

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 23 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630119

研究課題名(和文)高周波電界イメージング計測技術の構築

研究課題名(英文)Development of high-frequency electric field imaging 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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、微小磁性体内の局所領域におけるスピンの電界効果を評価できる新規の「高周波電界イメージング計測技術」の構築を目指して、高周波電界の検出方式の確立を行うとともに、GHz帯でのスピンの電界効果の評価に向けた課題を抽出した。検出方式に関しては、振幅変調方式と電界のうなり方式に関して検討を行い、いずれの方式においてもSi探針により伝送線路上で発生するGHz帯の高周波近傍電界を検出できることを確認した。また、伝送線路上の高周波近傍電界分布計測から、検出部のSi探針を含むカンチレバの誘電材料特性の改良が課題である。以上の知見から、新規の高周波電界イメージング計測技術の構築が可能である。

研究成果の概要(英文)：This study reports the development of our proposed high-frequency electric field imaging measurement technique for evaluating the electric field effect of spin at the local area of a nano-magnet. Both an amplitude modulation (AM) method and a beating electric field method were suggested as a detection method of this measurement technique. For each detection method, when a Si tip approached the CPW surface, the tip oscillated with the maximum amplitude at the cantilever resonance frequency. This results means that a Si tip can detect the HF electric near-field from a CPW using each detection method. Additionally, from the HF electric near-field distribution of the CPW, it was pointed out that the dielectric materials composing of a cantilever with the tip are improved in order to detect the HF electric field of a nano-magnet on a trasmission line in detail. Therefore, these results reveal that the high-frequency electric field imaging measurement technique can be developed newly.

研究分野：工学

キーワード：高周波計測 高周波近傍電界 Si探針 振幅変調方式 電界のうなり方式

1. 研究開始当初の背景

電界誘導型スピndeバイスは、高度集積化、低消費電力といった特長を有し、磁気メモリやセンサなどへの応用が期待され、国内外電気・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。このデバイスの創製には、基本要素技術にあたる電磁気 (Magneto-electric: ME) 効果を有する微小磁性体のスピンの高周波電界効果を定量評価・把握することが重要である。しかしながら、従来の電界計測技術では、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、GHz を超える高周波帯域かつサブミクロン以下の空間分解能でスピンの電界効果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電界イメージング計測技術の構築が望まれている。

2. 研究の目的

これまでに磁性ランダムアクセスメモリ (MRAM) や磁性論理演算回路といった新規スピントロニクスデバイスの基礎的な知見の導出や、「高周波 MFM」、「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、上記の独自開発したスピン計測技術を組み合わせ、ME 効果を有する微小磁性体内の局所領域におけるスピンの電界効果を評価できる新規の「高周波電界イメージング計測技術 (空間分解能: 15 nm 以下、帯域: 67 GHz) の構築を目指して、高周波電界の検出方式の確立を行うとともに、GHz 帯でのスピンの電界効果の評価 (局所領域での電界マッピング計測) に向けた課題を抽出する。

3. 研究の方法

本計測技術の検出方式として、振幅変調方式と電界のうなり方式について検討した。振幅変調方式 (図 1(a)) に関しては、アナログ信号発生器と任意波形発生器を組み合わせ、振幅変調信号を発生させて、その信号を Cr (5 nm)/Cu (300 nm)/Cr (5 nm) 三層構造からなる 1 ポート型コプレーナ伝送線路 (Coplanar waveguide: CPW) (自作、信号線幅 5 μm) へ高周波プローブを介して入力し、CPW 上で高周波近傍電界を発生させた。なお、ロックインアンプの参照信号には変調信号源として利用した任意波形発生器からの出力を用いた。一方、電界のうなり方式 (図 1(b)) に関しては、2 台の高周波アナログ信号発生器を用いて、搬送波数のわずかに異なる正弦波信号 (搬送波信号と参照信号) を、信号合成器で組み合わせ高周波プローブを介して 1 ポート型 CPW へ入力して、CPW 上で電界のうなりを発生させた。

