

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656197

研究課題名(和文)新規高周波ナノスピン計測技術の構築

研究課題名(英文)Development of new high-frequency nano-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) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、局所領域でのスピンの高周波磁界応答を評価できる新規「高周波ナノスピン計測技術」として、beating field方式による高周波磁気力顕微鏡を構築した。構築に先立ち、本計測技術の原理を確認するために、周波数のわずかに異なる二つの正弦波信号を伝送線路に入力して磁界を発生させ、MFM探針が振動することを明確にした。次に、搬送波信号をCPW側へ、搬送信号とわずかに周波数の異なる参照信号をMFM探針直上に設置する先に述べた励磁コイル側へ入力してbeating fieldを発生されることにより、高周波伝送線路上での磁界計測と二次元磁界マッピングの検討が可能であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This study reports our newly proposed high-frequency nano-spin measurement technique, that is, beating field typed high-frequency magnetic force microscope. The beating field is produced by supplying a signal current to the CPW and a reference current to an exciting coil. The signal current is fixed at a specific GHz-range frequency, while the reference is adjusted to produce a beat with a frequency near the cantilever resonance frequency. As the MFM tip is excited by the beat, the gradient of magnetic field can be successfully observed above the CPW surface for a GHz-range signal frequency. The gradient of magnetic field is minimized near the two gaps, but is maximized near the center of the signal line. These results demonstrate that the tip interacts closely with the RF magnetic near-field of the CPW through the beating field, and exploring a reference RF field can detect the distribution of RF magnetic fields radiated from a RF circuit component with a very high spatial resolution.

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：高周波計測 ナノスピン プローブ顕微鏡 MFM探針

1. 研究開始当初の背景

MRAM に代表されるスピントロニクスデバイスは、従来の半導体 LSI の高度集積化、高速演算・記憶動作を保持したまま、その問題点である消費電力、記憶保持機構を解決できる優位性を有し、国内外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。これらのデバイスの設計・実用化の促進のためには、その基本要素技術である高速記憶保持動作を担う微小磁性体の高周波磁界応答 (0.1 ~ 数 10 GHz でのスピン反転速度や共鳴現象) を定量評価し、性能向上につなげることが重要である。しかしながら、従来のスピン計測技術では、測定周波数の限界とともに測定感度や試料サイズの制限などの諸問題を抱え、微小磁性体における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。そのため、デバイスの提案に留まっており、実用化に至っていない。上記の問題点を解決するためには、従来の計測技術に替わる新たな高周波ナノスピン計測技術の構築が望まれている。

2. 研究の目的

これまでに MRAM や磁性論理演算素子 (MLG) といった新規スピントロニクスデバイスの基礎的な要素技術に関する知見を得てきた。また、「外部磁界掃印型磁気力顕微鏡」、「高周波近傍磁界計測技術」および「高周波伝送線路による FMR 測定」といったスピン計測技術の開発を行ってきた。本研究課題では、これらのスピン計測技術を組み合わせ、スピントロニクスデバイスを実用化する上で不可欠である、局所領域でのスピンの高周波磁界応答を評価できる新規「高周波ナノスピン計測技術」を開発する。具体的には、新規の高周波磁界信号検出方式 (高周波磁界のうなり方式) を確立し、伝送線路上での磁界計測と二次元磁界マッピングを検討する。また、本方式を用いた場合の、スピンの磁界応答を評価するための課題を抽出する。

3. 研究の方法

本計測技術の概略図を図 1 に示す。本計測技術の基礎検討に関しては、図 1(a) に示すように、2 台のシグナルジェネレータと高周波信号合成器を用いて、搬送波信号と、その信号の周波数 f からカンチレバの共振周波数分 f だけずらした信号を同時に CPW に入力し、CPW 上で場のうなりによる高周波近傍磁界を発生させた。一方、この基礎検討をもとにして、図 1(b) に示すように、2 台の信号発生器と高周波信号合成器を用いて、搬送波信号と、その周波数から MFM 探針の共振周波数分だけわずかにずらした参照波信号を 1 ポート型 CPW (信号線幅 5 μm) と励磁用コイルにそれぞれ入力し、CPW と励磁用コイル間で磁界のうなりを発生させた。

