

令和元年6月10日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03850

研究課題名(和文) ナノ磁性体超高感度磁気センサー

研究課題名(英文) Highly sensitive magnetic field sensor using nano-scale magnets

研究代表者

鈴木 義茂 (Suzuki, Yoshishige)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：50344437

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：磁界センサーとしてナノサイズの磁性体を用いることによりセンサー内部の磁石の向きの乱れによるノイズの発生を抑え超高感度なセンサーを作ることが目的に研究を行った。その結果、センサーをナノサイズにすることにより携帯電話に使う電波の周波数帯ではノイズを理論値近くまで下げることができるが、医療への応用で重要になる音声周波数帯では磁性膜の縁の磁石の向きの乱れによるノイズが残ることを見出した。スキルミオンについての計算の結果、縁をなくすことによりノイズが低減することを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

医療で重要な脳磁計や心磁計には極低温でしか動作しないセンサーが使用されているためコストが高く、これらの装置は大病院にしか設置されていない。室温で動作する安価で超高感度な磁界センサーが出来ればこれらの検査機器を家庭医でも、あるいは個人でも持つことができるようになり心臓病や脳内の異常を早期に発見できるようになると考えられる。本研究はそのようなセンサーを開発するための基礎研究である。今回の研究成果は磁石を用いた磁界センサーの高感度化の障害となっている磁石の熱による乱れの影響を避ける方法のヒントとなるものである。

研究成果の概要(英文)：This research was done aiming a fabrication of highly sensitive magnetic field sensor avoiding a noise from edge of the magnetic film by use of nano-scale magnetic cells. As a result, the magnetic noise in cellular phone frequency can be reduced down to the theoretical limit but it in voice frequency shows larger noise caused by a fluctuation in the magnet at the edge. Calculation of skyrmion dynamics shows reduction of the voice frequency noise in infinite film.

研究分野：応用物理学

キーワード：磁性体 スピントロニクス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 本研究の開始当初、既にスピントロニクスという新しい科学技術分野に興味が集まっていた。一つの理由は、電子が持つスピンの自由度を利用することにより現代のエレクトロニクスを支える C-MOS 技術が直面している困難を解決できるとの期待からである。もうひとつの理由は、科学の種々の分野で電子スピンの物理が重要な研究課題となりつつあったからである。固体物理・統計物理や量子情報は言うまでもなく、化学反応、爆発物などの検知、生物物理、創薬、医療の分野でもスピンの科学は大変重要となっている。

(2) スピントロニクスの分野では、本研究の開始時までには巨大磁気抵抗素子、および、トンネル磁気抵抗素子(MTJ)が発明され、磁気ハードディスクの読み出しセンサーとして実用化されていた。また、固体磁気メモリ(M-RAM)の記憶セルとしての実用化も進んでいた。しかし、その応用範囲はスピンの関わる科学全体からみれば狭い範囲に限られていた。

この理由は前述の応用が比較的強い磁界(0.1-1 T)の利用にとどまっていたためであると考えた。これに対して医学・化学の分野では脳や心臓が作るような非常に弱い磁界(0.1pT から 100pT)や核スピンの集団が作るやはり微弱な磁界、さらにはラジカル分子などが持つ少数の常磁性スピンを検出することが重要な課題となっていた。

(3) 提案者の研究グループは、巨大な磁気抵抗効果を示す MgO バリヤトンネル MTJ の開発、電圧による強磁性金属の磁化ダイナミクスの制御で世界をリードしていた。また、早くから MTJ の高周波特性に着目し、その当時既に「小さな磁石」のコヒーレントな運動の制御が可能となってきた。その運動は外部磁界の影響に対して非常に敏感であるため、前述の医学・化学分野で必要となる微弱な磁界の検出技術となり得ると考えられた。

2. 研究の目的

(1) 本研究ではこれまでの研究で得たナノ磁性体ダイナミクスの知見と技術を活かし、1/f ノイズと非線形マグノイズを抑えることにより理論限界に迫る感度の磁界センサー実現を目指す。