いずれの検出方式においても、Si 探針を

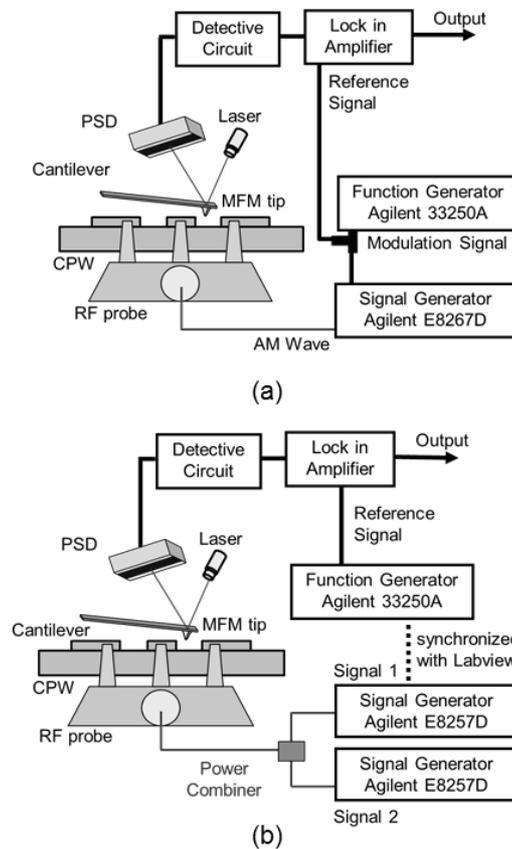


図 1 高周波電界イメージング計測技術の概略

- (a) 振幅変調方式
- (b) 電界のうなり方式

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だけ離して固定し、CPW 上で発生する高周波近傍電界もしくは電界のうなりと Si 探針との間に電界による相互作用が働き Si 探針が振動して共振周波数  $f_{Res}$  付近で振幅が最大となる。変調信号周波数もしくは搬送波周波数と参照信号周波数との差分の周波数を探針の共振周波数近傍で走査し、Si 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信号として測定し、Si 探針の振動振幅値に換算して評価した。ここでは、位相のずれを抑制するために、高周波ケーブルの長さに注意した。また、今回検討した検出方式では、いずれも Si 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、本計測技術における測定条件として、搬送波周波数は MHz 帯から 20 GHz まで、搬送波信号の最大電流値はおよそ 9.1 mA、変調信号の最大電流値は 31.6 mA、参照信号の最大電流値はおよそ 23 mA であり、またロックインアンプのバンド幅については振幅変調方式では 1 kHz、電界のうなり方式では 80 kHz とした。

本計測技術に用いた Si カンチレバ、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、20 - 40 nmである。

#### 4. 研究成果

新規の「高周波電界イメージング計測技術」においてその検出方式として提案する振幅変調方式と電界のうなり方式に関して、それらの検出原理の確立と実験による確認を行った。

振幅変調方式に関しては、ある高周波数帯の搬送波信号に加えて Si 探針の機械共振周波数に近い変調信号を同時に CPW へ入力すると、線路上で高周波近傍電界が発生する。このとき、二つの信号が重畳して Si 探針の機械的共振周波数に由来する包絡線が表われる。したがって、この包絡線に Si 探針が追従し、高周波近傍電界と電気的に相互作用を引き起こし共振する。すなわち、Si 探針により CPW 上で発生する高周波近傍電界の検出が可能であることをあらかじめ計算から予測した。この予測をもとにして、図 1(a)に示した測定系を用いて Si 探針による CPW 上で発生する高周波近傍電界の検出を確認した。図 2 に示すように、CPW に 1 GHz の搬送波信号に加えて、Si 探針の機械的共振周波数に近い変調信号を入力したところ、Si 探針の振動振幅が最大となった。Si 探針先端と CPW 表面との距離（リフト高さ）を数マイクロメートルの範囲で

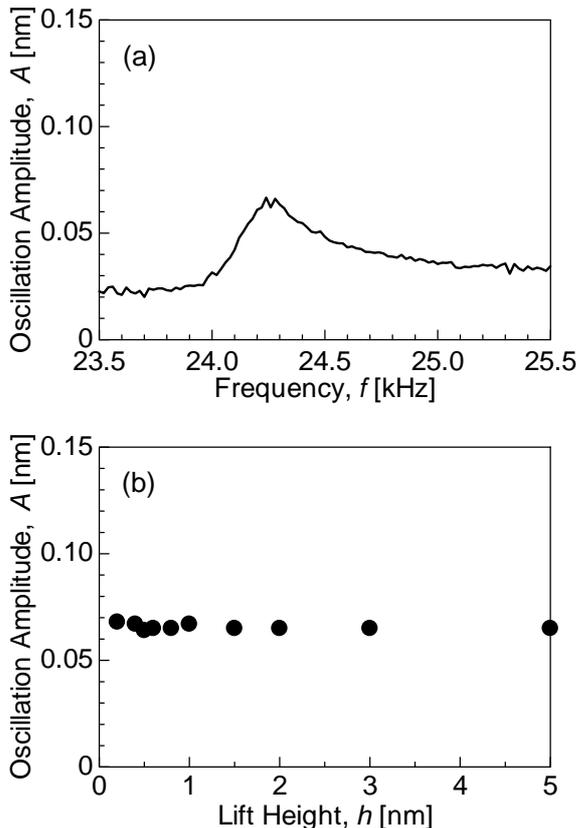


図 2 振動振幅方式による電界検出（搬送波周波数 1 GHz 固定、測定点はギャップ中央）  
 (a) リフト高さ 400 nm における Si 探針の振動振幅  
 (b) Si 探針の振動振幅のリフト高さ依存性