これらの測定系を用いて、いずれの場合も、CPW 上の任意の位置に MFM 探針をガラス基板

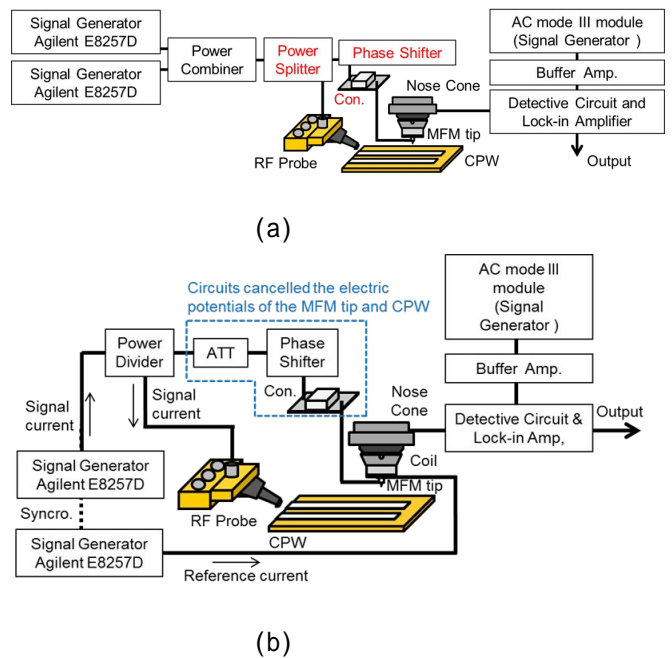


図 1 高周波ナノスピン計測技術 (beating field 方式高周波磁気力顕微鏡) の概略
(a) 原理検証用擬似モデル
(b) beating field 方式

面から一定のリフト高さだけ離して固定し、CPW 上で発生する磁界のうなりと MFM 探針との間に磁気的な相互作用が働き、MFM 探針が振動して機械的共振周波数 f_{res} 付近で振幅が最大となる。参照波周波数を探針の共振周波数近傍で走査し、カンチレバのたわみ量にあたる振動振幅を、レーザ、位置検出素子 (PSD)、検出回路とロックインアンプを用いて電圧値として測定し、MFM 探針の振動振幅値に換算して評価した。直流あるいは低周波成分によるカンチレバへの影響を遮断するためのバイパスコンデンサとして、GHz 帯に共振点を有するチップコンデンサを選択した。また、これまでの研究からも明らかのように、CPW 上では高周波近傍電界と磁界が混在していることから、CPW と MFM 探針との等電位化を試み、近傍電界の影響が抑制されるようにした。同時に高周波ケーブルの長さに注意をして、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。

また、本計測の測定条件として、搬送波周波数は 0.1 ~ 7.0 GHz、搬送波信号の最大電流値はおよそ 9.1 mA、参照信号の最大電流値はおよそ 23 mA、ロックインアンプのバンド幅 80 kHz である。

本計測技術の測定対象に用いる CPW 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 CPW の形状は一端が終端された 1 ポート型形状であり、その膜構造はガラス基板 (厚さ: 550 μm 、比誘電率 ϵ_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。その寸法としては、線路長、信号

線、グラウンド線および信号線とグラウンド線間のギャップ幅は 7800、5、50、6 μm である。CPW の特性インピーダンスはおよそ 191 Ω である。

本計測に用いた MFM 探針は磁性薄膜をコートしていない Si カンチレバ、軟磁気特性(保磁力 1.5 Oe、飽和磁化 750 emu/cc、異方性磁界 5.7 Oe)を有する 100 nm 厚の Ni - Fe 膜をスパッタリングでコートした Si カンチレバである。Ni - Fe をコートした MFM 探針の場合には、計測前に探針の磁化を垂直方向に固定した。また、探針の各種パラメータに関しては、磁性薄膜のコートの有無にかかわらず、共振周波数 f_{Res} 、大気圧下で測定した Q 値、ばね定数 k、先端半径 R は 24 - 28 kHz、50 - 60、1.3 - 1.4 N/m、80-100 nm である。

4. 研究成果

新規計測技術として高周波磁界のうなり方式による磁気力顕微鏡の原理の提案とその確認を行った。

本計測技術の原理に関しては、第 3 章の研究の方法にも記載したように、周波数帯のわずかに異なる高周波信号(搬送波信号と参照信号)を、伝送線路とコイルへそれぞれ入力して場のうなり(beating field)を発生させると、搬送波信号と参照信号に加えて、それらの信号に重畳するカンチレバの共鳴周波数に由来する包絡線が見られる。この包絡線に MFM 探針が追従して、高周波近傍磁界を検出できることを、計算より予測した。

