

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：37112

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760014

研究課題名(和文) 積層結合型磁気渦を用いたスピントルク発振素子の高性能化

研究課題名(英文) Improvement of spin-torque oscillator with magnetic vortex and inter-layer coupling

研究代表者

家形 論 (YAKATA, Satoshi)

福岡工業大学・工学部・助教

研究者番号：00585929

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：大幅な低消費電力化を実現する高周波発振器として磁気を用いたスピントルク発振器が注目されている。スピントルク発振器は非常に小さく、高い周波数を発振できる一方、熱安定性の向上が実用化へ向けての一つの課題となっている。本研究では温度変化に対しても安定して動作する発振器実現のため、磁気の特異な構造である磁気渦構造および層間交換結合を採用することを提案し、熱安定性の向上を示した。また、これまでにない簡便な方法で温度に対する安定性を評価する、新しい手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：Spin torque oscillator is one of the candidates for next generation oscillator with low power consumption and high frequency, over GHz. One of the practical problem is thermal stability because spin torque oscillator is small. Our purpose is to improve thermal stability of spin torque oscillator with magnetic vortex and exchange coupled ferromagnetic layer. At first, we developed novel method to evaluate thermal stability of magnetic vortex in ferromagnetic layer. This method allowed us to map the potential for magnetic vortex in ferromagnetic dot. We also succeeded to fabricate spin torque oscillator with magnetic vortex. It showed higher Q-value compared with that of conventional spin torque oscillator due to its higher thermal stability. Using these technique, we could evaluate spin torque oscillator with exchange coupled ferromagnetic layers.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎

キーワード：スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

ナノエレクトロニクスデバイスに対する高集積化・低消費電力化の要求は年々増加しており、特に近年においては環境問題、エネルギー問題の観点から、更なる高性能化だけでなく、より低い消費電力で動作するデバイス開発が要求されている。スピントロニクスデバイスの一つであるスピントルクオシレータは低消費電力で小型、かつ GHz 超の高い周波数で発振を実現するため、近年注目を集めている。スピントルクオシレータ実現に向けた課題は熱擾乱耐性の向上および Q 値の増大である。熱擾乱耐性は体積および消費電力とトレードオフにあるため、現在、材料開発以外に決定的な解決策は提案されていない。また、同期現象を用いた Q 値の増大が提案されているが、技術的な困難さ、および複数の磁気渦を並列に使用するため小型化を妨げる、などの問題がある。

スピノシレータは非常に単純な構造であるため、微細化、薄膜化が容易であり、かつ低消費電力という特徴を有する。また強磁性金属の磁化の運動を発振メカニズムに用いているため、磁界による発振周波数の制御を実現する。これらの優れた特徴を有するスピノシレータであるが、微細化による熱安定性の低下および隣接する素子との相互作用が問題となっている。すなわち、熱安定性の低下に伴って S/N 比および Q 値は減少し、隣接する素子との相互作用は発振出力の低下や発振特性の悪化を招く。これらの問題を克服するには隣接する素子との相互作用が少なく、かつ高い熱安定性を有する発振素子を実現することが要求される。

2. 研究の目的

本研究ではこれまで用いられてきた強磁性・非磁性・強磁性発振素子に磁気渦構造および申請者が有する層間交換結合技術を応用することで(図1)、最高レベルの熱安定性および高性能なマイクロ波発振特性を有する微小スピノシレータ素子を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

