

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630162

研究課題名（和文）巨大純スピン流を用いた超高性能多端子スピントルク発振器

研究課題名（英文）Spin Torque Oscillator using giant pure spin current

研究代表者

木村 崇（Kimura, Takashi）

九州大学・理学研究院・教授

研究者番号：80360535

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）：ナノピラー構造を用いた巨大純スピン流の生成技術を確立し、巨大な純スピン流が生成可能であることを実証した。更に、同構造を用いて、純スピン流駆動の磁化反転や自励発振を実証した。更に、ピラー型素子において、スピントルク発振のスピン流依存性、磁場依存性などを系統的に調べ、サイズによる発振周波数の増大を確認した。また、複数ドットの同期型発振にも成功し、発振特性が向上することを実証した。

研究成果の概要（英文）：We have developed a lateral spin valve based on nano-pillar shaped ferromagnetic dots. We demonstrated that a giant pure spin current can be generated by using this device and that the magnetization reversal and steady state precession.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：自励発振 スピン流

## 1. 研究開始当初の背景

ナノ磁性体に磁界を印加した状態で大きなスピントルクを注入すると、磁界によるダンピングトルクとスピントルクによるスピントルクが釣り合い、持続的な磁化の回転運動(自励発振)が誘起される。この発振周波数はGHz帯域であり、直流電流を流すことで高周波電気信号が取り出せるため、ナノサイズのマイクロ波発振器(スピントルク発振器)として注目されている。スピントルク発振器は、『素子構造が単純で、極微細化が可能』『電流や磁界で、発振周波数が変化』『周波数分散が小さく、熱安定性が良好』など、他の発振器にはない魅力的特徴を有している。しかし、これまでのスピントルク発振器は出力が小さく、発振周波数や出力を独立に制御できないため、磁気ヘッドなど限られた用途の応用しか検討されていない。

本研究では、代用者が最近開発したナノピラー構造のスピントルクを用いて巨大純スピントルクを形成し、巨大純スピントルクを用いてスピントルク発振器を実現する。更に、同技術と三端子型のスピントルク発振器へと高度化し、スピントルク発振器の高性能化(高出力な発振、且つ発振周波数の柔軟な制御)を実現する。本素子の開発により、無線通信や無配電給電、マイクロ波センサーなど、幅広い分野における革新的発振デバイスとして、革命をもたらすと期待できる。

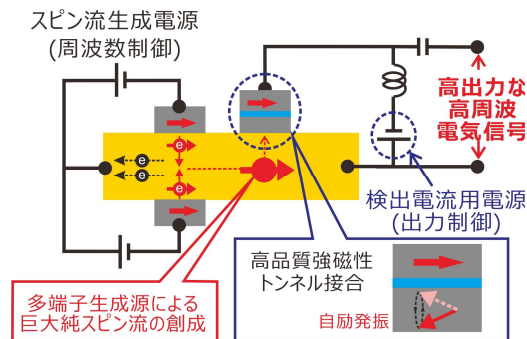


図1 本研究で提案する純スピントルク注入型スピントルク発振素子の概念図

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、巨大磁気抵抗効果を示すスピントルク素子に、研究代表者が有する純スピントルクの高効率制御技術を組み合わせ、多端子型の革新的スピントルク発振器を実現することである。純スピントルクは、理想的発振を妨げる主要因である電流誘導磁界やジュール発熱を排除し、巨大スピントルクの注入を可能にする。更に、励起用スピントルク源と検出用バイアス電流源を独立に制御する革新的デバイス構造により、発振出力の柔軟な制御、及び高出力発振を可能にする。本研究により、極微細化が可能で広範な周波数帯域での利用が期待できるスピントルク発振器の最重要課題『発振周波数と出力の柔軟な制御』と『発振出力の増大』が克服され、無線通信や無配電給電、超高性能・極微マイクロ波セン

サーなど広範な応用が期待できる超高性能チューナブル・スピントルク発振器の実現が期待できる。

## 3. 研究の方法

初年度の実験の一つは、高出力な発振を得るための高品質トンネル接合膜作製技術の確立である。既に、代表者のグループでは、既存の超高真空スパッタ装置により、極めて結晶性の高い強磁性トンネル接合の作製技術を有しており、本シーズ技術を用いて、数nmのフリー層を有する高品質強磁性トンネル接合素子の作製技術を確立する。