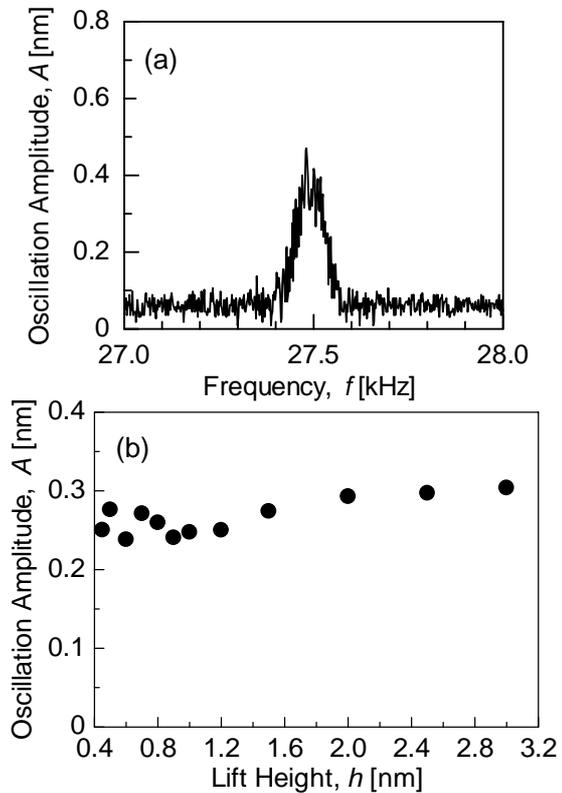


図 3 電界のうなり方式による高周波近傍電界検出（搬送波周波数 2 GHz、参照信号の周波数 2.0000275 GHz 固定、測定点はギャップ中央）

(a) リフト高さ 400 nm における Si 探針の振動振幅  
 (b) Si 探針の振動振幅のリフト高さ依存性

変化させても、Si 探針の振動振幅が一定であり、高周波解析から予測される電界検出の結果と一致した。また、搬送波信号の周波数を MHz 帯から GHz 帯まで変化させても、Si 探針の振動は一定であった。これらの結果は振幅変調方式により CPW 上で発生する高周波近傍電界を検出できることを意味している。

電界のうなり方式に関しては、周波数帯のわずかに異なる 2 つの高周波信号を、伝送線路とコイルへそれぞれ入力して高周波電界のうなりを発生させると、それらの信号に重畳する Si 探針の機械的共振周波数に由来する包絡線が観測できる。この包絡線に Si 探針が追従して、高周波近傍電界を検出できることを計算より予測した。この予測をもとにして、図 1(b)に示した測定系を用いて Si 探針による検出を検討した。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、CPW 上でうなり信号による高周波近傍電界を模擬的に発生させた。このとき、図 3 に示すように、二つの正弦波信号の周波数差を Si 探針に機械的共振周波数近傍に近づけると、Si 探針の振動振幅が最大となった。また、搬送波信号の周波数を 2 GHz と固定して、CPW の信号線とグラウンド線とのギャップ中央付近においてリフト高さを 0.4  $\mu\text{m}$  から 3.0

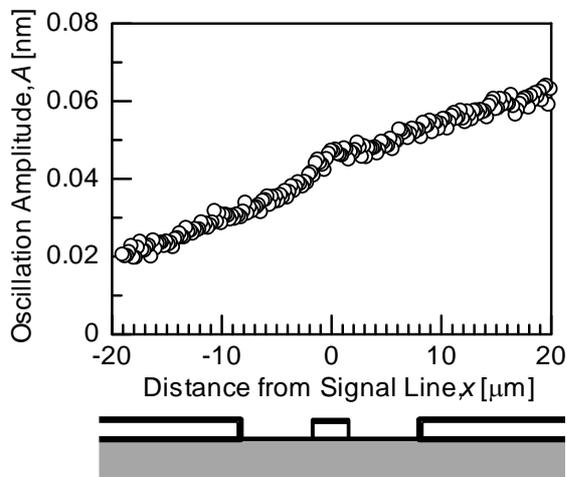


図4 Si 探針の振動振幅のCPW 断面方向依存性 (搬送波周波数 1 GHz、リフト高さ 1 μm 固定)

