

整理番号	H26-J-080	報告者氏名	三輪真嗣
------	-----------	-------	------

研究課題名

非線形効果を用いたスピントロニクス素子の研究

<代表研究者> 機関名：大阪大学 職名：准教授 氏名：三輪真嗣

<共同研究者> 機関名：大阪大学 職名：教授 氏名：鈴木義茂

機関名： 職名： 氏名：

機関名： 職名： 氏名：

機関名： 職名： 氏名：

<研究内容・成果等の要約>

電子の電荷と同時にスピンの自由度を利用するスピントロニクスには大きな期待が寄せられている。具体的にはナノメートルオーダーの金属磁性体と絶縁体の積層構造を有するスピントロニクス素子は高度な機能を有することで知られ、それを用いた磁場センサーがハードディスクドライブの磁気ヘッドに応用されている。本研究では提案者らが開発してきた高周波スピントロニクス素子における非線形効果を利用した高感度磁場センサーの研究を行った。

スピントロニクス素子による磁場センサーの研究は既に様々なものが行われている。その中で提案者は従来の線形効果を用いた磁場センサ(パソコンの磁気ヘッドに搭載済)に対し、高周波スピントロニクス素子における非線形効果により現状を打破し、更なる磁場感度の増大を狙った。具体的にはスピントルク自励発振(STO)を磁場センサとして利用する場合の性能について議論した。スピントロニクス素子を利用した線形効果を利用したMRセンサとSTOという非線形効果を利用したSTOセンサの信号雑音(SN)比をそれぞれ解析的理論モデルから導き評価した。モデル式から得られたSN比を各センサで比較した結果、STOセンサにおいて従来のMRセンサよりも大きなSN比が得られ、新たな磁場センサとしての応用が期待できることがわかった。

次に実験による実証を行った。その結果、実験はMRセンサとSTOセンサの信号雑音比において定性的には理論を再現するものの、定量的には数十倍の乖離があることがわかった。理論と実験との乖離の原因として低周波ノイズの起源の乖離が考えられることを突き止めた。当初の理論では低周波ノイズとして磁化の熱ゆらぎの1次の項のみ、一般的に磁気ノイズと呼ばれるもののみを取り入れていた。一方で現実には磁化の熱ゆらぎの2次の項を取り入れる必要があり、リジッドなスピンのダイナミクスでさえも大きな低周波ノイズ(=非線形磁気ノイズ)を生じさせることがわかった。この非線形磁気ノイズは磁化ポテンシャルの非対称性に起因するため、磁化ポテンシャルを等方的にすることにより、大きく減少させられることを発見した。従ってこの条件を採用すれば、理論通りの信号雑音比を得ることができると考えられる。

このように本研究ではスピントロニクス素子の磁場センサとしてのモデル計算及び実験検証を行った。特に非線形磁気ノイズの発見は今後のセンサ開発に非常に重要であり、この理解は既存の磁場センサの信号雑音比の減少に大きく役立つはずである。

<研究発表（口頭、ポスター、誌上別）>

口頭発表：

高感度スピントルクダイオードとその後の進展

三輪真嗣

高周波スピントロニクス研究会

2016年2月22日 産業技術総合研究所、茨城

High frequency electronic devices using spin dynamics in nanomagnets

S. Miwa

International Symposium on Photonics and Electronics Science and Engineering 2015

2015年3月9日 Kyoto University, Japan

ポスター発表：

Magnetization fluctuation in FeB nanomagnets under asymmetric magnetization potential

S. Miwa, H. Kubota, K. Yakushiji, S. Ishibashi, T. Saruya, A. Fukushima, S. Yuasa and Y. Suzuki

APS March meeting 2015

2015年3月3日 Henry B. Gonzalez Convention Center, San Antonio, Texas, USA

<研究の目的、経過、結果、考察（5000字程度、中間報告は2000字程度）>

本研究の目的は、従来の線形効果を用いた磁場センサに対し、高周波スピントロニクス素子における非線形効果により磁場感度を向上させることである。初年度に理論検討、次年度に実験検証を行った。

初年度はスピントルク自励発振(STO)を磁場センサとして利用する場合の性能における理論検討を行った。具体的にはスピントロニクス素子を利用した線形効果を利用したMRセンサとSTOという非線形効果を利用したSTOセンサの信号雑音(SN)比を解析的理論モデルから導き評価した。

まず磁気センサとして従来から利用されているMRセンサのSN比を求める。非磁性層を2層の強磁性層で挟んだスピントロニクス素子に外部磁場を印加すると、片方の強磁性層(磁化自由層)の磁化方向が変化する。もう片方の強磁性層(磁化固定層)との磁化相対角に依存する素子抵抗変化(トンネル磁気抵抗効果)が本センサの基本原理である。一方で、有限温度下では磁化の熱揺らぎによるノイズが生じる。そこでMRセンサにおいて外部磁場、熱ノイズの両方に対する応答を解析的に求める必要がある。これらを計算するにあたり、図1に示すようなスピントロニクス素子における磁化自由層(Free layer)のスピンドイナミクスを理解することが重要となる。スピンドイナミクスはランダウリフシッツギルバート(LLG)方程式にスピントランスファートルクを入れた修正LLG方程式を用いた。検討の結果MRセンサのSNは次式で表されることがわかった。

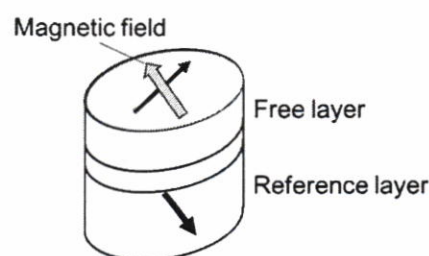


図1 スピントロニクス素子の模式図

ここで S は磁化自由層の全スピン角運動量、 γ は磁気回転比、 α は磁気ダンピング定数、 k_B はボルツマン定数、 T は温度、 Δf は測定バンド幅、 δH_{ext} はセンシング磁場の大きさである。このようにMRセンサのSN比を定量的に求めた。SN比を向上させるためには、素子サイズ増大による S 増大やダンピングの小さな材料を使用することによる α の現象が考えられる。仮に信号出力を大きくするためにトンネル磁気抵抗効果の大きな素子を用いても、熱揺らぎからくるノイズ出力も同様に大きくなるため、式(1)にトンネル磁気抵抗効果の大きさは反映されない。つまり、磁気抵抗効果の改善によるSN比向上は原理的に不可能である。

$$\frac{\text{Signal}}{\text{Noise}} = \frac{S\gamma^2}{8\alpha k_B T \Delta f} (\delta H_{\text{ext}})^2 \quad \text{式(1)}$$

次にスピントロニクス素子における非線形効果であるSTOを利用した磁場センサを考える。STOセンサでは外部磁場に対して発振スペクトルが変化する。そこで、外部磁場に対する「発振パワー変化」および「位相(周波数)変化」を利用した検出方法に対するSN比を理論モデルから求める。

STOセンサはスピントロニクス素子に電流を印加し、磁化自由層のスピンドイナミクスが自励発振している状態を利用する。入力信号である外部磁場を印加すると発振軌道が変化し、出力パワーおよび位相が変化する。これがSTOセンサの原理である。検討の結果、STOセンサのSNは次式で表されることがわかった。

