

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630153

研究課題名(和文) 電場結合型非接触スピン注入を利用した省電力磁化反転

研究課題名(英文) Low power consuming magnetization reversal using electric field coupled spin injector

研究代表者

能崎 幸雄 (Nozaki, Yukio)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：30304760

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：次世代垂直媒体のマイクロ波アシスト磁気記録の実現に向けて、電場結合型スピン注入素子の開発に必要な要素技術について研究した。まず、横型スピバルブ素子を用いて、スピン流によるスピントルクをセンス電流なしで高感度測定することに成功した。また、スピンプンピング由来の直流・交流混合スピン流により強磁性薄膜パターンの磁化反転磁場が減少することを明らかにした。さらに、櫛型電極と圧電基板を用いて電場結合FMR誘引実験を行ない、高周波化に必要な素子設計を調べた。

研究成果の概要(英文)：In order to realize a microwave-assisted magnetic recording in next generation perpendicular medium, we studied some essential technologies needed for developing an electric field coupled spin injector. First, we succeeded to measure a spin transfer torque due to a spin current precisely by using a lateral spin valve structure. Then, it was demonstrated that the magnetization reversal in patterned ferromagnetic thin films could be assisted by a spin current owing to a spin pumping. Furthermore, we examined a circuit design for an electric field coupled excitation of FMR by using a test device composed of interdigital transducers on a piezoelectric substrate.

研究分野：ナノスケール磁性体における非線形スピンドイナミクス

キーワード：強磁性共鳴 マイクロ波アシスト磁気記録 スピン流 スピントランスファートルク

1. 研究開始当初の背景

次世代磁気記録方式として注目されているマイクロ波アシスト磁化反転(MAMR)は、2002年にフランスの研究グループが直径20nmのCo微粒子で実証して以降、精力的に研究されてきた。その後、マイクロ波導波路の性能向上により、振幅が1kOeを超えるマイクロ波磁場の生成が可能になり、2012年に研究代表者のグループが0.5Tbpsi(1平方インチあたり0.5テラビット)の垂直媒体を用いたMAMRの実証に成功し、MAMR記録方式がいよいよ現実味を帯びてきた。一方、MAMRの記録ヘッド開発では、2007年に米国CMUのグループがスピントルク発振素子(STO)の漏洩磁場を媒体の強磁性共鳴(FMR)誘引に利用する方法を提案し、2011年にHGSTが周波数10GHzの交流磁場発生に成功した。ただし、STO方式の記録ヘッドは、磁場強度増大と発振周波数の高周波化がトレードオフ関係にあり、しかも磁場が複雑に分布するヘッド磁極内でSTOを安定発振させることが難しいなど、解決すべき課題が多い。そこで、高周波領域でも効率良くFMRを誘引できる電場結合型スピン注入方式を開発する着想に至った。

2. 研究の目的

垂直媒体に高強度マイクロ波磁場を印加し、磁化振幅の大きなFMRを誘引することにより、磁化反転磁場(記録磁場)を低減するMAMRが次世代磁気記録方式として注目を集めている。MAMRの実用化には、FMR周波数が10GHzを超える高Ku(磁気異方性)媒体において大振幅FMRを誘引する方法が必要だが、記録ヘッドが発生できるマイクロ波磁場の高周波化、高出力化には解決すべき課題があった。本研究では、磁場よりもエネルギー効率良く磁化にトルクを与える事ができるスピン偏極電流に着目し、これを用いた垂直媒体のFMR誘引を実現するため、電場結合型スピン注入技術を開発する。これによりMAMR実用化に向けた最大の問題を根本的に解決する。

3. 研究の方法

本研究では、電場結合型スピン注入素子を用いたFMRの強励起を実現するため、(1)電場結合型スピン注入素子のマイクロ波伝送特性、(2)スピン流由来のスピントランスファートルク(STT)の高感度検出、(3)交流スピン偏極電流によるFMR誘引を用いたMAMRの検証、および(4)交流電場を用いたFMR誘引とその高周波化の4つの要素技術について調べた。なお、サブミクロンサイズ強磁性薄膜パターンの高感度磁気構造観察のため、現有設備の磁気力顕微鏡装置に任意の電気信号を付加、収録することを可能にするシグナルアクセスモジュールを購入した。

