

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23686047

研究課題名(和文) 新規高周波スピン計測技術による微小磁性体のスピンの高周波磁界応答の解明とその応用

研究課題名(英文) Study on the mechanism of high-frequency magnetization response in nano-magnets using a new proposed RF spin measurement technique

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) 18,400,000円、(間接経費) 5,520,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、GHz帯域で駆動する新規スピン機能素子の基本要素技術の確立を目指して、高周波スピン計測技術の構築とその妥当性の検証を行った。その結果、本計測技術を用いてGHz帯の高周波伝送線路上の磁界分布図を取ることに成功した。微小磁性体におけるスピンの高周波磁界応答の検討を行い、微小磁性体の高周波磁界応答に関する基礎データを習得した。また、本計測技術をスピンの高周波磁界応答の評価に適用するにあたり、課題を抽出した。

以上の結果にもとづいて、ドットパラメータや第三元素添加による材料パラメータを変えることによりスピンの高周波磁界応答を制御できることを明確にした。

研究成果の概要(英文)：This study reports the mechanism of high-frequency (HF) magnetization response in nano-magnet using our newly proposed RF spin measurement technique. As for our proposed technique, it is revealed that GHz-range magnetic field distribution on the coplanar waveguide (CPW) can be observed using a magnetic force microscope (MFM) tip. As for the mechanism of high-frequency magnetization response in nano-magnet, its basic data can be obtained using the ferromagnetic resonance measurement with the CPW. Additionally, several problems are clarified as the HF magnetization response in nano-magnet is measured using our proposed techniques.

Therefore, on the basis of these data, it is pointed out that HF magnetization response can be controlled by changing dot parameters or dot materials.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子・電気材料工学

キーワード：微小磁性体 スピン 高周波磁界応答 コプレーナ伝送線路 MFM用探針 振幅変調

1. 研究開始当初の背景

サブミクロンサイズの微小磁性体は、それ自体のサイズがスピン構造や磁壁を特徴づける特性長に近づくことにより、バルクや薄膜とは異なる磁気特性を示す系として知られている。この微小磁性体を高周波能動素子へ利用した場合、スピンをを用いることから、情報が不揮発性であり、電荷を用いた既存の半導体素子に比べて、エネルギー消費の低減、高速演算処理および高集積化が可能である。したがって、工学的な応用の観点から、不揮発性磁性メモリ (Magnetic Random Access Memory: MRAM) や磁性論理演算回路 (Magnetic Logic Gate : MLG) などの新規スピン機能素子の創製が期待され、国内外の磁気工学分野において盛んに研究開発が進められている。これらのスピン機能素子では、その基本要素技術として微小磁性体のスピンの高周波磁界応答を定量評価し、把握することが GHz 帯で駆動する新規スピン機能素子を実現する上で重要である。しかしながら、時間分解能磁気光学カー効果 (Magneto-optical Kerr Effect: MOOKE) 測定やキャピティー型の強磁性共鳴 (Ferromagnetic Resonance: FMR) 測定といった従来のスピン計測技術では、測定感度や試料サイズの制限などの諸問題を抱え、微小磁性体のスピンの高周波磁界応答を理解することはきわめて困難である。したがって、従来の計測技術に替わる新たな高周波スピン計測技術の構築が望まれている。

我々は、これまでの微小磁性体に関する研究から、MRAM や MLG といった新規スピン機能素子の基礎的な知見を得ている (IEEE Trans. Magn. 44 (2008) 2718, JAP 99 (2006) 08G303 他多数, 特許 3541229 号「磁性演算素子およびそれをを用いた演算装置」他 3 件)。これに加えて、スピン計測技術に関しては以下に記述する独自の研究成果を得ている。微小磁性体の局所位置におけるスピン配列を把握できる磁気力顕微鏡 (Magnetic Force Microscope: MFM) 用探針を検出プローブに用いた「外部磁界掃印型 MFM」を開発した (受賞 1 件, MMM 招待講演他 2 件, IEEE Trans. Mag. 46 (2010) 2413, JAP 103 (2008) 07D0918, JMMM 310 (2007) 2436 他多数有)。高周波磁界プローブの国際標準規格 (IEC61967- 6-Ed.1.0) を獲得し、LSI 上で発生する電磁気ノイズの「高周波近傍磁界計測技術」を確立した。また、磁性薄膜のスピンの高周波磁界応答 (主に共鳴現象) を評価可能な「高周波伝送線路を用いた FMR 測定」の開発を行ってきた (ICAUMS2010 招待講演, ICM2009 DIGEST (Karlsruhe(独), 2009) 185, 191 他)。これらの研究成果から、「外部磁界掃印型 MFM」と「高周波近傍磁界計測技術」を組み合わせた新規の「高周波スピン計測技術」の構築が可能であり、現段階においてすでに開発に取り組んでいる。また、この計測技術を活かして、サブミクロン領域の局所位置におけるスピン

