和磁気ひずみとの間に相関がある()。

以上から、Fe系二元合金膜のスピンダイナミクスに関しては、いずれの場合もダンピング定数が飽和磁気ひずみと相関関係にあり、そのメカニズムは飽和磁気ひずみの根源であるスピン軌道相互作用に由来している可能性を表している。

Co系軟磁性合金としてアモルファス合金であるCo-Zr-Nbに着目し、スピンダイナミクスの基本特性を検討した。ZrおよびNb組成を増加させると、ダンピング定数は0.015からおよそ0.80へと増加し、FMR周波数および電力挿入損失比のピーク周波数は低周波数側へ移動する。この結果は組成の変化にともなうスピン軌道相互作用の変化によるものと考えられる()。

(2) スピンダイナミクスの制御法と最適な磁性材料の設計指針の提案

研究項目(1)で得られた知見から、Fe系二元系合金およびCo系軟磁性合金におけるスピンダイナミクスの基本特性(ダンピング定数、FMR周波数、FMR線幅)は、合金の組成比、膜厚、スケール(サイズ)を可変することにより制御が可能であることを表している。また、Fe系二元系合金に第三元素を添加することにより、添加元素量や膜厚を増加させて、その磁気特性をより軟質磁性、もしくは硬質磁性へと変えることによって、スピンダイナミクスの基本特性の制御が可能であることがわかった。これらの方法でスピンダイナミクスの制御が可能となることにより、既存の高周波磁気デバイス、もしくはスピントロニクスデバイスを代表とする新規磁気デバイスへの応用展開が可能であることを示唆している。

材料の設計指針に関しては、材料固有のFMR周波数と膜厚方向の反磁界の影響によるFMR周波数の移動を加味して、応用先となる高周波磁気デバイスの利用周波数に合わせこむことと、デバイスの性能(対応周波数帯域など)にあたる材料のFMR線幅を、合金組成を可変しながら制御して設計することが重要である。

<引用文献>

- () Yasushi Endo, Yoshio Mitsuzuka, Takamichi Miyazaki, Yutaka Shimada, and Masahiro Yamaguchi, Substrate Influence on the Magnetization Dynamics of Ni-Fe Thin Films, IEEE Transactions on Magnetism, Vol. 52, 2016, 2800304 - 1 - 4
- () Yasushi Endo, Takumi Sakai, Takamichi Miyazaki, and Yutaka Shimada, Effect of Film Thickness on the High Frequency

Magnetic Properties of Polycrystalline Fe-Ga Films, IEEE Transactions on Magnetism, Vol. 53, 2017 (in press)

- () Yasushi Endo, Tetsuo Ito, Takamichi Miyazaki, Yutaka Shimada, and Masahiro Yamaguchi, Effect of Zr and Nb additions on the high-frequency magnetic properties of $\text{Co}_{85-(x+y)}\text{Zr}_{3+x}\text{Nb}_{12+y}$ films, Journal of Applied Physics, Vol. 117, 2015, 17A330 - 1 - 4

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計7件)

遠藤 恭、高周波磁性材料および高周波磁気計測の開発、日本磁気学会第212回研究会資料、査読無、212巻、2017、1-6

Yasushi Endo, Yoshio Mitsuzuka, Takamichi Miyazaki, Yutaka Shimada, and Masahiro Yamaguchi, Substrate Influence on the Magnetization Dynamics of Ni-Fe Thin Films, IEEE Transactions on Magnetism, 査読有, Vol. 52, 2016, 2800304 - 1 - 4, DOI : 10.1109/TMAG.2016.2526041

遠藤 恭、高周波磁気特性計測法の最新動向、平成28年度電気・情報関係学会東海支部連合大会講演論文集、査読無、2016、S2-4-1-2

遠藤 恭、高周波マグネティックス計測技術の動向、平成28年電気学会全国大会論文集、査読無、2016、2-S3-7-1-4、<http://id.nii.ac.jp/1031/00090243/>

Yasushi Endo, Yutaka Shimada, and Masahiro Yamaguchi, Study on the Magnetization Dynamics of Ni-Fe Dot Arrays Estimated by the CPW-FMR Measurement Method, IEEE Transactions on Magnetism, 査読有, Vol. 51, 2015, 2300604 - 1 - 4, DOI : 10.1109/TMAG.2015.2434400

Yasushi Endo, Peng Fan, and Masahiro Yamaguchi, Effect of stripe height on the critical current density of spin-torque noise in a tunneling magnetoresistive read head with a low resistance area product below $1.0 \mu\text{m}^2$, Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 117, 2015, 17A922 - 1 - 4, DOI : 10.1063/1.4918571