4. 研究成果

(1) 電場結合型スピン注入素子のマイクロ波伝送特性

電場結合型の交流スピン偏極電流生成素子は、スピン注入源となる面内磁化膜(NiFe合金)と注入先の垂直磁化膜(Co/Ni多層膜)が非磁性金属(Cu)層で分離された積層構造と、交流電場印加に用いるコプレーナ電極から構成される。電子線露光装置、電子ビーム蒸着装置、およびArイオンミリング装置を用いてSi基板の上に前記の素子を作製し、ネットワークアナライザを用いて複素インピーダンスの周波数依存性を測定した。その結果、交流スピン流生成に必要な電場を発生させる静電容量を確保するための素子寸法、形状を明らかにした。

次に、交流スピン偏極電流による垂直磁化膜のダイナミクスを系統的に調べるため、Co/Ni多層膜の磁気特性を測定した。Co層の膜厚を薄くすることにより、界面誘起の垂直磁気異方性エネルギーが単調増加する一方、ギルバートダンピング定数にはCo膜厚依存性がほとんど無いことがわかった。ギルバートダンピング定数の大きさは、交流スピン流による強磁性共鳴誘引の強度を左右する重要なパラメータである。本研究で作製したCo/Ni多層膜のダンピング定数は、大振幅FMRの誘引とMAMRの実現に必要な条件(0.2以下)を満足していることが確かめられた。

(2) スピン流由来のスピントランスファートルクの検出実験

電荷の流れを伴わないスピン流に由来するスピントランスファートルクを高精度検出するため、測定信号のノイズ源となるセンス電流を用いることなく強磁性薄膜パターンの強磁性共鳴スペクトルを測定する方法を研究した。図1は、試作素子の写真である。スピン流生成回路($E_1 - (E_2, E_3), Py1$)と、スピン流伝送路($E_1 - E_8$)、スピン注入を行う強磁性NiFe薄膜パターン(Py2)、および強磁性共鳴を誘引するストリップ線路(CSW)から構成される。ストリップ線路に交流電流を流すと、強磁性NiFe薄膜パターンには膜厚方向に交流磁場が加わり、磁化が運動する。この