STOセンサはスピントロニクス素子に電流を印加し、磁化自由層のスピンドイナミクスが自励発振している状態を利用する。入力信号である外部磁場を印加すると発振軌道が変化し、出力パワーおよび位相が変化する。これがSTOセンサの原理である。検討の結果、STOセンサのSNは次式で表されることがわかった。

$$\frac{\text{Signal}}{\text{Noise}} = \frac{\alpha S \gamma^2}{4kT \Delta f} (\delta H_{\text{ext}})^2 \quad \text{式(2)} \quad \text{静磁場をSTOの振幅変調で検出する場合}$$

$$\frac{\text{Signal}}{\text{Noise}} = \frac{S \gamma^2}{2\alpha kT \Delta f} (\delta H_{\text{ext}})^2 \quad \text{式(3)} \quad \text{静磁場をSTOの位相変調で検出する場合}$$

(アジリティ(STO入力パワーに対する周波数変化)が小さい時の限界値)

$$\frac{\text{Signal}}{\text{Noise}} = \frac{\alpha S \gamma^2}{2kT \Delta f} (\delta H_{\text{ext}})^2 \quad \text{式(4)} \quad \text{静磁場をSTOの位相変調で検出する場合}$$

(アジリティ(STO入力パワーに対する周波数変化)が大きい時の限界値)

このように STO を利用した位相検波ではアジリティ、つまり STO 入力パワーに対する周波数変化の大小でダンピングのかかり方が異なる。これはアジリティの大小により、位相ノイズに対する振幅ノイズの影響が変化するためである。

最後に各センサの性能を比較するため、それぞれのセンサにおける検出磁場の理論限界を求める。理論限界を見積もる際に用いた、素子のパラメータは次の通りである。素子サイズ： $50 \times 50 \times 2$ (nm³)、原子サイズ： 0.286^3 (nm³)、原子あたりのボーア磁子数： $2.2 \mu\text{B}$ (J/T)、ダンピング定数：0.01

温度：300 (K)。これらのパラメータを用いて、MR センサ、STO センサにおいて SN 比が 1 となる検出磁場の理論限界を計算した。その結果、アジリティの小さな素子で位相検波することが最も SN 比のよい検出方法であり約 $7 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ の検出感度を有する可能性があることがわかった。

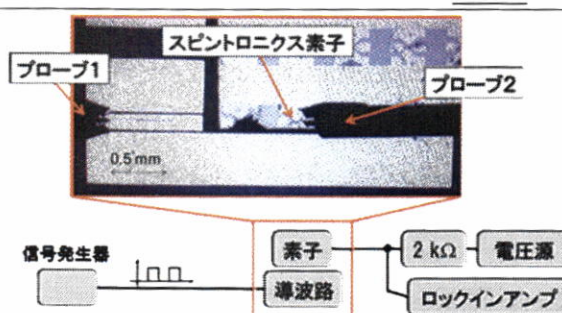


図2 MR センサ

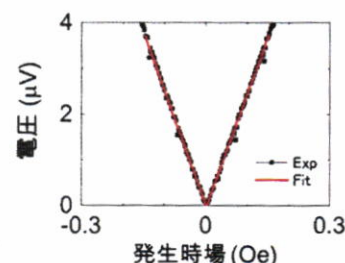


図3 MR センサの結果

次年度は実験的な検討を行った。スピントロニクス素子は CoFeB/MgO/CoFeB 接合を有するものを用いた。自由層、参照層共に CoFeB であり、接合サイズは $100 \times 150 \text{ nm}^2$ である。

図2はMR センサの評価セットアップである。まず信号発生器を利用してプローブ1から導波路に電流を流す。導波路に流れた電流は磁場を発生させる。導波路の中央信号線の直上にはスピントロニクス素子が置いてあり、導波路から発生させた磁場をスピントロニクス素子の抵抗変化で検知する。より具体的にはプローブ2を用いてスピントロニクス素子に 0.5 mA の電流値を流し、スピントロニクス素子に発生した電圧の変化をロックインアンプを用いて測定した。ロックインアンプの時定数は 30 ms に設定し、10回の測定平均値を実験結果として採用した。図3は測定結果である。横軸は導波路から発生させた磁場(H)、縦軸はロックインアンプで測定した電圧(V)である。結果として磁場に対する感度(dV/dH)としては実験結果のフィッティング結果から $25 \mu\text{V}/\text{Oe}$ という値を得た。測定の時定数が 300 ms であることを鑑みると $46 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ であり、磁場検出感度は $190 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ と見積もられる。磁場検出感度は信号雑音比が 1 となる値を採用した。

次に STO センサの振幅検波の実験確認を行った。図4がセットアップ概要である。スピントロニクス素子と導波路の位置関係は図2と同じである。MR センサの時と同様に信号発生期からプローブ1を通して導波路に電流を流し、磁場を発生させた。スピントロニクス素子には予め 7.5 kOe の磁場と -8.1 mA の電流を印加し、自由層の自励発振の起こしておく。そして発振スペクトル信号をアンプで増幅し、スペクトラムアナライザを用いて測定を行った。スペクトラムアナライザの値はアナログアウトプットを利用し、ロックインアンプを用いて電圧として測定した。本測定では 9.4 GHz の発振ピーク値を用いて磁場検出を検討した。ロックインアンプの時定数は 30 ms で行い、10回平均を測定値とした。図5は測定結果である。横軸は導波路から発生させた磁場(H)、縦軸はロックインアンプで測定した電圧(V)である。結果として磁場に対する感度(dV/dH)としては実験結果のフィッティング結果から $470 \mu\text{V}/\text{Oe}$ という値を得た。測定の時定数が 300 ms であることを鑑みると $6,310 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ であり、磁場検出感度は $1,340 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ と見積もられる。磁場検出感度は信号雑音比が 1 となる値を採用した。

最後に STO センサの位相検波の実験を行った。図6は位相検波のセットアップ模式図である。振幅検波の時と同様に信号発生期からプローブ1を通して導波路に電流を流し、磁場を発生させた。スピントロニクス素子には予め 7.5 kOe の磁場と -8.3 mA の電流を印加し、自由層の自励発振の起こしておく。そして発振スペクトル信号をアンプで増幅し、オシロスコープを用いて波形を測定した。信号発生器からは $2 \mu\text{s}$ のオン状態とオフ状態を繰り返す波形を入力した。一方でオシロスコープでは

2 μs のオンオフ状態の内、それぞれ 1 μs を取り出し、それぞれの状態の信号に対して高速フーリエ変換を行った。結果として得られた周波数差を位相検波の信号と定義した。測定は 1000 回行い、平均値を測定値とした。図 7 は測定結果である。横軸は導波路から発生させた磁場(H)、縦軸が先ほど定義した周波数差(d f)である。結果として磁場に対する感度(d f /dH)としては実験結果のフィッティング結果から 0.77 MHz/Oe という値を得た。測定の時定数が 1 ms であることを鑑みると 1.4 kHz/ $\sqrt{\text{Hz}}$ であり、磁場検出感度は 185 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ と見積もられる。磁場検出感度は信号雑音比が 1 となる値を採用した

MR センサ、STO 振幅検波、STO 位相検波の磁場検出感度は実験(理論)において 190 (7) nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 、1340 (440) nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 、185 (3) nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ という結果を得た。実験と理論との間には数十倍の乖離があるが、それぞれの相対的な差は実験においても再現する結果となった。実験と理論との間の乖離には低周波ノイズの起源の乖離が考えられる。ノイズの起源としてはフリー層磁化に対する熱ゆらぎの 1 次応答である磁気ノイズが考えられてきた。磁気ノイズはフリー層磁化の共鳴周波数付近で最大になり、低周波付近では減衰する。一方で実験による精査を重ねた結果、熱ゆらぎの 2 次応答に起因するノイズ(=非線形磁気ノイズ)が完全なリジッドスピンモデルでも低周波領域に生じることを見出した。このノイズを考慮すると共鳴周波数から周波数帯域を小さくするにつれて減少するノイズが低周波付近で再び増大する。一方でこの低周波ノイズは前述のように熱ゆらぎの磁化に対する 2 次応答により生じる。2 次の項は理論的には磁化ポテンシャルの非対称性に依存して生じたため、対称ポテンシャルでは生じないはずである。