(2) このようにして得た単一素子について、外部の電子スピン系との二重共鳴の検出を試みる。

3. 研究の方法

(1) 一般に大きなセンサーほど感度が高いが磁化の運動の乱雑性のために 1/f ノイズが発生しやすい。本研究では、まず、磁気異方性を制御した磁化自由層を有する 50-100nm 程度の MTJ の作製により磁化のコヒーレントな運動を実現する。このことにより、磁壁の形成により生じる 1/f ノイズやバルクハウゼンノイズを排除する。また、磁気的な熱ノイズを十分に大きくとることにより測定電子回路のノイズを無視できるようにする。このように非常に感度を上げた状態が実現すると低周波域に非線形マグノイズが現れる。このノイズは GHz 帯にある熱的に励起された磁気共鳴ノイズが MTJ の非線形性のために自己混合作用を受けて低周波に現れるものである。そこでこのノイズを磁気ポテンシャルの対称化により消去する。以上のことにより、大きな素子よりは感度が悪いが磁界感度の理論値に近い性能を持つセンサーを実現する。さらに、この素子を集積化することにより大型の素子を上回る感度が実現できることを示す。

1/f ノイズが除去できなかった場合は計画を変更して 1/f ノイズの発生原因を Vortex ドメインを持つ素子のノイズ測定などを通して行う。

(2) 素子上に磁気ビーズやラジカル分子を付着させることにより二重共鳴の実験を行う。

4. 研究成果

(1) トンネル磁気抵抗素子の提供を連携研究機関である産業技術総合研究所により受けた。素子には FeB フリー層を利用し、その膜厚と MgO 裏打ち層により磁気異方性を制御した。具体的には FeB フリー層の膜厚を 1.7 nm とし、MgO 裏打ち層 1 nm を設けた。素子は、直径 80 nm ~ 400 nm の円形である。まず、基本的磁気特性の評価から垂直磁気異方性磁界が -50 mT 程度に制御されていることを確認した。すなわち、垂直方向に約 50 mT の外部磁界を印加すると磁化はほぼ垂直を向き、外部からの磁界などの外乱に対して大きな応答をすることが期待できる。次に、この状態におけるノイズのスペクトルの解析を行った。上記の状態に素子のサブ GHz 領域におけるノイズは磁気ノイズが支配的となることを確認した。スペクトル測定から磁気共鳴周波数は

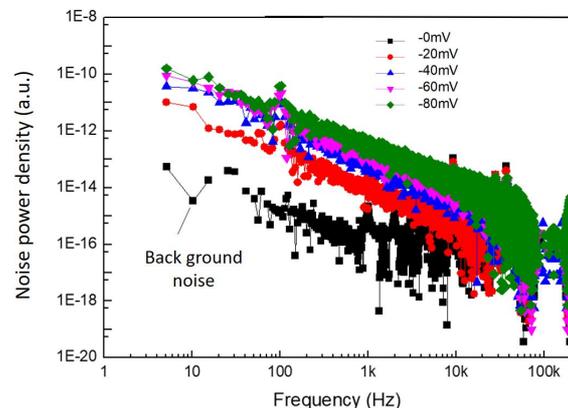


図 1 一様磁化を持つと考えられるトンネル磁気抵抗素子(400 nm)が低周波数域に発生する磁気ノイズ。10 kHz 以下では 1/f ノイズが支配的となった。(10kHz 以上では装置のノイズのため測定不能、)色の違いはバイアス電圧の違いである。

200 MHz から 1.5 GHz 程度の間で外部磁場によって制御可能であった。熱的に励起された強磁性共鳴のピーク強度は例えば 5 nW 程度と非常に大きなものとなった。理論計算との比較の結果、この強度は理想的なマクロスピン状態における磁気的な熱ノイズの強度とよく一致した。このことは磁化が外部の影響を非常に強く受ける理想的な状態が実現していることを示している。次に、外部からの高周波電流の注入に対する応答の評価を行うことにより素子の磁気ダイナミクスの評価を詳細に行った。その結果、電気的な刺激に対しても非常に大きな応答を示すことが確認できた。この応答の解析から (3) に示す付随的な成果を得ることができた。

あらゆる方位にバイアス磁界を印加して磁気共鳴の測定を行ったところ垂直から 10 度程度傾けた角度に外部磁界を印加したときに安定して小さな線幅を示すことを見出した。このときの共鳴の半値幅は 20MHz 程度にまで小さくなった。外部磁界の方向をさらに精密に調整することにより 100MHz 以上の周波数帯にみられる $1/f$ ノイズが消失することをこれまでに見出している。今回は医療などの応用で重要な 100 kHz 以下の低周波ノイズの測定と磁界感度の測定を行った。その結果、316.2Hz において 600nT の磁界感度を得ることに成功した。これは、スケール則によれば 1mm の素子においては数 10pT 程度の磁場感度に相当し、非常に高感度であることが分かる。低周波ノイズの測定から、素子単体でも 100kHz 以下の周波数では $1/f$ 磁気ノイズが存在することがみられた(図 1)。すなわち、100 nm 程度の小さな素子を利用することによって $1/f$ ノイズを除去するというもとの目的が達成されていないことが分かった。そこで、 $1/f$ ノイズの発生原因について詳細に調べることとした。