次に、これらの予測を元にして本計測技術に関して原理の検証を行った。基礎検討して、伝送線路とコイルの代わりに、周波数帯のわずかに異なる 2 つの正弦波信号を同時に CPW へ入力して beating field を発生させる疑似モデルを用いて、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 探針により高周波近傍磁界の評価を行った。それらの結果を図 2 に示す。いずれの探針の場合も、10 GHz まで探針の振動振幅を検出することに成功した。また、MFM 探針の振動振幅値は、Si 探針に比べて大高くなっている。これらの結果から、近傍電界だけではなく近傍磁界を検出していることがわかった。

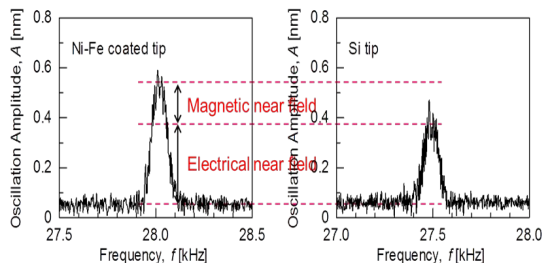


図 2 1.0 GHz の搬送波信号を CPW へ入力したときに、参照信号を走査して検出した Ni-Fe コート探針および Si 探針の共振周波数近傍の振動振幅

以上の結果から、本計測技術では測定対象となる伝送線路上で beating field を発生させることによる近傍磁界の検出原理を提案し、疑似モデルによる実験から、Ni-Fe コートした MFM 用探針で近傍電磁界を検出できることを明確にした。(Ref.: Y. Endo et al., JAP 115, 17D120 (2014).)

これらの結果に基づいて、まず参照信号を入力する MFM 探針直上に設置するコイルの設計・試作および高周波特性を検討した。その結果、MFM 用探針先端近傍で 8.0 A/m 程度発生でき、高周波特性として低損失な直径 100 μm 程度の半円形状の励磁コイルの試作に成功した。

次に、図 1(b)に示した測定系を用いて、搬送波信号を CPW 側へ、搬送信号とわずかに周波数の異なる参照信号を MFM 探針直上に設置する先に述べた励磁コイル側へ入力し、beating field による高周波近傍磁界を CPW 上で発生させた。このとき、100 nm 厚の Ni-Fe 膜をコートした Si 探針を基板表面から 1.0 μm の高さで CPW のギャップ中央で固定し、共振時における探針の振動振幅値の計測を行

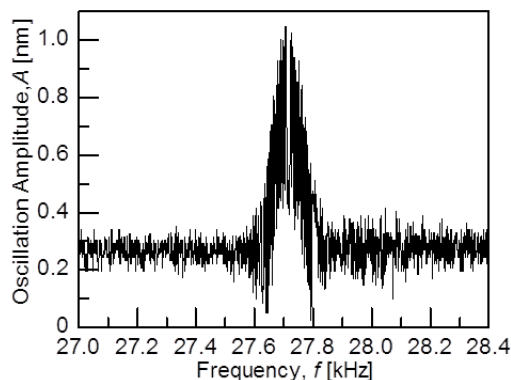


図 3 1.0 GHz の搬送波信号を CPW へ入力したとき、参照信号を励磁コイルへ入力して 1.0 GHz 近傍を走査して検出した MFM 探針の振動振幅

った。図 3 に示すように、搬送波信号の周波数を 1 GHz に固定し、参照信号の周波数を 1 GHz 近傍で走査させながら測定を行うと、参照信号の周波数 1.000027 GHz 近傍、すなわち探針の共振周波数 27.7 kHz 近傍で、振動振幅値が最大となった。この結果は 2 つの高周波信号によって beating field が作り出す高周波近傍磁界を MFM 探針で検出可能であることを表している。また、CPW 側の搬送波信号の電流値を増加させると、機械的共振周波数近傍の振動振幅値が線形的に増加した(図 4)。この結果は、CPW 上で発生する beating field による波形の振幅強度が搬送波信号の電流の増加にともない増加し、そのうなりにより形成される高周波信号の包絡線に追従していることによると考えられる。これらの結果は、搬送波信号と参照信号の 2