(1)スピントルクダイオード測定用磁気渦コア評価素子の作製および測定

DC マグネトロンスパッタリング法を用いて Si

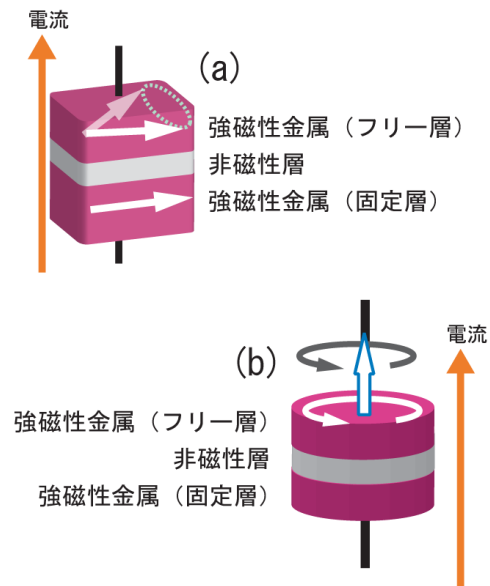


図1 (a)通常のスピントルク発振素子 (b)磁気渦型発振素子

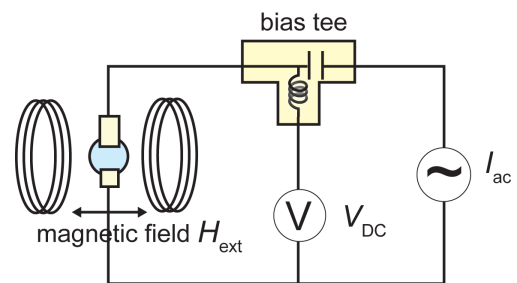


図2 スピントルクダイオード測定系

基板上に膜厚 60nm の Py を成膜し、EB リソグラフィを用いて円形に加工。円面内に電流が流れるように Cu 電極をリフトオフ法により取り付け付けた(図1)。直径は 1~5 μm。磁気渦が形成されていることを磁気力間顕微鏡(MFM)で確認した。円面内に磁界を印加し、同時に AM 変調された高周波電流を流し、変調成分をロックインアンプにて検出する。高周波電流が磁気渦の共鳴周波数に一致するとき、磁気渦は大きく変化し、異方性磁気抵抗効果により、大きな変調シグナルが観測される。得られる信号を解析することにより、磁気渦のダイナミクスを間接的に観測することができる。

磁気渦コアの駆動はこれまでスピントルクによるものであったとされてきたが、研究代表者はスピントルクダイオードの一連の研究から、磁

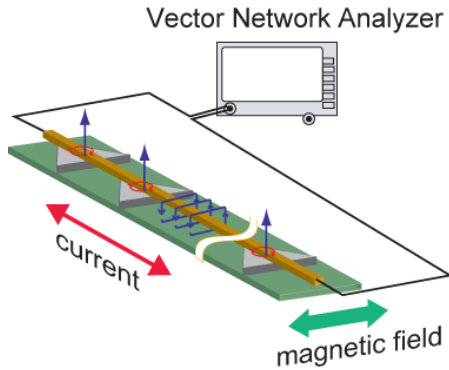


図3 ネットワーク・アナライザを用いた磁気渦ダイナミクス測定系

気渦コアの駆動はスピントルクではなく、電流から生じる磁界に起因していることを明らかにした。今回の研究提案と異なるため、ここではその内容を割愛する。また磁気渦のダイナミクスを検出する感度は次に示す(2)ネットワーク・アナライザを用いたダイナミクス測定手法が優れているため、本研究では(2)を磁気渦ダイナミクス測定手法として採用している。

(2) ネットワーク・アナライザを用いた磁気渦ダイナミクス評価用素子の作製および測定

DC マグネトロンスパッタリング法を用いて Si 基板上に膜厚 40nm の Py を成膜し、EB リソグラフィを用いて 1 列に並んだ複数の円形または三角形に加工した。これらの中心真上に Cu 電極 1 本を配置しその両端をネットワーク・アナライザの GND、信号ラインに接続した(図2)。円盤のサイズは直径 $2\ \mu\text{m}$ 、三角形は直径 $2\ \mu\text{m}$ の円に内接するよう設計した。面内に外部磁界を印加し、ネットワーク・アナライザの S11 シグナルを測定する。シグナルに現れる磁気渦のコア励起に起因する吸収スペクトルを解析することにより、磁気渦のダイナミクスに関する情報を得ることができる。