$1/f$ ノイズは、素子のエッジの揺れなどに由来するといわれている。そこで、信号の測定領域にエッジを含まない Vortex ドメインを持つトンネル接合におけるノイズの測定を行った。その結果、その接合領域にエッジを持たなくても $1/f$ 磁気ノイズが現れることが観測された(図 2)。そこで、Vortex の運動と同等な運動を連続膜上で発生させるためにスキルミオンを含む膜におけるスキルミオンの熱運動の磁気光学顕微鏡による観察を行った。スキルミオンを多数含む膜におけるスキルミオンの熱振動を測定することはドットアレイのノイズを測定することに対応する。その結果、連続膜では離れた位置にあるスキルミオンの熱運動は相関を持たないことが見出された。一方、シミュレーションを行った結果、膜のヘリには磁化の熱振動により磁荷が現れ、長距離におよぶ反磁界が発生することを見出した。この反磁界は熱的に振動するため、スキルミオン全体に揺動磁場が加わる。

以上の結果から Vortex ドメインを持つ素子で観測された $1/f$ ノイズは素子のヘリの磁化の振動により作られた振動磁界に起因することが考えられた。また、トンネル磁気抵抗素子をアレイ上に並べた場合は、素子間に磁気結合があると静磁波のモードが発生し、波長の長いモードがアレイのヘリに出す磁荷がアレイ全体に揺動磁場を与えることにより、アレイ化によってもキャンセルできないノイズが生じるというメカニズムが存在することが示唆された。この問題を解決するには素子を球面上、あるいは円筒上に並べるなどの方法が考えられる。以上の結果は、超高感度磁界センサー開発のために必要となる $1/f$ ノイズの起因の解明に寄与し、今後のノイズ制御に資するものと考えられる。

(2) イットリウム鉄ガーネット(YIG)膜を素子に隣接して二重共鳴の測定を試みた。実験に先立ち、YIG 膜の共鳴周波数の外部磁界依存性とスピントランスファー発振器の発振周波数の外部磁界依存性を個別に測定して二重共鳴が生じる磁界およびその角度を特定した。そのうえで素子上に YIG 膜を接触させて共鳴測定を行った。その結果、スピントランスファー発振器の発振周波数が全体的にシフトするのみで二重共鳴の兆候は見られなかった。周波数のシフトは YIG からの漏れ磁場の影響と考えられる。単一スピンの検出に向けてラジカル分子に関する基礎研究もおこなったが、二重共鳴による検出には至らなかった。磁気ピーズを散布した実験では二重共鳴とみられる発振スペクトルの凹部を観測したが再現しなかった。

(3) ノイズ測定の過程で産業技術総合研究所から提供されたトンネル磁気抵抗素子が大きな電圧効果を示すことを発見した。そこで、電圧依存性について詳細に調べた結果、電圧により素子温度が上昇し磁気異方性が変化していることを見出した。その結果、高周波入力に対して大きな応答を示し、トンネル素子で初めて高周波信号を増幅することに成功した。

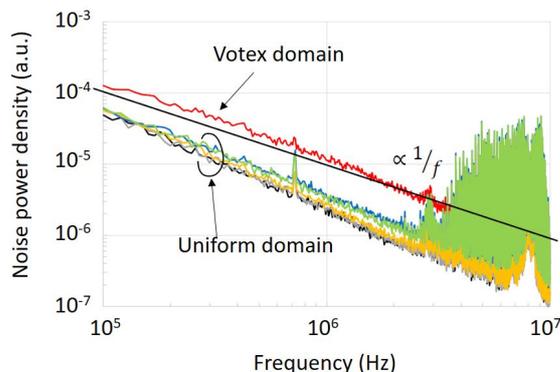


図 2 Vortex 磁区を持つトンネル磁気抵抗素子(直径 475 nm)が発生する磁気ノイズ. 3 MHz 以下で $1/f$ ノイズが支配的となっている. 3MHz 以上の大きなノイズは測定に用いた電源のノイズ.