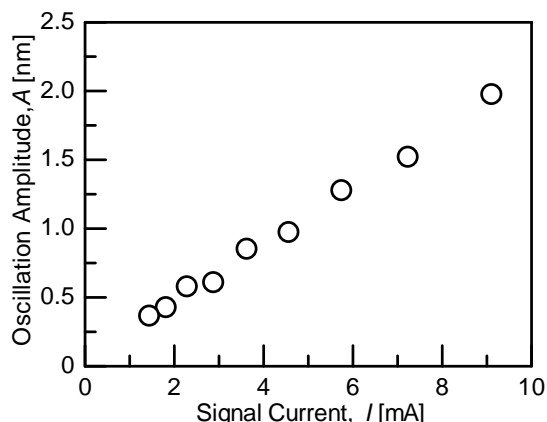


図4 参照信号強度を固定した場合の、搬送波信号強度に対するMFM探針の共振周波数での振動振幅値の変化

つの高周波信号をCPWと励磁用コイルにそれぞれ入力し、線路上で発生するbeating fieldによるGHz帯近傍磁界を、MFM探針による検出が可能であることを表わしている。(Ref.: Y. Endo et al., IEICE Proceedings of EMC '14/Tokyo (2014) in press.)

これらに加えて、本計測技術を用いてCPWの断面方向および面内方向の二次元マッピング計測を行った。MFM探針の振動振幅値は、信号線中央付近で最大となり、ギャップ近傍で最少となった。これらの結果は、MFM探針がCPWと励磁コイルとの間で発生する水平方向のbeating fieldによる磁界に反応していることによると考えられ、電磁界シミュレーションからこの考察の妥当性を明確にした。

以上の結果から、新規の「高周波ナノスピントラップ技術」としてbeating Field方式による高周波磁気力顕微鏡能の構築に成功した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

Yasushi Endo, Masaki Onishi, Masaaki Fukushima, Karou Arai, Kunio Yanagi, Yutaka Shimada, Masahiro Yamaguchi, Study on the Measurement of Microscopic RF Field Distribution with a MFM Tip Exploiting a Beat Signal Between a CPW and an Exciting Coi, IEICE Proceedings of EMC '14/Tokyo, 査読有, Vol. 1, 2014年、印刷中

Yasushi Endo, Masaaki Fukushima, Karou Arai, Kunio Yanagi, Yutaka Shimada, Masahiro Yamaguchi, Measurement of GHz range magnetic field distribution near a coplanar waveguide using a beating field-type magnetic force microscope, Journal of Applied Physics, 査読有, Vol.115, 2014年、17D120-1-3 DOI:10.1063/1.4862396

遠藤恭, 山口正洋, 高周波磁気力顕微鏡の開発、日本磁気学会第188回研究会資

料「高周波電磁界活用の最前線」、査読無、第188回研究会資料、2013年、15-18

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、電気学会研究会資料、査読無、MAG-12-169~180, 2012年、19-24

〔学会発表〕(計18件)

Yasushi Endo, Masaki Onishi, Masaaki Fukushima, Karou Arai, Kunio Yanagi, Yutaka Shimada, Masahiro Yamaguchi, Study on the Measurement of Microscopic RF Field Distribution with a MFM Tip Exploiting a Beat Signal Between a CPW and an Exciting Coi, EMC '14/Tokyo, 2014年5月15日、一ツ橋会館(東京都)

Yasushi Endo, Masahiro Yamaguchi, Yojiro Shigeta, Masaki Onishi, Kaoru Arai, Sho Muroga, Development of micro magnetic field probe to evaluate near field on RFIC chip, EMC '14/Tokyo (招待講演), 2014年5月14日、一ツ橋会館(東京都)

Yasushi Endo, Masaki Onishi, Sho Muroga, Kaoru Arai, Kunio Yanagi, Yutaka Shimada, Masahiro Yamaguchi, GHz Range Magnetic Field Measurement of a Coplanar Waveguide with a MFM Tip Exploiting a Beat Signal Between a CPW and an Exciting Coil, 2014 Intermag Conference, 2014年5月7日、Dresden (ドイツ)

荒井薫, 遠藤恭, 柳邦雄, 島田寛, 山口正洋, Beating Field方式磁気力顕微鏡による高周波伝送線路のGHz帯近傍磁界測定、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)