(3) マイクロ波発振素子の試作

DC マグネトロンスパッタリング法を用いて磁性金属(固定層)/非磁性/磁性金属(フリー層)多層膜を Si 基板上に成膜した。成膜ガスは Ar、真空到達度は $\sim 10^{-5}$ Pa、成膜時ガス圧は ~ 0.1 Pa。磁性金属(固定層)には Py または CoFe を用い、磁性金属(固定層)には軟磁性の Py を用いた。非磁性金属には Cu を用

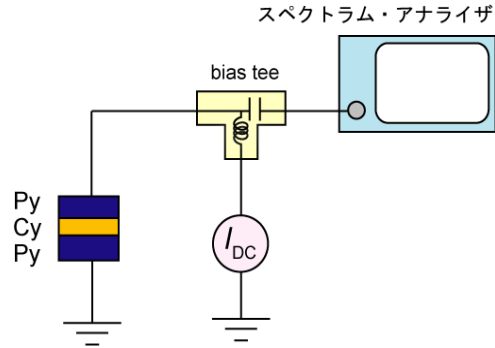


図4 発振スペクトル測定系

いた。フォトリソグラフィおよび EB リソグラフィを用いてフリー層を 1 ミクロン以下のサイズに加工し、フリー層上部、および固定層に電極を配置することで発振素子を作成した。作製した多層膜の膜面内に磁界を印加し、さらに膜面直方向にバイアス電流を流すことでスピンの励起および発振を実現する。発振信号はバイアスティーを用いることで直流入力電流から分離して取り出され、スペクトルアナライザへ入力される(図4)。

4. 研究成果

(1) 磁気渦コアダイナミクスの測定および熱安定性の評価手法の確立

(図5)にネットワーク・アナライザによって得られた S11 シグナルの外部磁界依存性を示す。円形の場合、外部磁界に対して大きな依存性はないが、三角形の場合には、外部磁界に対して共鳴周波数が大きく変化した。

磁気渦の中心、磁気渦コア、は外部磁界に対して垂直方向に移動する。すなわち共鳴周波数の外部磁界依存性は、共鳴周波数の磁気渦コアの位置依存性を意味する。

また共鳴周波数は磁気渦コアを素子中心に戻そうとする求心力に依存して変化するため、磁気渦コアを取り巻くポテンシャル形状が共鳴周波数を決定する。すなわち、外部磁界によって共鳴周波数が変化するのは磁気渦コアの位置が変わることにより、磁気渦コアのまわりのポテンシャルが変化していることを示す。円形素子の場合、磁界の正負に対して共鳴周波数が対称であるのは円の等方性を反映しているためである。一方、磁気渦コアが三角形の頂点に移動する場合、磁気渦コアからして