後藤 穰、若竹陽介、Ugwumsinachi Kalu Oji、三輪真嗣、鈴木義茂、久保田 均、薬師寺啓、福島章雄、湯浅新治、Nikita Strelkov、Bernard Dieny、"ナノ磁性体中の熱を利用したマイクロ波技術"、自動車技術、査読無、73 2019.6, pp96-97

<https://www.jsae.or.jp/kaishi/>

M. Goto, Y. Wakatake, U.K. Oji, S. Miwa, N. Strelkov, B. Dieny, H. Kubota, K. Yakushiji, A. Fukushima, S. Yuasa, and Y. Suzuki, "Microwave amplification in a magnetic tunnel junction induced by heat-to-spin conversion at the nanoscale, Nature Nanotechnology" 査読有, Vol.14, 2019, pp 40-43

DOI:10.1038/s41565-018-0306-9

Y. Jibiki, M. Goto, M. Tsujikawa, P. Risius, S. Hasebe, X. Xu, K. Nawaoka, T. Ohkubo, K. Hono, M. Shirai, S. Miwa, and Y. Suzuki, "Interface resonance in Fe/Pt/MgO multilayer structure with large voltage controlled anisotropy change", Applied Physics Letters, 査読有, Vol.114, 2019, 082405_1-5

DOI:10.1063/1.5082254

〔学会発表〕(計 23 件)

三輪真嗣, "分子/金属界面を用いたスピントロニクスデバイス", 日本物理学会第 74 回年次大会, シンポジウム「有機分子と表面の出会いがもたらす多体相関物性」, 九州大学、福岡市、2019/3/16

R. Okuno, M. Goto, S. Tsunegi, K. Yakushiji, H. Kubota, A. Fukushima, S. Yuasa, H. Nomura, Y. Suzuki, "Radio-frequency magnetic field sensitivity of magnetic vortex in magnetic tunnel junctions", The 66th JSAP Spring Meeting 2019, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, 2019/3/9

S. Miwa, "Electric-field-induced change of perpendicular magnetic anisotropy at metal/dielectric interface", Topological Phases and Functionality of Correlated Electron Systems (TPFC2019), The University of Tokyo, Kashiwa, Chiba, 2019/2/18

Y. Suzuki, "Toward skyrmion Brownian computing", International School on Spintronics and Korea-Japan Spintronics Workshop -Topological Phenomena in Magnetism, Nagoya University, Nagoya, 2019/01/22

Y. Jibiki, M. Goto, T. Srivastava, W. Lim, S. Auffret, C. Baraduc, H. Bea, J. Cho, E. Tamura, Y. Suzuki, "Brownian motion of skyrmion bubbles on wire", 2019 Joint MMM-Intermag Conference, Washington, DC, USA, 2019/01/17

M. Goto, Y. Wakatake, U. Oji, S. Miwa, N. Strelkov, B. Dieny, H. Kubota, K. Yakushiji, A. Fukushima, S. Yuasa, Y. Suzuki, "Negative Resistance and Amplification of Microwave in Heat-driven Magnetic Tunnel Junctions", 2019 Joint MMM-Intermag Conference, Washington, DC, USA, 2019/01/15

三輪真嗣, "スピンドYNAMIXによるレザバコンピューティング", 東北大学電気通信研究所 共同プロジェクト研究会, 東北大学電気通信研究所, 仙台市, 2019/1/15

M. Goto, Y. Wakatake, U. K. Oji, S. Miwa, N. Strelkov, B. Dieny, H. Kubota, K. Yakushiji, A. Fukushima, S. Yuasa, and Y. Suzuki, "Heat driven microwave amplification in magnetic tunnel junction with double MgO layer", CSRN-OSAKA Annual Workshop 2018, Osaka University, Toyonaka, 2018/12/14

三輪真嗣, "スピンドYNAMIXによるレザバコンピューティング", 第 2 回 CSRN-Tokyo Workshop 2018「スピン、ニューロモルフィック・コンピューティング」, 東京大学, 東京, 2018/10/27

S. Miwa, Voltage control of interfacial spin-orbit phenomena, 2018 KPS Fall Meeting Pioneer Symposia "Symposium on Interface Spin-Orbitronics", Changwon Exhibition Convention Center, Changwon, Korea, 2018/10/25

地引勇磨、後藤 穰、Titiksha Srivastava, Willy Lim, Stephane Auffret, Claire Baraduc, Helene Bea, Jaehun Cho, 田村英一、鈴木義茂, "一次元及び二次元におけるスキルミオンのブラウン運動", 磁気記録・情報ストレージ研究会, 大阪大学, 2018/10/18