の高周波磁界応答を計測することが期待できる。

2. 研究の目的

上記背景および着想に基づいて、GHz 帯域で駆動する新規スピン機能素子の基本要素技術の確立を目指して、以下の研究課題を検討する。

- (1) 高周波スピン計測技術の構築とその妥当性の検証
- (2) 本計測技術による微小磁性体におけるスピンの高周波磁界応答の検討

3. 研究の方法

- (1) 高周波スピン計測技術の構築とその妥当性の検証

伝送線路の作製 (測定対象) 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 3 ないしは 5  $\mu\text{m}$ 、ギャップ幅 6  $\mu\text{m}$ 、グラウンド幅 50  $\mu\text{m}$ 、線路帳 1800  $\mu\text{m}$ ) である。その CPW の膜構成は、ガラス基板 (厚さ: 550  $\mu\text{m}$ 、比誘電率  $\epsilon_r$ : 7.0) 上に積層させた Cr (5 nm)/Cu (300 nm)/Cr (5 nm) 三層膜である。

本計測技術に用いるセンサには、Co-Cr-Pt もしくは Ni-Fe をコーティングした Si 探針 (MFM 探針) を用いた。MFM 探針の物理パラメータに関しては、探針の共振周波数  $f_{\text{Res}}$ 、大気圧下で測定した Q 値、ばね定数  $k$ 、先端半径  $R$  は 24 - 26 kHz、50 - 60、1.3-1.4 N/m、20 - 40 nm である。

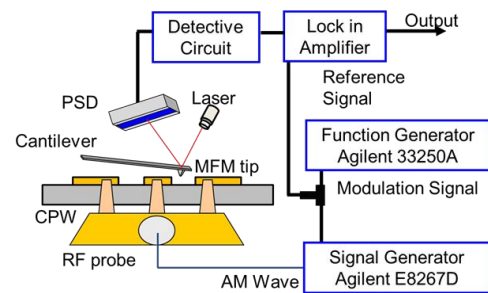


図 1 新規高周波スピン計測技術の概略

本計測技術に関しては、その概略を図 1 に示す。シグナルジェネレータとファンクションジェネレータを組み合わせると振幅 (AM) 変調信号を発生させた。このときの AM 変調信号  $i_{\text{AM}}$  は高周波プローブを介して CPW へ入力され、CPW 上で高周波近傍磁界を発生させた。MFM 探針を CPW 上の任意の位置でガラス基板表面から一定のリフト高さ  $L_{\text{off}}$  だけ離して固定すると、CPW 上で発生する高周波近傍磁界と MFM 探針との間に磁気的な相互作用が働き、MFM 探針が振動して共振周波数  $f_{\text{Res}}$  で振幅が最大となる。変調信号の周波数を探針の共振周波数近傍で走査し、その振動振幅を

レーザーと位置検出素子 (PSD) ロックインアンプを用いて検出して探針の振動振幅値に換算して評価を行った。

また、CPW 上では高周波近傍電界と磁界が混在しているために、CPW と MFM 探針とを等電位化し、近傍電界の影響を抑えた。同時にケーブル長に注意して、位相のずれを抑えた。ここでは、MFM 探針は高周波近傍電磁界にのみ応答し、他の物理的な作用を受けない。

## (2) 本計測技術による微小磁性体におけるスピンの高周波磁界応答の検討

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 Ni-Fe 楕円形ドット列 (長軸と短軸の比が 2:1、長軸: 500-5000 nm、短軸: 250 - 2500 nm、ドット間距離: ~50 - 400 nm) である。

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。

スピンの高周波磁界応答の計測には、主に CPW 上に測定対象である微小磁性体を設置してその CPW を電磁石の中に設置して、外部磁界に対する S パラメータの変化についてベクトルネットワークアナライザを用いて評価した (CPW を用いた強磁性共鳴測定による評価を行った (図 2))。一方、本研究課題で開発した計測技術を用いて計測時の課題抽出を行った。また磁界応答の解析には計算機シミュレーションを用いた。