図 8 が非線形磁気ノイズの実証結果である。今回は外部磁場の印加角度を変化させることにより、磁化ポテンシャルの対称度を変化させた。 $\theta=15$ 度のデータでは 1GHz 付近の高周波ノイズ(従来から考慮してきた磁気ノイズ)

に加え 0.1GHz 以下で低周波ノイズ(非線形磁気ノイズ)が観測された。一方で磁場角度を変化させていくと低周波ノイズのみが消える領域が $\theta=5$ 度付近に見出された。本研究では広く磁場センサの高感度化に有用である可能性が大きい非線形磁気ノイズの理解と対処法を見出した。

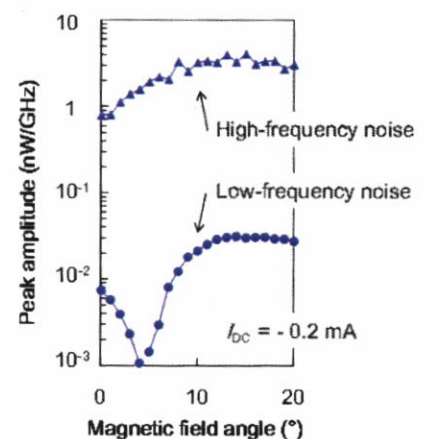
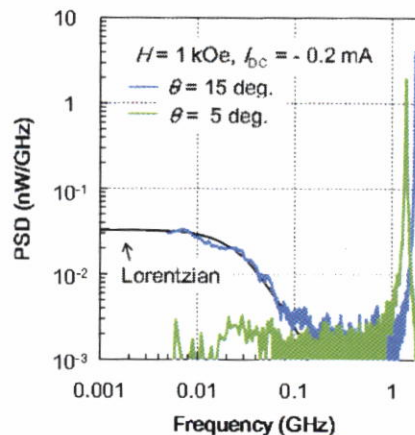


図 8 非線形磁気ノイズの検証

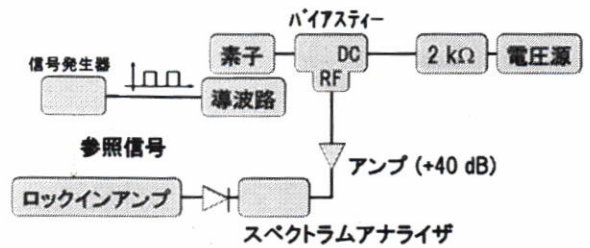


図 4 STO センサ(振幅検波)

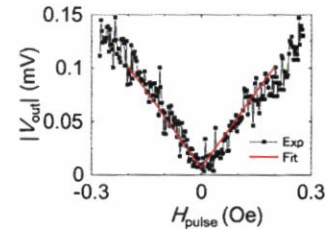


図 5 STO センサ(振幅検波)の結果

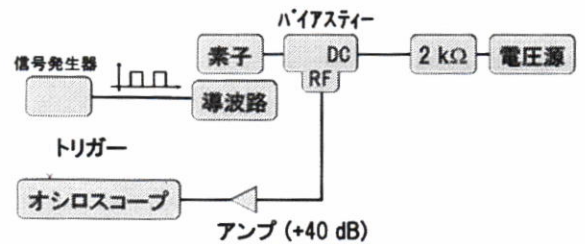


図 6 STO センサ(振幅検波)

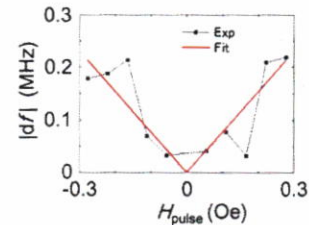


図 7 STO センサ(振幅検波)の結果