μm まで可変させても、Si 探針の振動振幅はほぼ一定となった。これらの結果は伝送線路上で発生する高周波近傍電界を Si 探針により検出できることを意味している。

したがって、いずれの検出方式においても Si 探針により伝送線路上で発生する高周波近傍電界を検出できることを明確にした。

次に、GHz 帯でのスピンの電界効果の評価に向けた本計測技術の課題抽出を行った。なお、検出方式としては図1に示すように測定系のセットアップが簡便な振幅変調方式を採用した。リフト高さを 1 μm に固定して、CPW 上で発生する GHz 帯の高周波近傍電界の断面(プローブ走査方向)分布計測を行った。その結果を図4に示す。Si 探針の振動振幅は信号線の中央部 ( $x = 0 \mu\text{m}$ ) を除いてほぼ右肩上がりとなり単調に増加しており、Si 探針の走査方向に依存している。この結果は Si 探針が誘電体であり、探針を含むカンチレバ全体と CPW とが平行平板コンデンサの電極として振る舞い、カンチレバの走査方向によってカンチレバ面積が変化することによるものである。したがって、本計測技術を用いて伝送線路を含む磁性体の高周波電界分布を正確に測定するためには、カンチレバを構成する材料の変更や検出部にあたる探針以外の部分の絶縁性を高めることが課題である。

以上より、今回の原理検証と課題抽出から、提案した二つの検出方式(振動振幅方式および電界のうなり方式)に基づいて新規の高周波電界イメージング計測技術の構築が可能である。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 4 件)

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講演論文集、査読無、第 2 分冊、2016

年、S3(21)-S3(24)

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 Magnetic Force Microscope Tip by Exploiting a Beat Signal Between the Coplanar Waveguide and an Exciting Coil, IEEE Transactions on Magnetics, 査読有、Vol. 50, 2014 年, 6500604-1-4, DOI: 10.1109/TMAG.2014.2325015

遠藤恭、室賀翔、荒井薫、重田洋一郎、山口正洋、高分解能 RF 電磁界プローブに関する研究、査読無、電磁環境工学情報誌、月刊 EMC、Vol. 318, 22-30

Yasushi Endo, M. Onishi, M. Fukushima, K. Arai, K. Yanagi, Y. Shimada, M. Yamaguchi, Study on the Measurement of Microscopic RF Field Distribution with a MFM Tip Exploiting a Beat Signal between a CPW and an Exciting Coil, 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Tokyo (EMC '14/Tokyo), 査読有、Vol. 1, 2014 年、517-520

[学会発表](計 7 件)

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シンポジウム(招待講演)、2016 年 3 月 16 日、東北大学(仙台市)

遠藤恭、高周波磁気力顕微鏡の開発、産総研セミナー(招待講演)、2015 年 4 月 10 日、産総研(つくば市)

遠藤恭、Beating field 方式高周波磁気力顕微鏡の開発、電気学会マグネティックス研究会ナノスケール磁性体の新物性と新機能性の応用調査専門委員会セミナー(招待講演)、2015 年 4 月 10 日、産総研(つくば市)

Yasushi Endo, Development of high-frequency MFM, International Workshop on Microwave Magnetic Materials and Application to Nano Information Devices, 2015 年 3 月 13 日、東北大学(仙台市)

遠藤恭、荒井薫、大西真輝、柳邦雄、島田寛、山口正洋、Beating field 方式高周波 MFM によるコプレーナ伝送線路の GHz 帯近傍磁界分布評価、第 38 回日本磁気学会学術講演会、2014 年 9 月 3 日、慶應義塾大学(横浜市)

Y. Endo, M. Onishi, M. Fukushima, K. Arai, K. Yanagi, Y. Shimada, M. Yamaguchi, Study on the Measurement of Microwave RF Field Distribution with a MFM Tip Exploiting a Beat Signal Between a CPW and an Exciting Coil,

2014 International Symposium on  
Electromagnetic Compatibility, Tokyo,  
2014年5月15日、一ツ橋会館(東京都  
区内)

Y. Endo, M. Yamaguchi, Y. Shigeta, M.  
Onishi, K. Arai, S. Muroga、  
Development of Micro Magnetic Field  
Probe to Evaluate Near Field on RFIC  
Chip、2014 International Symposium on  
Electromagnetic Compatibility, Tokyo  
(招待講演) 2014年5月14日、一ツ橋  
会館(東京都区内)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称：高周波電磁界測定装置

発明者：遠藤恭、山口正洋、室賀翔、島田寛

権利者：遠藤恭、山口正洋、室賀翔、島田寛

種類：特許

番号：特願 2015-506537

出願年月日：2015年7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