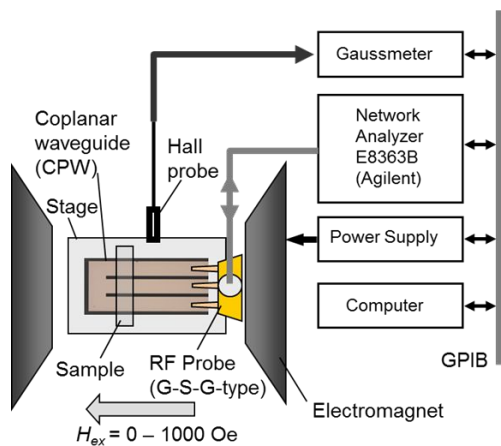


図 2 CPW を用いた強磁性共鳴測定の概略

## 4. 研究成果

### (1) 高周波スピン計測技術の構築とその妥当性の検証

5  $\mu\text{m}$  幅の信号線を有する CPW 上で発生する 3 GHz 帯域の高周波電磁界を、幅方向 100 nm、高さ方向 50 nm 間隔で、Co-Cr-Pt をコーティングした MFM 探針と本計測技術 (研究方法で記述した計測技術) を組み合わせることによ

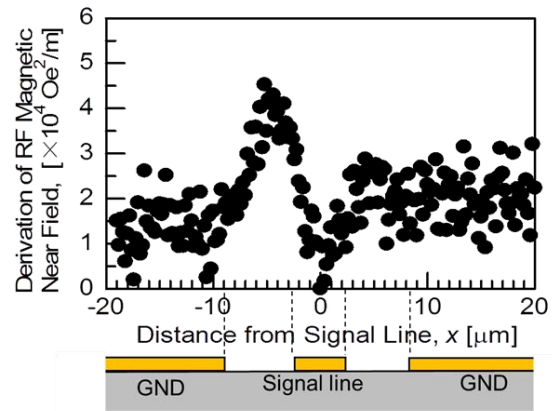


図 3 CPW の断面方向の磁界勾配の分布

り検出できることを明確にした。また、CPW 上で発生する 3 GHz 以上の高周波電磁界に関しては、MFM 探針による検出が急激に低下した。これは、CPW のインピーダンス不整合により CPW 上で発生する電磁界が弱くなることによる。これらの結果は、本計測技術が GHz 帯域の高周波電磁界を検出可能であることを示している。

次に、MFM 探針を含む Si カンチレバーへの電界効果抑制し、CPW の断面方向の磁界分布を検討した。研究の方法に記載したように、カンチレバーと CPW との電位の抑制を試みた。また、高い検出感度を得るために、軟磁気特性を有する Ni-Fe をコーティングした MFM 探針を選択した。

図 3 は線路幅 5  $\mu\text{m}$  の信号線を有する CPW 上から 700 nm のリフト高さで軟磁気特性を有する Ni-Fe をコーティングした MFM 探針と Si 探針を CPW の信号線断面方向にそれぞれ走査させたときの振動振幅の変化である。MFM 探針の場合には、信号線とグラウンド線の間のギャップ上で、検出信号が最大となった。一方、Si 探針の場合には、探針の走査方向によらずば一定となった。これらの結果から、電界効果の抑制を確認した。また、1.1 GHz 帯において CPW 上で発生する近傍磁界分布を検出できることを明確にした。

### Imaging

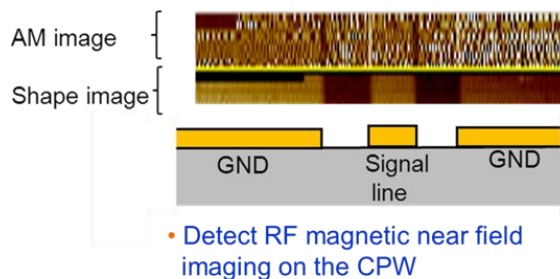


図 4 CPW の面内方向の磁界勾配分布図

さらに、本計測技術の妥当性を検討するために、線路幅 5  $\mu\text{m}$  の信号線を有する CPW 上の GHz 帯での高周波近傍磁界マップを計測した。その結果を図 4 に示す。CPW の信号線とグラウンド線との間のギャップ上で Ni-Fe コート探針の振動振幅の強弱に対応するコントラストが明瞭に表れ、近傍磁界の勾配が最大となった。この結果は計算機シミュレーション (HFSS) による解析結果と一致し、妥当であることを確認した。