Yasushi Endo, Tetsuo Ito, Takamichi Miyazaki, Yutaka Shimada, and Masahiro Yamaguchi, Effect of Zr and Nb additions on the high-frequency magnetic properties of $\text{Co}_{85-(x+y)}\text{Zr}_{3+x}\text{Nb}_{12+y}$ films,

Journal of Applied Physics、査読有、
Vol. 117、2015、17A330 - 1 - 4、
DOI : 10.1063/1.4917502

[学会発表](計 25 件)

Yasushi Endo、Takumi Sakai、Takamichi Miyazaki、Yutaka Shimada、Effect of Film Thickness on the High Frequency Magnetic Properties of Polycrystalline Fe-Ga Films、International Magnetism Conference INTERMAG Europe 2017、2017 年 4 月 27 日、ダブリン(アイルランド)

Yasushi Endo、Takamichi Miyazaki、Yutaka Shimada、Change in the Magnetization Dynamics of Fe_{1-x}Cox Thin Films with Co Concentration x、International Magnetism Conference INTERMAG Europe 2017、2017 年 4 月 25 日、ダブリン(アイルランド)

Satya Parakash Pati、Muftah Al-Mahdawi、Yohei Shiokawa、Masashi Sahashi、Yasushi Endo、Effect of Platinum Buffer Layer on Magnetization Dynamics of Sputter Deposited YIG Polycrystalline Thin-Films、International Magnetism Conference INTERMAG Europe 2017、2017 年 4 月 25 日、ダブリン(アイルランド)

友山 昌洋、遠藤 恭、宮崎 孝道、Ni-Fe 細線の磁化ダイナミクスに関する研究、平成 29 年電気学会全国大会、2017 年 3 月 17 日、富山大学五福キャンパス(富山県富山市)

遠藤 恭、藪上 信、森 修、内海 良一、島田 寛、高周波伝送線路型プローブによる磁性薄膜の磁気ひずみ計測法の開発、平成 29 年電気学会全国大会、2017 年 3 月 17 日、富山大学五福キャンパス(富山県富山市)

遠藤 恭、高周波磁性材料および高周波磁気計測の開発、(公社)日本磁気学会第 212 回研究会「高周波用磁気デバイス・材料・評価技術の現状と新展開」(招待講演)、2017 年 2 月 21 日、中央大学駿河台記念館(東京都千代田区)

遠藤 恭、森 修、藪上 信、内海 良一、島田 寛、高周波伝送線路プローブセンシングによる磁性薄膜の磁気ひずみ新規計測法の開発、第 74 回ナノマグネティクス専門研究会(IEEE Magnetism Society Tokyo Chapter 共催(招待講演)、2016 年 12 月 2 日、東京大学本郷キャンパス(東京都文京区)

遠藤 恭、大野 慎也、宮崎 孝道、島

田 寛、Co 組成の異なる Fe_{1-x}Cox 薄膜の磁化ダイナミクスに関する研究、平成 28 年度スピニクス特別研究会、2016 年 11 月 22 日、東北学院大学多賀城キャンパス(宮城県多賀城市)

遠藤 恭、森 修、藪上 信、内海 良一、島田 寛、MSL プローブセンシングによる磁性薄膜の磁気ひずみ新規計測法の開発、日本金属学会 2016 年秋期(第 159 回)講演大会、2016 年 9 月 23 日、大阪大学豊中キャンパス(大阪府豊中市)

遠藤 恭、高周波磁気特性計測法の最新動向、平成 28 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会(招待講演)、2016 年 9 月 13 日、豊田工業高等専門学校(愛知県豊田市)

森 修、藪上 信、遠藤 恭、島田 寛、内海 良一、磁性薄膜の応力と強磁性共鳴の評価、第 40 回日本磁気学会学術講演、2016 年 9 月 6 日、金沢大学角間キャンパス(石川県金沢市)

遠藤 恭、大野 慎也、宮崎 孝道、島田 寛、Fe_{1-x}Cox 薄膜における磁化ダイナミクスの Co 組成依存性、第 40 回日本磁気学会学術講演、2016 年 9 月 6 日、金沢大学角間キャンパス(石川県金沢市)

遠藤 恭、高周波マグネティクス計測技術の動向、平成 28 年電気学会全国大会(招待講演)、2016 年 3 月 16 日、東北大学川内北キャンパス(宮城県仙台市)

Yasushi Endo、Yoshio Mitsuzuka、Takamichi Miyazaki、Yutaka Shimada、and Masahiro Yamaguchi、Substrate Influence on the Magnetization Dynamics of Ni-Fe Thin Films、13th Joint MMM-INTERMAG Conference、2016 年 1 月 13 日、サンディエゴ(米国)