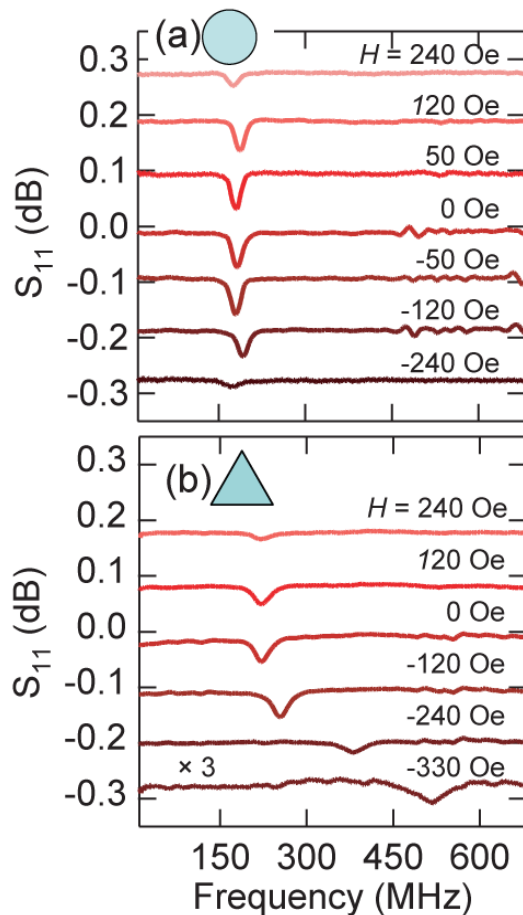


図5 (a)円形および(b)三角形素子の S_{11} シグナルの外部磁界依存性

みれば小さな三角形の中に閉じ込められたのと似たような状況であるため、磁気渦コアがうける求心力は増大する。結果として共鳴周波数の急激な増大が観測される。三角形の底辺側に移動した場合には共鳴周波数の増大が見られないことから、三角形頂点でのポテンシャルエネルギーの増大が共鳴周波数の増大を引き起こすことを示している。

磁気渦コアの熱安定性はポテンシャル形状に大きく影響される。すなわち、ポテンシャルが急峻な谷のような形状をしている場合熱安定性は高くなる。本手法は素子内でのポテンシャル形状をマッピングすることを可能にする。すなわち、磁気渦コアを磁界によって任意の位置に移動させ、共鳴周波数を観測することで、その点でのポテンシャルの傾きを知ることができるため、これらを繰り返すことで素子内でのポテンシャル形状を知ることが可能となる。本手法は磁気渦素子の材料だけでなく、形状

によって変化する熱安定性を評価できる、これまでにない唯一の新しい手法である。

(2) マイクロ波発振素子の試作

Py(50)Cu(10)/Py(5)発振素子

Py(50)Cu(10)/Py(5)磁気渦発振素子を作製し、マイクロ波発振を実現する。(図6)に作製した Py(50)Cu(10)/Py(5) (nm)発振素子の発振スペクトルを示す。素子のサイズは 500×225 nm、発振周波数はおよそ 3 GHz、スペクトル線幅はおよそ 3 MHz、外部磁界は膜面内方向に 39 Oe 印加。(図7)に発振周波数のバイアス電流依存性を示す。発振周波数は電流バイアスの増大するに従って増大し、電流 110 ~ 150 mA に対して 2 ~ 3 GHz と変化した。磁気渦発振出ない場合、発振周波数は一般に磁気共鳴周波数に近い値を示す。Py の場合の共鳴周波数は面内磁界 60 Oe でおよそ 2.3 GHz であり、今回得られた発振周波数と良く一致する。そのため、今回得られた発振スペクトルが磁気渦発振でなく、一般的な in-plane モードによる発振であること可能性も考えられる。そこで面内磁界を変化させ、発振周波数がどのように変化するかを観測した。

(図8)に発振周波数の磁界依存性を示す。発振周波数は磁界が大きくなるに従って減少し、磁界 20 ~ 80 Oe に対し、2.8 ~ 2 GHz と変化した。先の議論同様、発振周波数が共鳴周波数と近い値を示すのであれば、発振周波数も共鳴周波数同様、磁界が大きくなるに従って、高い発振周波数を示す。しかしながら、今回得られた結果は逆に、磁界が大きくなるに従って、発振周波数が減少する傾向が得られた。以上の結果は Py(50)Cu(5)/Py(5) 発振素子が in-plane モードによる発振ではないこと、out-of-plane モード、または磁気渦による発振であることを示している。

out-of-plane モードはフリー層の磁気モーメントが面内の軸ではなく、膜面から面直方向に傾いた軸を中心に歳差運動する状態である。また in-plane モードに比べて大きなバイアス電流が必要である。

以上の結果だけでは out-of-plane モードによる発振か磁気渦の発振かを区別することはできない。そこで次に固定層を Py から保磁力の大きな CoFe に変更し、スピルルク素子の作製、評価を行った。