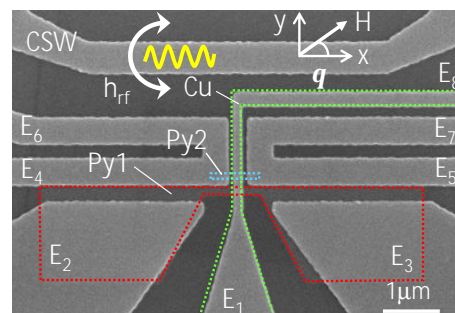


図1 素子の電子顕微鏡写真

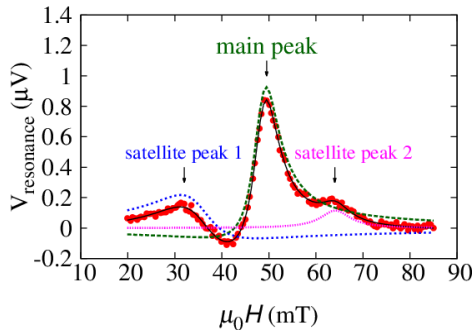


図2 NiFe 薄膜パターンの FMR スペクトル

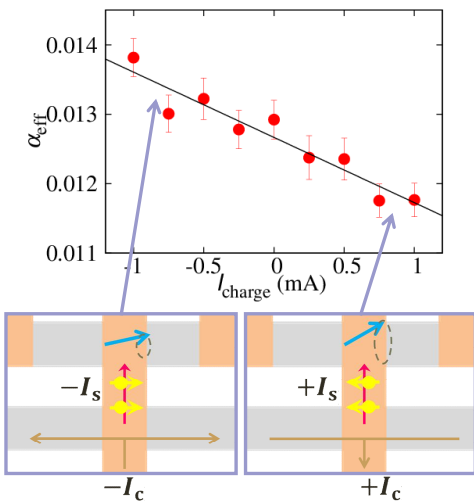


図3 スピン流による Gilbert ダンピング定数の変調

とき、異方性磁気抵抗効果により、強磁性 NiFe 薄膜パターンの電気抵抗が時間変化する。一方、強磁性 NiFe 薄膜パターンの両端に電圧計を接続した回路を考えると、交流磁場による磁力線が回路を鎖交するため、ファラデーの電磁誘導の法則に従って交流の誘導起電力が発生する。その結果、強磁性 NiFe 薄膜パターンの両端には、電気抵抗と電流の時間変化に起因する交流電圧と直流電圧が発生する。このうち直流電場は、強磁性 NiFe 薄膜パターンの複素磁化率に比例するため、交流磁場の周波数に対する直流電圧の変化を測定すれば、強磁性 NiFe 薄膜パターンの FMR スペクトルが得られる(図2)。伝導電子スピンから磁化ベクトルへの STT は、磁化ダンピングトルクと collinear な関係にあるため、FMR 線幅、すなわち Gilbert ダンピング定数を測定することにより STT を測定できる。そこで、横型スピナルブ構造を利用して、スピン流を生成効率と、スピン流注入による強磁性 NiFe 薄膜パターンの Gilbert ダンピング定数の変化を調べた。図3は、強磁性 NiFe 薄膜パターンの Gilbert ダンピング定数のスピン流生成電流依存性である。今回の実験では、正電流が強磁性 NiFe 薄膜パターンの磁化と逆向きのスピン流、負電流が磁化と

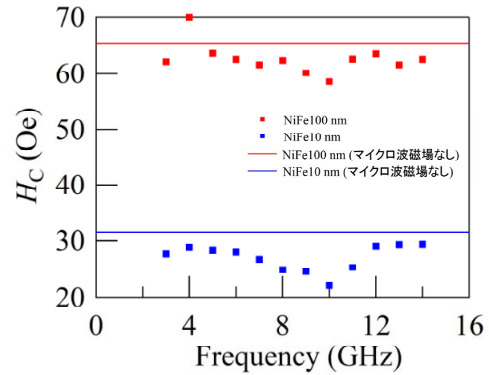


図4 スピンポンピング由来の直流・交流 スピン流による NiFe 薄膜パターンの磁化反転アシスト効果

同じ向きのスピン流を生成する。図3を見てもわかるように、スピン流のスピンの向きと流量に応じて Gilbert ダンピング定数が線形変化しており、STT を測定できることが確かめられた。図3のグラフの傾きから STT 生成効率を求めると 0.13 となり、スピン流生成に用いた電流の13%が強磁性 NiFe 薄膜パターンの磁化にトルクを与えたことがわかった。

(3)交流スピン偏極電流による FMR 誘引を用いた MAMR の検証実験

NiFe 10 nm / Cu 1 nm / NiFe 1 nm からなるスピナルブ膜を矩形パターンに微細加工した素子に交流磁場を印加し、スピンポンピング効果を用いて Cu 層内に交流スピン流を生成することを試みた。図4は、NiFe 10 nm と NiFe 1 nm の保磁力の周波数依存性である。NiFe 10 nm の保磁力を見ると、NiFe 10 nm の FMR 周波数 (9 GHz) において保磁力が極小となった。これは、交流磁場により FMR が誘引され、磁化振幅が大きくなった結果、磁化反転が容易化される「マイクロ波アシスト磁化反転」と考えられる。一方、NiFe 1 nm の保磁力の交流磁場周波数依存性を見ると、NiFe 10 nm の場合と同じ周波数で保磁力が極小となった。NiFe 1 nm の FMR 周波数は 3 GHz 以下であることがわかっており、この保磁力低下はマイクロ波アシスト磁化反転によるものとは考えられない。NiFe 10 nm に FMR が誘引された場合、スピンポンピング効果により NiFe 10 nm の磁化と逆向きのスピンの NiFe / Cu 界面に蓄積することが知られている。このうち、磁化歳差運動の回転軸方向のスピン成分は時間変化しないのに対し、直交方向成分は歳差運動に同期して時間変化する。蓄積されたスピンは、Cu 層を拡散し、対面する NiFe 1 nm に注入される。したがって、スピンポンピング効果によって生じる「NiFe 1 nm の磁化と逆向きの直流スピン流」と、「磁化に直交する交流スピン流」が NiFe 1 nm の磁化反転を容易化したものと考えられる。なお、

直流スピンの流と交流スピンの流が、それぞれ保磁力の低減にどの程度寄与するのかについては、マイクロマグネティクス計算の手法などを用いて今後定量的に明らかにしたい。

(4)交流電場を用いた FMR 誘引とその高周波化に関する研究

まず、スピンバルブ多層膜を電極とする電場結合型素子を作製し、交流電場による FMR 誘引実験を行なった。しかし、試作素子において良好なマイクロ波伝送特性が得られず、FMR 誘引に必要な周波数の交流スピン偏極電流を生成することができなかった。そこで、素子設計（具体的には基板内のプリント配線パターンの最適化）を再検討した。具体的には、櫛型電極と圧電基板を利用した交流電圧による FMR 誘引実験を行ない、FMR 誘引に必要な周波数の交流電圧を印加できる配線パターンを探索した。図 5 は、櫛型電極を含む試作素子の写真である。試作素子のマイクロ波伝送特性を評価した結果、マイクロ波プローブと櫛型電極の距離により高周波信号の減衰が無視できなくなることがわかった。これらの配線パターン設計に関する知見を電場結合型素子に適用することにより、10 GHz 以上の周波数の交流電場による FMR 誘引の実現が見込まれる。