遠藤恭, 大西真輝, 荒井薫, 柳邦雄, 島田寛, 山口正洋, Beating Field方式高周波磁気力顕微鏡によるCPW上の近傍磁界計測に関する研究、電気学会マグネティクス研究会、2013年12月19日、金沢大学(金沢市)

Yasushi Endo, Masaaki Fukushima, Karou Arai, Kunio Yanagi, Yutaka Shimada, Masahiro Yamaguchi, Measurement of GHz range magnetic field distribution near a coplanar waveguide using a beating field-type magnetic force microscope, 58th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2013年11月6日、Denver(米国)

遠藤恭, 福嶋正昭, 荒井薫, 柳邦雄, 島田寛, 山口正洋, Beating Field方式MFMによるコプレーナ伝送線路のGHz帯近傍磁界計測、平成25年度スピニクス特別研究会、2013年10月17日、岩手大学(盛岡市)

遠藤恭, 荒井薫, 柳邦雄, 島田寛, 山口

正洋、Beating Field 方式高周波磁気力顕微鏡による高周波伝送線路の近傍磁界評価、平成 25 年電気学会基礎・材料・共通部門大会、2013 年 9 月 12 日、横浜国立大学（横浜市）

荒井薫、遠藤恭、柳邦雄、島田寛、山口正洋、Beating Field 方式高周波磁気力顕微鏡探針励磁用コイルの試作とその高周波特性に関する研究、平成 25 年電気学会基礎・材料・共通部門大会、2013 年 9 月 12 日、横浜国立大学（横浜市）
遠藤恭、福嶋正昭、荒井薫、柳邦雄、島田寛、山口正洋、Beating Field 方式 MFM によるコプレーナ伝送線路の高周波近傍磁界評価、第 37 回日本磁気学会学術講演、2013 年 9 月 3 日、北海道大学（札幌市）

遠藤恭、福嶋正昭、荒井薫、柳邦雄、島田寛、山口正洋、Beating Field 方式を用いた MFM 探針によるコプレーナウェーブガイド上の高周波近傍磁界測定、平成 25 年電気学会全国大会、2013 年 3 月 22 日、名古屋大学（名古屋市）

遠藤恭、高周波磁気力顕微鏡の開発、第 10 回オンチップ RF マグネティックス調査専門委員会（招待講演）、2013 年 2 月 27 日、日本交通協会特別室（東京都）

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（招待講演）、2013 年 1 月 31 日、中央大学駿河台記念館（東京都）

Yasushi Endo, Masaaki Fukushima, Kaoru Arai, Kunio Yanagi, Yutaka Shimada, Masahiro Yamaguchi, Measurement of Microscopic RF Field Distribution with a MFM Tip Exploiting a Beat Signal from a Coplanar Waveguide, 12th Joint MMM/INTERMAG Conference, 2013 年 1 月 18 日、Chicago（米国）

Yasushi Endo, Development of HF - MFM, NIST ワークショップ、2013 年 1 月 11 日、Boulder（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）

遠藤恭、福嶋正昭、荒井薫、柳邦雄、島田寛、山口正洋、MFM 探針とうなり磁界を組み合わせた高周波磁界計測、2012 年第 3 回公開ワークショップ 高速・高品質な無線通信実現のための IC チップレベルの低ノイズ化技術～無線通信システム性能と IC チップレベル EMC～、2012 年 12 月 4 日、神戸大学（神戸市）

Yasushi Endo, Masaaki Fukushima, Kaoru Arai, Kunio Yanagi, Yutaka Shimada, Masahiro Yamaguchi, Study of MFM for RF Field Detection with a CPW Producing a Beat Signal, ICAUMS2012, 2012 年 10 月 4 日、奈良県新公会堂（奈

良市）

〔産業財産権〕
出願状況（計 2 件）

名称：高周波電磁界測定装置
発明者：遠藤恭、山口正洋、島田寛、室賀翔
権利者：同上
種類：特許
番号：PCT/JP2013/074059
出願年月日：2013 年 9 月 6 日
国内外の別：外国

名称：高周波電磁界測定装置
発明者：遠藤恭、山口正洋、島田寛、室賀翔
権利者：同上
種類：特許
番号：特願 2013-054700 号
出願年月日：2013 年 3 月 18 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