上記の実験と並行して初年度は、ナノピラー型巨大純スピントルク生成デバイスの作製プロセスの改良を行う。本構造を作製する上での最も困難なプロセスは、絶縁膜中のコンタクトホール形成であり、現在では指向性の高い電子ビーム蒸着法により、絶縁層をレジスト上に堆積・リフトオフすることでコンタクトホールを形成している。しかし、基板との密着性が悪く、絶縁特性が優れていないため、デバイス作製の歩留まり低下や高周波特性の悪化をもたらしていた。絶縁特性は膜をスパッタ成膜することで解決できるが、コンタクトホールの形成が難しくなる。そこで、本研究では、小型の高圧ジェット噴射器を導入し、スパッタ膜堆積後も歩留まり良くコンタクトホールが作製できるプロセスを確立する。これにより、SiO<sub>2</sub>の絶縁特性も改善され、高周波発振時の伝搬損失が低減される。

次年度以降は、スピントルク発振器の特性評価と性能向上に注力する。基本発振特性の評価実験が完了した後は、歳差運動の傾斜角増大による高出力発振の実験を行う。傾斜角は注入スピントルクの増大と共に大きくなることが知られており、純スピントルクを用いて従来型では不可能であった巨大スピントルクの注入を行うことで、傾斜角の極めて大きな歳差運動の励起が可能となる。ここで、単純にスピントルクを増大して、傾斜角を大きくした場合、歳差運動の軌道が歪むため、出力が低下することが理論的考察から予測されている。我々は、ごく最近、磁界方向から傾いた偏極方向を有するスピントルクを注入することで、この歳差運動の歪を回避できることを理論的に示している。そこで、後半では、方向制御された巨大純スピントルクの注入技術を確立し、上記予測に基づいた発振特性の高出力化を目指す。スピントルクの偏極方向制御に関しては、既に代表者が、偏極方向が直交した2つの生成源を用いることで、電氣的に制御可能であることを示しており、自在に方向制御された巨大スピントルクの注入が可能である。ここでは、巨大スピントルク注入下の発振出力の偏極方向依存性を詳細に調べ、高出力発振実現のための最適スピントルク注入条件を探索する。

最後に、長距離通信、大電力配電、特にCyber Physical Systemにおける万能なマイクロ波センサーなど広範な応用を踏まえ、同

期発振や強磁性トンネル接合の高品質化などを行い、超高性能な多端子スピントルク発振器の実証を目指す。

#### 4. 研究成果

従来の純スピンド素子の作製プロセスでは、主にポジレジストとリフトオフ法を用いて、強磁性体、非磁性体パターンを作製してきた。また、強磁性体/非磁性体界面においてはイオンミリングを用いて表面クリーニングを行い、ミリング時間などの条件を最適化することで清浄な界面を形成してきた。従来のポジレジストを用いた手法では微細なパターンを精度よく作製できるなどの利点があったが、同時に、コンタミネーションによる材料品質の低下や、レジストの熱耐性から蒸着できる材料に限りがあることが懸念されていた。また、磁性体細線の発熱に伴い生成できるスピンド流に制限が大きな制限が生じていた。そこで従来型と異なるナノピラー構造を用いて、巨大スピンド流を生成した。ナノピラー型素子の電子顕微鏡写真と得られたスピンド信号特性を図2に示す。ナノピラー素子の強磁性/非磁性界面は、連続成膜で作成されるため、理想的な界面を持つ。しかしながら、上部電極作製時における素子作製の歩留まりが悪いため、ここでは、ジェット噴射を用いてコンタクトホールを作製した。その結果、素子作製の歩留まりが著しく向上した。

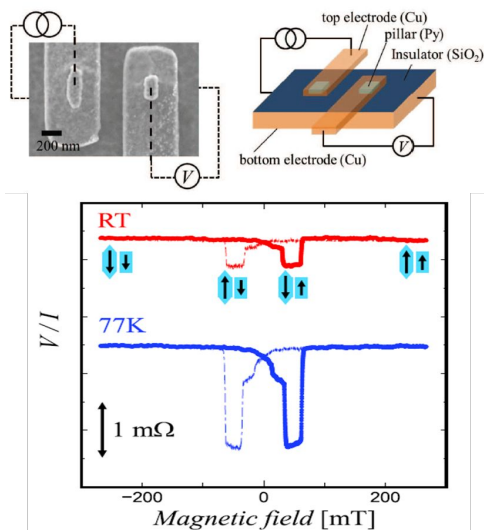


図2. ナノピラー型横型スピンドバルブとそのスピンド伝導特性

ここで、新プロセスによる素子のダメージを評価するべく、スピンド信号の評価を行った。図2に見られるように、室温、及び液体窒素を用いた77Kにおいて、明瞭なスピンド信号が観測されている。スピンド信号の大きさは、Py/Cu界面の接合面積が小さければ小さいほど、注入したスピンド流を注入源自身が緩和する現象(スピンド再吸収)の効果が小さく、スピンド生成効率は大きくなる。ピラー構造で

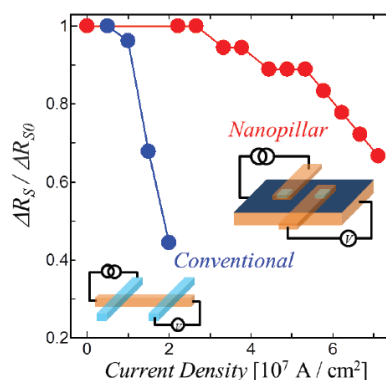


図3. ナノピラー型構造の耐電流特性

は、接合面積がかなり大きい。それにも関わらずスピンド信号の大きさは従来型と同等程度に大きい結果となった。これは、bottom electrodeが十分大きいため、実効的なスピンド抵抗が小さくなり、スピンド注入効率が向上したためであると考えられる。

ナノピラー型構造のスピンド伝導特性についてさらに詳しく検証するため、スピンド信号の温度依存性について調査した。その結果、低温になるほどスピンド信号が増大し、50K付近で信号の大きさが一定になった。この結果は、50Kまでの領域においては、フォノンによる発熱に起因するスピンド散乱の影響が小さくなったため、スピンド信号が増大し、50K以下の領域においては、フォノンの影響が飽和したため、スピンド信号が一定となったと考えられる。また、従来の細線構造におけるスピンド信号の温度依存性では、低温領域において増大したスピンド信号が再び減少する傾向がみられる。これは、電子の平均自由行程が長くなり、電子が酸化したCu表面に衝突した際にスピンドが散乱されることに起因していると考えられている。しかし、ピラー構造では、低温領域でもスピンド信号が減少しない結果となった。このことはCuの表面がSiO<sub>2</sub>が覆われて、酸化が防止されたためであり、ピラー構造の大きな利点と考えられる。

ピラー構造のもう一つ利点は、十分大きなbottom electrodeで、その熱容量の増大からヒートシンクとして機能し、放熱効果が増大することが期待される。そのため、ジュール熱によるスピンド散乱の減少や、臨界電流の増大により巨大な純スピンド流の生成が可能であることが考えられる。そこでナノピラー構造における許容電流について調査を行った。その結果、従来構造が $2 \times 10^7$  A/cm<sup>2</sup>でスピンド信号が約40%に減少するのに対し、ピラー構造では、 $7 \times 10^7$  A/cm<sup>2</sup>の電流に対しても、60%以上のスピンド信号を維持する結果となった。これは、ピラー構造が大電流にも耐えられ、巨大な純スピンド流を生成できることを示し、十分大きなbottom electrodeがヒートシンクとして有効に機能していることを示唆する。また、大電流を許容することにより、スピンド注入磁化反転や自励発振も誘起できると期待される。そこで、次に直流



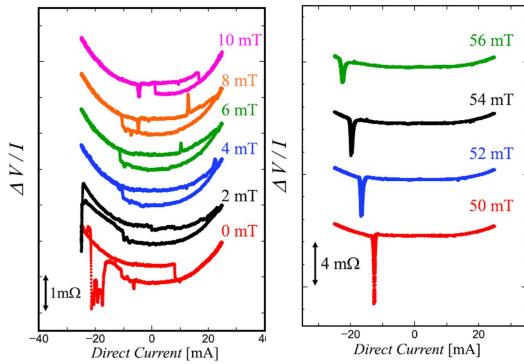


図4 . 純スピン流注入磁化反転、及び自励発振

電流をスイープさせた際の非局所電圧の測定を行った。その結果を図4に示す。図に見られるように、純スピン流注入による磁化反転と自励発振と思われる微分抵抗の急峻な変化を観測に成功した。

多層膜 CoFe/Cu/NiFe および NiFe/Cu/NiFe においては、NiFe/Cu/NiFe の方だけは磁気渦発振が見られている。CoFe の磁気異方性が大きいので、安定な磁気渦構造になるのは難しいと考えられる。固定層が NiFe であった方は磁気異方性が小さく、形状異方性も小さいので、ドット直下の部分の固定層が磁気渦構造になる。それに加えて、フリー層も磁気渦構造であり、自励発振現象が現れると考えられる。

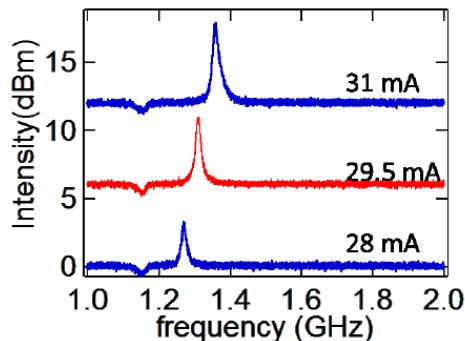


図5 . 磁性ドットにおける自励発振スペクトル

図5に電流を固定層からフリー層に流し、面内方向に400eの磁界を印加するときの発振スペクトルを示す。図に示すように、発振周波数1GHzで、出力が5dBmであり、半値幅が13MHzである特徴を示している。また、電流の増大に伴い、発振周波数増大する傾向が見られる。出力は大きくなってから、減少する。それは、最初に磁気渦構造において、一部のスピンの発振になり、電流の増大に伴い、発振する領域増大していくと考えられる。さらに電流により磁界が発生するため、外部磁界が非常に大きくなるのにもとない、ダンピングトルクが大きくなり、磁化を外部磁界の方向に揃える。その結果は、直流電流を非常に大きく流したら、安定な磁気渦構造に保

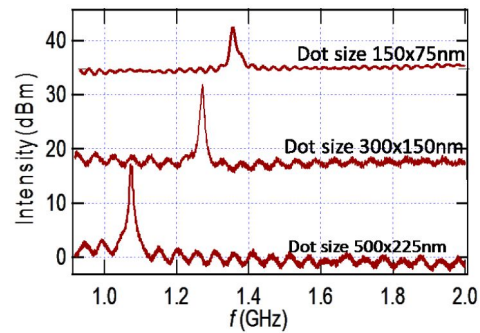


図6 . さまざまなドットサイズにおける発振スペクトル。

持することになる。それに対して、磁気渦においての自励発振に外部磁界を印加する場合、発振周波数は外部磁界の増大に伴い、減少した。これは外部磁界により、磁気渦のコアが素子の端に移動し、磁気渦構造の領域が小さくなったためと考えられる。

磁気渦発振が観測したが、自励発振の中で重要な要素、発振周波数、分散および出力はどのような手法で制御するかはまだ不明である。ここで、我々はそのドットのサイズに注目した。ドットが大きくなり、磁化の均一性や、発振するための電流が違っていると予測し、ドットサイズを変えて、観測を行った。その結果は図6に示している。出力が一番大きい場合、ドットサイズに従い、素子を発振させるために必要な電流も大きくなった。電流が大きいほど、周りにできた誘導磁界が大きくなるため、スピンの歳差運動が激しくなり、周波数が大きくなったと考えられる。

図6のように、ドットサイズの増大とともに、発振周波数が増大しており、面積が大きいほど、自励発振の周波数が小さくなっている。これは、ドット中で発振している一部のスピンの発振しなかったスピンと交換相互作用し、発振周波数が下がると予測できる。従って、素子サイズにより、同じ直流電流を流しても、発振周波数が異なっている。それに、素子サイズが大きいほど、流れられる電流の上限も大きいので、観測される発振周波数の領域が大きくなる。よって、磁気渦構造においての自励発振の場合、素子サイズを変ることにより、発振周波数を制御することが可能となる。

素子サイズが十分小さく、さらに外部磁界を印加することにより、単磁区構造になっていることが考えられる。その素子を用いて、単磁区構造においての自励発振現象を観測することが可能である。電子をフリー層から固定層に流すと、固定層と逆向きのスピンをもつ電子がフリー層まで反射され、フリー層の磁化の動きが、ある程度の電流を流した後ダンピングトルクとスピントランスファトルクが相殺し、自励発振が生じる。この素子を用いて、自励発振の電流依存性および磁界依存性を測定した。図7に示すように電流が流

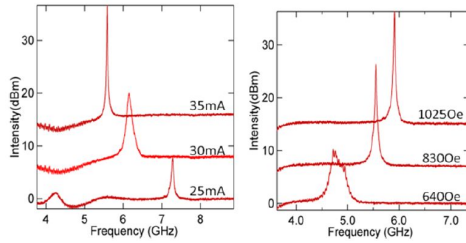


図7．磁性ナノドットにおける自励発振スペクトルの電流・磁場依存性

していくとともに、発振周波数が下がっていくことが分かった。これは、電流により有効磁界が弱くなり、ダンピングトルクとスピントルクが相殺し、周波数が小さくなったと考えられる。また、電流を一定にし、外部磁界を変化させると、図7のようになり、外部磁界の増大に伴い、発振する周波数が大きくなること分かった。その結果より、この発振の周波数が電流の増大により大きくなり、磁界の増大により小さくなる傾向が示す。それ磁化の運動が In-plane mode の自励発振現象の傾向を示す。

次に、図8に示すように、サイズ100x75nmのドットを200nmの間隔で並列に設置した素子を作製した。ここでは、上部電極で両ドットに被せるように形成すした。外部磁界が6800e、電流が25mAのとき、図のようなスペクトルが観測された。本素子では、より小さい電流で、12.5GHzの自励発振を誘起した。更に半値幅が11MHzまで下がったと分かった。これは、ピラー間の磁気双極子相互作用が働くことで、ドットが同時に発振し、その相互作用により、それぞれのスピン回転の位相が強制的にロックされたと考えられる。

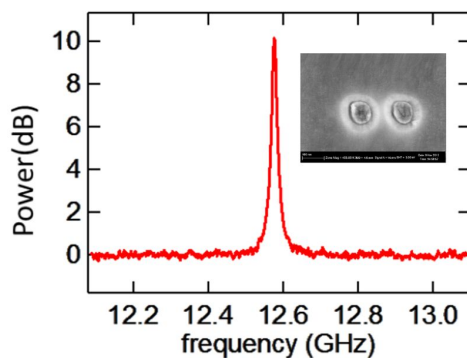


図8．磁性ナノドットペアにおける同期型自励発振

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)

1. T. Nomura, K. Ohnishi, and T. Kimura: "Large spin current injection in nano-

pillar-based lateral spin valve." AIP Conf. Proc. 1763, 020011 (2016).

2. X. Cui, S. Yakata, and T. Kimura: "Directional dependence of vortex core resonance in a square-shaped ferromagnetic dot." Physica E 75, 28-32 (2016).
3. X. Cui, S. Yakata, and T. Kimura: "Detection of vortex core oscillation using 2nd harmonic voltage detection technique." IEEE Trans. Magn. 15, 0018-9464 (2015).
4. A. Pfeiffer, S. Hu, R. M. Reeve, A. Kronenberg, M. Jourdan, T. Kimura, and M. Klau: "Spin currents injected electrically and thermally from high spin polarized Co<sub>2</sub>MnSi." Appl. Phys. Lett. 107, 82401 (2015).
5. S. Hu, H. Itoh, and T. Kimura: "Efficient thermal spin injection using CoFeAl nanowire." NPG Asia Mater. 6, e127 (2014).
6. Y. Kanda, T. Nomura, T. Kimura, and M. Hara: "Geometrical optimization of a local ballistic magnetic sensor." Appl. Phys. Lett. 104, 142408 (2014).

[学会発表](計7件)

1. T. Kimura, Efficient thermal spin injection based on metallic hybrid nanostructures, SPINTRONICS AND CORE TO CORE WORKSHOP (Invited) 2017-3-21
2. 木村崇、強磁性/非磁性複合ナノ構木村崇造における高効率熱スピン注入とその応用、光機能性デバイス・材料専門研究会(依頼講演)2017年01月20日
3. T. Kimura, Efficient spin injection in metallic hybrid structure, EMN magnetic materials (Invited), USA, 2016-03-21 – 2016-03-24
4. T. Kimura, Large spin-dependent thermoelectric effects using CoFe-based alloy, International Conference and Exhibition on Mesoscopic & Condensed Matter (Invited) Physics, 2015-06-22 – 2015-06-24
5. 木村崇 横型スピバルブ素子における熱流の影響と熱流を用いた高効率スピン流生成日本磁気学会 2015-03-18 (依頼講演)
6. 木村崇 強磁性-常磁性 複合ナノ構造におけるスピン流の電氣的、及び熱的制御 応用物理学会スピントロニクス分科会、2014-11-25 (依頼講演)
7. T. Kimura, Highly efficient thermal spin injection using CoFeAl injector (Invited), Nano S&T 2014-10-29 – 2014-10-31

[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

<http://ssp.phys.kyushu-u.ac.jp/>

6。研究組織

(1)研究代表者

木村 崇（Takashi Kimura）

九州大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：80360535

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

該当なし