N. Furuichi, M. Goto, H. Kubota, K. Yakushiji, A. Fukushima, S. Yuasa, N. Strelkov, B. Dieny, S. Miwa, Y. Suzuki, "Evaluation of heat-driven spin-torque in a magnetic tunnel junction through time-resolved measurement", 磁気記録・情報ストレージ研究会, 大阪大学, 2018/10/18

三輪真嗣, "遷移金属及び分子による磁性界面制御", 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会: シンポジウム「スピントロニクス材料研究の新潮流～二次元系を中心に～」, 名古屋国際会議場, 2018/9/19

S. Miwa, "The origin of electric-field-induced change of magnetocrystalline anisotropy in metallic multilayered structures", 23rd International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS 2018), Santa Cruz, CA, USA, 2018/7/23

後藤 穰、若竹陽介、U. K. Oji、三輪真嗣、N. Strelkov、B. Dieny、久保田均、薬師寺啓、福島章雄、湯浅新治、鈴木義茂，“トンネル磁気抵抗素子による高周波の増幅”，「スピントロニクス of 新しい応用」シンポジウム・H29 度総務省（課題 ）成果報告会，産業技術総合研究所臨海副都心センター，東京，2018/05/21

S. Miwa, “Quantum spintronics for application, International Workshop”: Novel Phenomena in Quantum Materials driven by Multipoles and Topology, The University of Tokyo, Kashiwa, Chiba, 2018/04/10

N. Furuichi, M. Goto, E.i Tamura, H. Kubota, K.y Yakushiji, A. Fukushima, S. Yuasa, N. Strelkov, B. Dieny, S. Miwa, Y. Suzuki, “Time resolved measurement of Joule-heating-induced magnetization dynamics in magnetic tunnel junctions”, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会，早稲田大学，東京都，2018/03/17

M. Goto, Y. Wakatake, U. K. Oji, N. Strelkov, B. Dieny, S. Miwa, H. Kubota, K. Yakushiji, A. Fukushima, S. Yuasa, Y. Suzuki, “Simulation of microwave excitation in micro strip line induced by radio-frequency signal amplification using magnetic tunnel junctions”, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会，早稲田大学，東京都，2018/03/17

M. Goto, Y. Wakatake, U. K. Oji, S. Miwa, N. Strelkov, B. Dieny, H. Kubota, K. Yakushiji, A. Fukushima, S. Yuasa, Y. Suzuki, “Heat induced ferromagnetic resonance of FeB thin film sandwiched between MgO thermal insulators”, PASPS-22, Osaka University, Toyonaka, 2017/12/04

古市菜都美、後藤 穰、田村英一、久保田均、薬師寺啓、福島章雄、湯浅新治、三輪真嗣、鈴木義茂，“Spin dynamics with magnetic anisotropy change driven by Joule heating”，PASPS-22, Osaka University, Toyonaka, 2017/12/04

⑲ M. Goto, Y. Wakatake, U.K. Oji, S. Miwa, H. Kubota, K. Yakushiji, A. Fukushima, S. Yuasa and Y. Suzuki, “Radio-Frequency Amplification of Electric Signal Controlled by Joule Heating and Spin Transfer Torque in Magnetic Tunnel Junctions”, MMM2017(62nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials), Pittsburgh, PA, USA, 2017/11/08

⑳ 後藤 穰、若竹陽介、Ugwumsinachi Kalu Oji、三輪真嗣、久保田均、薬師寺啓、福島章雄、湯浅新治、鈴木義茂，“Ferromagnetic resonance controlled by Joule heating in magnetic tunnel junctions”，第 78 回応用物理学会秋季学術講演会，福岡国際会議場，福岡市，2017/09/05

㉑ Y. Wakatake, M. Goto, U. Oji, S. Miwa, H. Kubota, K. Yakushiji, A. Fukushima, S. Yuasa, and Y. Suzuki, “Amplification of microwave by a dc biased magnetic tunnel junction”, Korea-Japan Spin-Orbit Workshop, Kyushu University, Fukuoka, 2016/12/16

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年：

国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://ysuzukilab.html.xdomain.jp/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：三輪 真嗣

ローマ字氏名：Miwa Shinji

所属研究機関名：東京大学

部局名：物性研究所

職名：准教授

研究者番号（8桁）：20609698

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。