以上の結果から、本計測技術により、伝送線路の近傍磁界分布図の検出が可能であることを明確にした。

## (2) 本計測技術による微小磁性体におけるスピンの高周波磁界応答の検討

サイズの異なる Ni-Fe 楕円形ドット列の静・動的磁気特性について評価した。静磁気特性に関しては、MFM によりドット列の無磁界中での磁区観察を行ったところ、ドットの磁区構造が長軸長の減少にともない多磁区構造から閉磁路構造へ遷移していることを確認した。また、動的磁気特性に関しては、CPW を用いた強磁性共鳴測定を行った。図 5 に示すように、ドットサイズの減少にともな

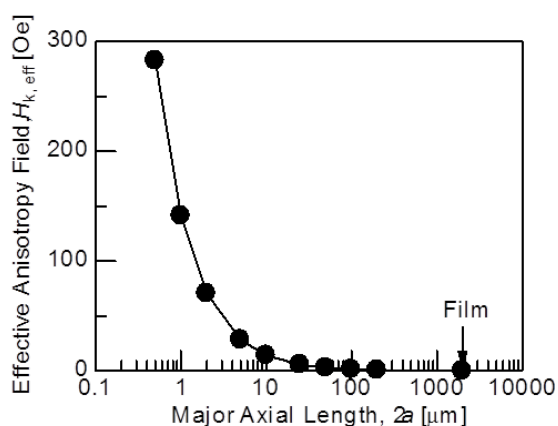


図 5 有効異方性磁界のドットサイズ依存性

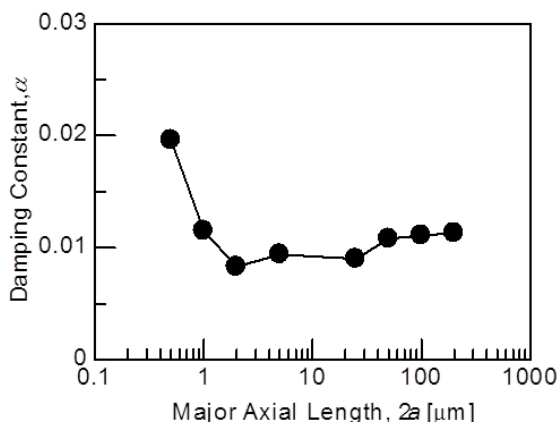


図 6 ダンピング定数のドットサイズ依存性

い、有効飽和磁界は増大した。また、図 6 に示すように、ダンピング定数が増大し、その値は薄膜試料に比べて高くなった。これらの結果は、ドット内の反磁界がサイズの減少にともない増加することによって考えられる。

次に、隣接ドット間距離の異なる Ni-Fe 楕円形ドット列において、無磁界中での静磁気特性を MFM により確認した。ドット間距離 50 nm 以下の場合に静磁氣的相互作用の影響により単磁区構造から磁化の向きが反対方向の単磁区構造へ遷移していることがわかった。また、その動的磁気特性に関しては、CPW を用いた強磁性共鳴測定を行った。その結果、ダンピング定数がバルクや薄膜に比べて 2 倍近く増大することがわかった。以上の結果から、サブミクロンサイズ程度の微小磁性体におけるスピンの高周波磁界応答に関する基礎データを得ることができた。

さらに、これらの結果をもとにして、研究課題 (1) で開発した高周波スピン計測技術を用いてスピンの高周波磁界応答評価への適用を試みた。その結果、本測定技術を用いて評価するにあたり、微小磁性体の端部で発生するバリの除去や伝送線路との集積化時の位置決め精度といった試料作製時の課題を抽出するにとどまった。その一方で、計算機シミュレーションによる予測を行い、CPW の信号線上で発生する近傍磁界に関して、GHz 帯においてその強度と方向が信号線の中央と端部では表皮効果および近接効果の影響により異なることがわかった。この結果は、微小磁性体を CPW の信号線上のどの位置に配置するかによって評価できるスピンの方向を選択できる可能性を示唆している。

以上研究課題 (1)、(2) の結果から、高周波スピン計測技術を構築し、伝送線路の面内磁界分布を検出することに成功した。また、スピンの高周波磁界応答に関する基礎データを取得することによって、スピンの高周波磁界応答の制御法に関しては、ドットパラメータの変化や第三元素添加により動作周波数の制御が可能であることを明確にした。この結果は、新規スピン機能素子の構築への展開を図るうえで重要である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