遠藤 恭、山口 正洋、磁界掃引 CPW-FMR 測定を用いた Ni-Fe 薄膜のダンピング定数の評価、平成 27 年度スピニクス特別研究会、2015 年 11 月 20 日、信州大学長野キャンパス(長野県長野市)

Ranajit Sai、Shigeru Takeda、Yasushi Endo、Hanae Aoki、and Masahiro Yamaguchi、Measurement of complex permeability of Co- and Ti-substituted Sr-M by short-circuited coaxial transmission line method、第 39 回日本磁気学会学術講演、2015 年 9 月 9 日、名古屋大学東山キャンパス(愛知県名古屋市)

遠藤 恭、山口 正洋、磁界掃引 CPW-FMR

測定による Ni-Fe 薄膜のダンピング定数の評価、第 39 回日本磁気学会学術講演、2015 年 9 月 9 日、名古屋大学東山キャンパス（愛知県名古屋市）

Yasushi Endo、Yutaka Shimada、and Masahiro Yamaguchi、Study on the magnetization dynamics of Ni-Fe dot arrays estimated by the CPW-FMR measurement、IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG 2015 BEIJING)、2015 年 5 月 13 日、北京（中国）

R. Sai、Y. Endo、Y. Shimada、R. Naik、N. Bhat、S.A, Shivashankar、and M. Yamaguchi、Magnetic characterization of on-chip integrated layer of substituted Sr-M hexaferrite beyond 10 GHz、IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG 2015 BEIJING)、2015 年 5 月 12 日、北京（中国）

遠藤 恭、伊藤 哲夫、島田 寛、山口 正洋、 $\text{Co}_{85-(x+y)}\text{Zr}_{3+x}\text{Nb}_{12+y}$ 膜における高周波磁気特性の Zr および Nb 組成による変化、平成 27 年電気学会全国大会、2015 年 3 月 24 日、東京都市大学世田谷キャンパス（東京都世田谷区）

21 Yasushi Endo、Peng Fan、Masahiro Yamaguchi、Stripe height effect of the critical current density of spin-torque noise in a tunneling magnetoresistive read head with a low resistance area product below $1.0 \mu\text{m}^2$ 、59th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials、2014 年 11 月 6 日、ホノルル（米国）

22 Yasushi Endo、Tetsuo Ito、Yutaka Shimada and Masahiro Yamaguchi、Effect of Zr and Nb additions on high frequency magnetic properties of $\text{Co}_{85-(x+y)}\text{Zr}_{3+x}\text{Nb}_{12+y}$ films、59th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials、2014 年 11 月 5 日、ホノルル（米国）

23 遠藤 恭、樊 鵬、山口 正洋、TMR ヘッドから発生する磁化揺らぎノイズに関する研究、第 38 回日本磁気学会学術講演、2014 年 9 月 4 日、慶應義塾大学日吉キャンパス（神奈川県横浜市）

24 Yasushi Endo、Masahiro Yamaguchi、Magnetization Dynamics of Ni-Fe Elliptical Dot Arrays Measured by the FMR Measurement with a CPW、Progress in Electromagnetics Research Symposium 2014、2014 年 8 月 25 日、広州（中国）

25 Yasushi Endo、Masahiro Yamaguchi、Sho

Muroga、Satoshi Tanaka、Yutaka Shimada、Study on the Electromagnetic Noise Suppression in LTE-Class RFIC Chips Using Soft Magnetic Thin Films (Invited)、2014 IEEE ICM (招待講演)、2014 年 7 月 2 日、仙台国際センター（宮城県仙台市）

〔図書〕（計 4 件）

遠藤 恭 他、技術情報協会出版、電磁波吸収・シールド材料の設計、評価技術と最新ノイズ対策、2016、446（57 - 64）

遠藤 恭 他、（公社）日本磁気学会、第 39 回日本磁気学会サマースクール「高周波磁気物性」、2016、144（81 - 96）

遠藤 恭 他、（公社）日本磁気学会、第 38 回日本磁気学会サマースクール「高周波磁気物性」、2015、150（85 - 99）

遠藤 恭 他、電気学会、電気学会技術報告 高周波マイクロ磁気応用技術の最新動向、2014、49（5 - 7）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

遠藤 恭 (Yasushi Endo)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：50335379

(2) 研究分担者

山口 正洋 (Masahiro Yamaguchi)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：10174632

(3) 連携研究者

島田 寛 (Yutaka Shimada)
東北大学・未来科学技術共同センター・名誉教授
研究者番号：00006157

宮崎 孝道 (Takamichi Miyazaki)
東北大学・工学部・技術専門職員
研究者番号：20422090

(4) 研究協力者

室賀 翔 (Sho Muroga)