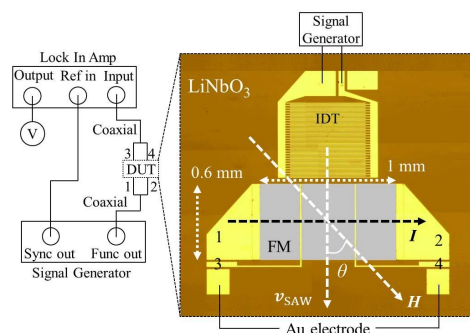


図 5 櫛型電極の交流電圧を用いた FMR 誘引実験の素子

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

- Y. Nozaki, S.D. Watanabe, T. Kobayashi, and T. Tanazawa, Spin transfer torque in lateral spin-valve structure evaluated from field-excited ferromagnetic resonant linewidth, Applied Physics Express, 査読有, Vol. 8, 2015, 043001 (4 pages), doi:10.7567/APEX.8.043001
 柳澤翔吾, 能崎幸雄, 表面弾性波を用いた磁化ダイナミクスの励起とその電気的検出, 電気学会研究会資料, 査読無, Vol. MAG14-113, 2014, pp. 37-42
 N. Ishida, Y. Soeno, K. Sekiguchi, and Y. Nozaki, Journal of Applied Physics,

- 査読有, Vol. 114, 2013, 043915 (5 pages),
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4816778>
 能崎幸雄, 次世代磁気記録へのマイクロ波技術の応用, 電気学会研究会資料, 査読無, Vol. MAG13-155-173, 2013, pp. 55-60
 能崎幸雄, 石田尚子, 添野佳一, 関口康璽, マイクロ波磁場による垂直媒体の保磁力低減効果, IEICE Technical Report, 査読無, Vol. MR2013-6, 2013, pp. 1-6
 能崎幸雄, 石田尚子, 添野佳一, 小林尚史, 関口康璽, 高出力マイクロ波による強磁性共鳴を利用した CoCrPt グラニューラ膜の磁化反転, 磁気学会研究会資料, 査読無, Vol. 188, 2013, pp.11-14

〔学会発表〕(計 8 件)

- M. Takahashi and Y. Nozaki, Experiment on spin current assisted magnetization reversal using spin pumping effect, 20th International Conference on Magnetism, ICM 2015, July 5-10, 2015, Barcelona (Spain)
 柳澤翔吾, 能崎幸雄, 弾性表面波を用いた Ni 薄膜パターンの強磁性共鳴誘引, 日本物理学会第 70 回年次大会, March 21-24, 2015, 早稲田大学 (東京都・新宿区)
 高橋真央, 能崎幸雄, スピンポンピング効果を用いたスピン流アシスト磁化反転実験, 日本物理学会第 70 回年次大会, March 21-24, 2015, 早稲田大学 (東京都・新宿区)
 S. Watanabe, T. Tanazawa, T. Kobayashi, and Y. Nozaki, Modulation of Gilbert damping caused by absorbing a pure spin current in lateral spin-valve structures, IEEE International Conference on Microwave Magnetics 2014, June 29 - September 2, 2014, Sendai (Japan)
 柳澤翔吾, 能崎幸雄, 弾性表面波を用いた磁化ダイナミクスの励起とその電気的検出, 電気学会マグネティクス研究会, August 7-8, 2014, 信州安曇野穂高温泉郷しゃくなげ荘 (長野県・安曇野市)
 能崎幸雄, 次世代磁気記録へのマイクロ波技術の応用, 電気学会マグネティクス研究会, December 19-20, 2013, 金沢大学 (石川県・金沢市)
 渡辺翔, 小林尚史, 関口康璽, 能崎幸雄, 拡散スピン流によるスピントランスファートルクの測定, 第 37 回日本磁気学界学術講演会, September 3-6, 2013, 北海道大学 (北海道・札幌市)
 能崎幸雄, 石田尚子, 添野佳一, 関口康璽, マイクロ波磁場による垂直媒体の保磁力低減効果, 電子情報通信学会, July 12, 2013, 中央大学 (東京都・文京区)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

能崎 幸雄 (NOZAKI, Yukio)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：30304760