Yasushi Endo, Masahiro Yamaguchi, Study on the spin-dynamics of Ni-Fe elliptical dot arrays based on CPW-FMR measurements, Proceedings of ISETS '13, 査読無, Vol. 1, 2013 年, 1279-1-1279-3

Y. Endo, A. Hotta, M. Yamaguchi, Influence of Stripe Height on Critical Current Density of Spin-Torque Noise in Tunneling Magnetoresistive Read

Heads, IEEE Transactions on Magnetics, 査読有、Vol. 49、2013年、3745-3747  
DOI : 10.1109/TMAG.2013.2245312

Y. Endo、M. Fukushima、K. Arai、Y. Shimada、M. Yamaguchi、RF Near Field Microscopy of a Coplanar Waveguide with AM-MFM、Journal of the Magnetics Society of Japan、査読有、Vol. 37、2013年、71-75

DOI : 103379/msjmag.1302R006

Yasushi Endo、Masaaki Fukushima、Kaoru Arai、Yutaka Shimada、Masahiro Yamaguchi、Radio Frequency Magnetic Near Field Measurement of CPW Simulated Power/Ground Lines in Radio Frequency Integrated Circuits using a Magnetic Force Microscope Tip、IEEE Transactions on Magnetics、査読有、Vol. 48、2012年、3666-3669

DOI : 10.1109/TMAG.2012.2204968

Y. Endo、Y. Mitsuzuka、Y. Shimada、M. Yamaguchi、Effect of Doping Elements on the Damping Constant of (Ni-Fe)<sub>1-x</sub>M<sub>x</sub> (M=Ga, Ag, Mo, and W) Films、IEEE Transactions on Magnetics、査読有、Vol. 48、2012年、3390-3393  
DOI : 10.1109/TMAG.2012.2199742

Yasushi Endo、Masaaki Fukushima、Masatoshi Watanabe、Kaoru Arai、Yutaka Shimada、Masahiro Yamaguchi、RF Magnetic Near Field Measurement using a Magnetic Force Microscope for the Potential Application to Evaluate LTE-Class RFIC、Proceedings of ECC2011、査読無、Vol.1、2011年、203-206

[学会発表](計21件)

Yasushi Endo、Masahiro Yamaguchi、Magnetization dynamics of Ni-Fe elliptical dot arrays measured by the FMR measurement with a CPW、Progress in Electromagnetic Research Symposium (招待講演)、2014年8月25~28日、Guangzhou (中国)

遠藤恭、大西真輝、荒井薫、山口正洋、磁気力顕微鏡によるコプレーナウェーブガイド上で発生する直流磁界測定、平成26年電気学会全国大会、2014年3月19日、愛媛大学(松山市)

Yasushi Endo、Masahiro Yamaguchi、Study on the spin-dynamics of Ni-Fe elliptical dot arrays based on the CPW-FMR measurements、International Symposium on EcoTopia Science '13 (招待講演)、2013年12月14日、名古屋大学(名古屋市)

Y. Endo、P. Fan、A. Hotta、M. Yamaguchi、Influence of Spin-Torque on Thermal Mag-Noise in a Tunneling Magnetoresistive Read Head with a Low

Resistance Area Product below 1.0  $\mu\text{m}^2$ 、58<sup>th</sup> Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials、2013年11月7日、Denver (米国)

Yasushi Endo、Sho Muroga、Yutaka Shimada、Masahiro Yamaguchi、Study on magnetic thin films for electromagnetic noise suppression in LTE class IC chips、12<sup>th</sup> IUMRS International Conference on Advanced Materials(招待講演)、2013年9月24日、Qingdao (中国)

平野紀、遠藤恭、伊藤哲夫、柳邦雄、室賀翔、島田寛、山口正洋、伝送線路上に配置した磁性薄膜による伝導及び誘導ノイズ抑制効果、第37回日本磁気学会学術講演、2013年9月6日、北海道大学(札幌市)

遠藤恭、山口正洋、高周波磁気力顕微鏡の開発、第188回日本磁気学会研究会「高周波電磁界活用の最前線」(招待講演)、2013年1月31日、中央大学駿河台記念館(東京都)

Y. Endo、A. Hotta、M. Yamaguchi、Influence of Stripe Height on Critical Current Density of Spin-Torque Noise in Tunneling Magnetoresistive Read Heads、IEEE Transactions on Magnetics、12<sup>th</sup> Joint MMM/Intermag Conference、2013年1月18日、Chicago (米国)