CoFe(40)Cu(10)/Py(5)発振素子

(図9)に CoFe (40)Cu(10)/Py(5) (nm)発振素子の発振スペクトルを示す。素子サイズは 150×75 nm、発振周波数はおよそ 4 GHz、スペクトル線幅はおよそ 80MHz、外部磁界は膜面内方向に 20 Oe 印加。Py(50)Cu(10)/Py(5)の場合と比較して、バイアス電流は 1.3mA 程度と非常に小さな値となり(図10)、スペクトル線幅も 3MHz から 80MHz と増大した。素子サイズが異なるため、サイズ

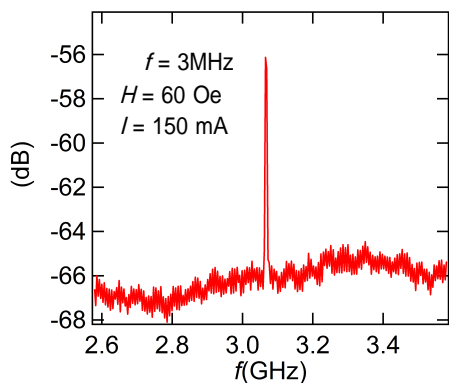


図6 Py/Cu/Py 素子の発振スペクトル

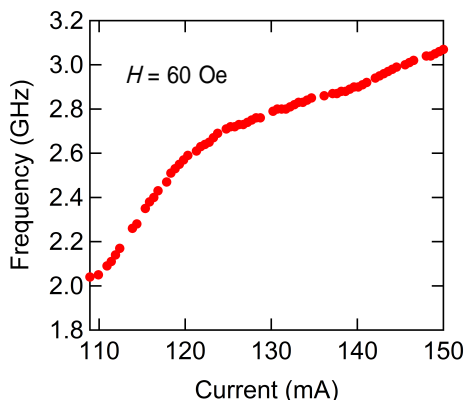


図7 共鳴周波数のバイアス電流依存性

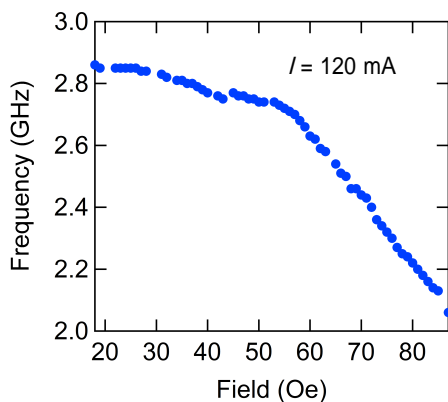


図8 共鳴周波数の外部磁界依存性

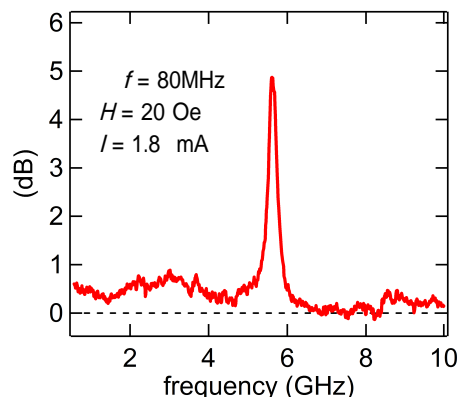


図9 CoFe/Cu/Py 素子の発振スペクトル

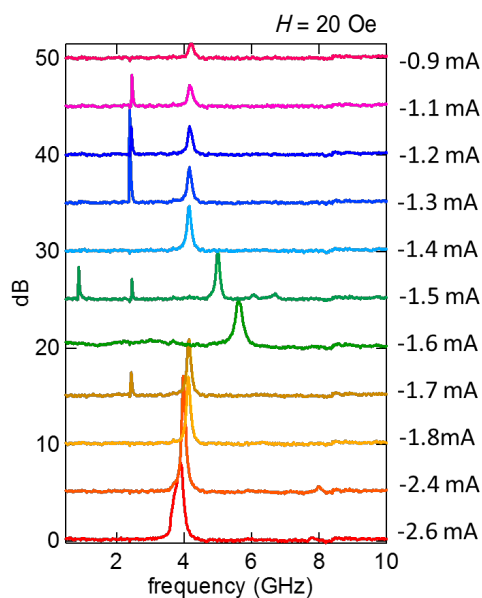


図10 CoFe/Cu/Py 素子の発振スペクトルバイアス電流依存性

に起因した影響を考慮する必要がある。例えば発振に必要な電流が減少した理由は素子サイズが小さくなることにより、小さな電流でも十分な電流密度が得られることで説明されうる。しかしながら磁気渦形成には電流密度ではなく、電流が必要であることから CoFe (40)Cu(10)/Py(5) の発振は磁気渦に起因するものではなく、フリー層のPyが歳差運動することにより得られる発振であると考えられる。

もし、先の Py(50)Cu(10)/Py(5) (nm)の発振がフリー層 Py(5)の発振による out-of-plane モードであるならば、固定層だけ異なる CoFe (40)Cu(10)/Py(5) 素子においてもフリー層 Py(5)が発振する out-of-plane モードが観測されるはずであり、その電流は、素子サイズが小

さい分 Py(50)Cu(10)/Py(5)のものよりずっと小さくなるはずである。しかし本実験ではバイアス電流を大きくしても発振を観測することはなかった。そのため、先の Py(50)Cu(10)/Py(5)の発振が out-of-plane モードではなく、磁気渦によるマイクロ波発振であると考えられる。

本研究は磁気渦の高い熱安定性に注目し、層間交換結合と組み合わせることでより大きな熱安定性を実現することを目的として行った。そのために、素子材料だけでなく、素子形状も含めた熱安定性を評価する手法を確立した。さらに磁気渦素子の発振を実現し、そのスペクトルは大きな熱安定性に起因して、従来のスピントルク発振に比べて大きなQ値を有することを示した。

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)

S. Yakata, T. Tanaka, K. Kiseki, K. Matsuyama and T. Kimura, "Wide range tuning of resonant frequency for a vortex core in a regular triangle magnet.", Scientific Reports **3**, 3567 (2013). 、査読有、DOI:10.1038/srep03567