遠藤恭、福嶋正昭、荒井薫、島田寛、山口正洋、MFMによる高周波近傍磁界測定、電気学会マグネティックス研究会、2012年12月20日、大阪市立大学(大阪市)

Yasushi Endo、Masaaki Fukushima、Kaoru Arai、Yutaka Shimada、Masahiro Yamaguchi、RF Near Field Microscopy of a Coplanar Waveguide with AM-MFM、International Conference of the Asian Union of Magnetics Societies (ICAUMS 2012)、2012年10月4日、奈良県新公会堂(奈良市)

Y. Endo、A. Hotta、M. Yamaguchi、Estimation of Critical Current Density of Spin-Torque Noise in Tunneling Magnetoresistive Read Heads with Varying Stripe Heights、International Conference of the Asian Union of Magnetics Societies (ICAUMS 2012)、2012年10月4日、奈良県新公会堂(奈良市)

Akira Hotta、Yasushi Endo、Masahiro Yamaguchi、Influence of Spin-Torque on the GHz range Noise in Tunneling Magnetoresistive Read Head、平成24年度電気関係学会東北支部連合大会、2012年8月31日、秋田県立大学(由利本荘市)

Yasushi Endo、Yoshio Mitsuzuka、Yutaka

Shimada, Masahiro Yamaguchi, On the relation between the magnetoelastic effect and the damping constant of (Ni-Fe)<sub>1-x</sub>M<sub>x</sub> (M=Ag, Cr, Ga, Au, Pd, and Pt) films, The 19<sup>th</sup> International Conference on Magnetism(ICM 2012)、2012年7月12日、釜山(韓国)

Yasushi Endo, Naomi Sakashita, Yutaka Shimada, Masahiro Yamaguchi, Dynamics of Ni-Fe elliptical dot arrays based on CPW-FMR measurements, The 19<sup>th</sup> International Conference on Magnetism (ICM 2012)、2012年7月10日、釜山(韓国)

Yasushi Endo, Masaaki Fukushima, Kaoru Arai, Yutaka Shimada, Masahiro Yamaguchi, Radio Frequency Magnetic Near Field Measurement of CPW Simulated Power/Ground Lines in Radio Frequency Integrated Circuits using a Magnetic Force Microscope Tip, International Magnetism Conference (Intermag2012)、2012年5月10日、Vancouver(カナダ)

Yasushi Endo, Masahiro Yamaguchi, High-Frequency MFM, 2012 Tohoku/Kobe/KAIST Workshop, 2012年4月6日、大田(韓国)

遠藤恭、福島正昭、荒井薫、島田寛、山口正洋、異なる磁性コート探針によるコプレーナウェーブガイド上の近傍磁界強度の評価、平成24年電気学会全国大会、2012年3月23日、広島工業大学(広島市)

遠藤恭、坂下直己、島田寛、山口正洋、集積化したNi-Feドット列における磁化の高周波磁界応答に関する研究、2012年電子情報通信学会総合大会、2012年3月22日、岡山大学(岡山市)

遠藤恭、堀田明良、山口正洋、TMRヘッドにおけるGHz帯ノイズの電流密度依存性、2012年電子情報通信学会総合大会、2012年3月22日、岡山大学(岡山市)

遠藤恭、山口正洋、高周波MFMの開発、スピニクス研究会(招待講演)、2012年2月23日、東北大学(仙台市)

- ②1 Yasushi Endo, Masaaki Fukushima, Masatoshi Watanabe, Kaoru Arai, Yutaka Shimada, Masahiro Yamaguchi, RF Magnetic Near Field Measurement using a Magnetic Force Microscope for the Potential Application to Evaluate LTE-Class RFIC, 2011 China-Korea-Japan Electronics & Communications Conference, 2011年10月26日、UESTC (Chengdu, 中国)

〔図書〕(計1件)

遠藤恭 他 著、日本磁気学会、「第36回日本磁気学会サマースクール 高周波磁気物性」、2013、115-127

〔産業財産権〕

出願状況(計2件)

名称：高周波磁界検出装置

発明者：遠藤恭、島田寛、山口正洋

権利者：東北大学

種類：特許

番号：特許願 2012-83424 号

出願年月日：2012年3月31日

国内外の別：国内

名称：高周波磁界検出装置

発明者：遠藤恭、島田寛、山口正洋

権利者：東北大学

種類：特許

番号：特許願 2012-83425 号

出願年月日：2012年3月31日

国内外の別：国内

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

遠藤 恭 (ENDO, YASUSHI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：50335379