K. Kiseki, S. Yakata and T. Kimura, Efficient excitation and detection of standing spin wave in Permalloy film -Demonstration of spin wave resonator-, Appl. Phys. Lett, 101, 212404 (2012)、査読有、DOI:10.1063/1.4766918

S. Hu, K. Kiseki, S. Yakata and T. Kimura, Ferromagnetic resonance in exchange-coupled NiFe/FeMn films and its control, IEEE Trans. on Magn.48, 2889-2981 (2012) 、査読有、DOI:10.1109/TMAG.2012.2201925

K. Nakada, S. Yakata and T. Kimura, Noise-induced Transition of Mutual Phase Synchronization in Coupled Spin Torque Nano Oscillators, IEEE Trans. on Magn. 48, 4558-4561 (2012) 、査読有、DOI:10.1109/TMAG.2012.2201145

K. Nakada, S. Yakata and T. Kimura, Noise-induced synchronization in spin torque nano oscillators, J. Appl. Phys. 111, 07C920-3 (2012) 、査読有、DOI:10.1063/1.3680537

M. Miyata, K. Kiseki, S. Yakata, H. Wada, and T. Kimura, Formations of magnetic vortices in a chain array of triangle Py dots and an isosceles triangle Py dott, J. Appl. Phys. 111, 07B902 (2012) 、査読有、DOI:10.1063/1.3673349

(学会発表) (計2件)

Xiaomin Cui, Kohei Kiseki, Satoshi Yakata, Takashi Kimura, "Resonant vortex core oscillation detected by using anisotropic magnetoresistance", 日本物理学会 第 68 回年次大会 2013.3.26 広島大学(広島県)

山野井一人, 家形諭, 木村崇, 眞砂卓史, "Py 中におけるスピン波伝搬の距離依存性", 日本物理学会 第 68 回年次大会 2013.3.26 広島大学(広島県)

(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

家形 諭(YAKATA, Satoshi)

福岡工業大学・工学部電子情報工学科・助教

研究者番号:00585929

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし