

平成 2 7 年 6 月 8 日現在

機関番号： 8 2 6 2 6

研究種目： 若手研究(B)

研究期間： 2013 ~ 2014

課題番号： 2 5 7 9 0 0 4 5

研究課題名 (和文) 電流により誘起される磁界作用トルクを用いた磁気高周波検波素子の高感度化

研究課題名 (英文) Enhancement of sensitivity in high-frequency radio-wave magnetic detectors by using current-induced torque acting as magnetic field

研究代表者

松本 利映 (Matsumoto, Rie)

独立行政法人産業技術総合研究所・スピントロニクス研究センター・研究員

研究者番号： 1 0 6 3 5 3 0 3

交付決定額 (研究期間全体) : (直接経費) 3,400,000 円

研究成果の概要 (和文) : MgO-磁気トンネル素子のスピントルクダイオード(STD)効果測定とマイクロマグネティック・シミュレーションを踏まえ、自由層と参照層の磁化の逆位相振動を利用することで高周波数・ゼロdcバイアスで検波感度を向上させる方法を提案した。続いて逆位相振動に必要な条件を調べるために、参照層の磁化ダイナミクスによるSTD特性を表す解析式を導いた。解析式から、自由層とのスピントルクを介した相互作用よりも固定層とのそれが大きい方が、逆位相振動に有利であるという知見が得られた。同時に解析式でダイオード・スペクトルを解析することで参照層に働くスピントルクを介した相互作用の大きさを定量的に評価することを可能とした。

研究成果の概要 (英文) : We proposed a method to enhance spin-torque diode (STD) sensitivity by using an antiphase dynamic coupling (ADC) of the free and reference layers. The ADC was found in STD measurements of MgO-based magnetic tunnel junctions and also in micromagnetic simulations. In order to investigate the optimal conditions for the ADC, we developed an analytical expression for the STD effect caused by the magnetization dynamics in the reference layers. From the analytical expressions, we found that inducing interaction between the reference and magnetic-pinned layers through the spin torque is more advantageous to the ADC than inducing interaction between the reference and free layers. The analytical expression also made it possible to evaluate quantitatively the spin-torque interactions working on the reference layer.

研究分野： スピントロニクス

キーワード： スピントロニクス スピントルク ダイオード 磁気共鳴

1. 研究開始当初の背景

1988年に磁性金属多層膜(厚さ nm オーダーの強磁性と非磁性の金属層を交互に積層した構造)の巨大磁気抵抗(GMR)効果が発見され、電子の持つ電荷と電子スピンの両方を活用して新機能を創出する新しい分野「スピントロニクス」が出現し発展を続けている。磁気抵抗(MR)素子においては電気抵抗値が2枚の強磁性層の磁化配置に依存し、反平行配置の場合の抵抗は高く、平行配置の場合の抵抗は低い(図1)。MR効果で磁化配置を電氣的に読み取ることができるため、MR素子はハードディスクドライブ(HDD)の磁気読み取りヘッドに応用され続けている。現在では、非磁性層として MgO トンネル障壁層を用いた磁気トンネル接合(MTJ)素子(MgO-MTJ素子)が開発され[①,②]、高い読み取り性能を持つ MgO-MTJ素子が現在の HDD に搭載されている。

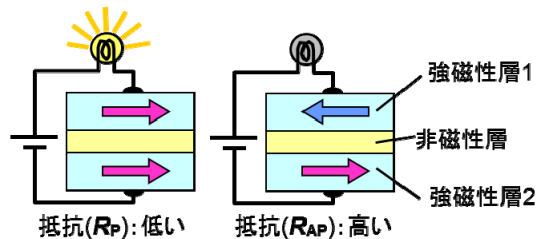


図1 MR効果

さらに MgO-MTJ素子においては、書き込みなど素子の磁化状態制御を電氣的に行うための技術の研究・開発が重要になってきている。その技術の原理となっているのがスピントルクである。スピントルクの発現機構を、直流電流を図1の素子に入力する場合を例に説明する。伝導電子が下側の強磁性層2(参照層)を通過する際に伝導電子のスピンの向きが局在スピンの方向に揃えられる。伝導電子が強磁性層1(自由層)に到達するとスピン角運動量の受け渡しが行われ、強磁性層1の局在スピンの歳差運動が誘起され(スピントルク発振素子となり高周波電圧・磁界を発生する)。電流の増加とともに歳差運動が増幅され、磁化反転に至る(スピントルク磁化反転)。スピントルク磁化反転は磁気メモリ MRAM の書き込み技術として採用されている。スピントルク発振素子は HDD の磁気読み取り・書き込みに応用することで、現在の記録方式では限界とされている 1 Tbit/inch² の記録密度を突破するための研究が進行中である[③]。

低電流でより大きなスピントルクによる効果を得るには、スピントルクの2成分についての知見を得た上でそれらを制御することが重要となる。一方の成分はスピン・トランスファー・トルク(STT)と呼ばれ、スピントルク磁化反転の主な駆動力になっているトルクである。もう一方はフィールド・ライク・トルク(FLT)と呼ばれ、実効的には磁界

の印加と同じ作用をするトルクである。STTとFLTの大きさのバイアス電圧依存性を最も高精度で評価できるとされているのはスピントルクダイオード効果[④]を用いた測定法[⑤,⑥]である。スピントルクダイオード効果とは、MR素子に交流(高周波)電流を入力することで磁化自由層の局在スピンが歳差運動し、[MR効果を通じて振動する抵抗]と[入力した交流電流]の掛け合わせにより直流電圧の出力が得られ、検波・整流作用が得られる効果である。しかし、サンプル間のダイオード特性のばらつきが大きいという問題を抱えていた。これがSTTとFLTの特性評価を妨げていた。また、参照層に働くSTTとFLTの大きさを評価する手法も未開発のままであった。将来的にはMRAMの高記録密度化(と高速書き込み化)のためにMgO-MTJ素子のサイズは小さく(、そして高い電流が素子に流されるように)なる。こうした条件では、参照層に働くSTTとFLTは無視できなくなってくる。

一方、スピントルクダイオード効果を示すMgO-MTJ素子はスピントルクダイオード素子と呼ばれ、高周波検波素子としての応用が期待されている。スピントルクダイオード素子はサイズを数ナノメートルまで小さくでき、構造が単純で複数個並べるアレイ構造が作り易く低価格化が期待できるという半導体検波器に無い特長を持つ。スピントルクダイオード素子の検波感度は、非線形強磁性共鳴という現象を利用することで周波数 1.55 GHz、バイアス dc 電流の大きさ 0.3 mA の条件において半導体検波器の検波感度を超えることも報告されている[⑦]。しかし、高速通信に有利なより高い周波数、省エネに有利なバイアス dc 電流ゼロの条件では、非線形強磁性共鳴を利用することができないので、それに代わる高感度化の手法が求められていた。その手法としてFLTを用いる方法が考えられた。モデル計算によると、STTとFLTの大きさが同じ場合、FLTトルクに由来する反対称なダイオードシグナルはSTTに由来する対称なシグナルよりも1~2桁大きいものとして現れると見積もられていた[⑧]。

2. 研究の目的

本研究では、(1)スピントルクダイオード素子の特性のサンプル間ばらつきの抑制、(2)高周波数かつゼロ dc バイアス電流検波感度の向上、(3)参照層に働くSTTとFLTの大きさを評価する手法の開発を目指した。

3. 研究の方法

(1) 研究の目的の(1)、(2)の研究は以下の方法で行った。

① 薄膜作製：工業応用(磁気読み取りヘッドの量産やMRAMの研究開発)に標準的に採用されているマグネトロンスパッタ装置 Canon-ANELVA C-7100 を用いて MgO-MTJ 膜を製膜した。

Current-in-plane-tunneling (CIPT)法で加工前の膜のMR効果の大きさを評価することで最適化のスピード化を図った。本報告書で示した実験結果は、熱酸化シリコン基板/バッファ層/ IrMn(7) / Co₇₁Fe₂₉(2.5) / Ru(0.82) / Co₇₁Fe₂₉(1.0) / Ta(0.3) / Co₆₀Fe₂₀B₂₀(1.5) / Co₇₁Fe₂₉(0.5) / MgO トンネル障壁層/ Co₆₀Fe₂₀B₂₀(1.5) / キャップ層 (厚さの単位：nm)という膜構成の膜から得られたものである。

② 微細加工：フォトリソグラフィ法、EBリソグラフィ法、アルゴンイオンミリング法、絶縁層形成、リフトオフ法を用いて、スピントルクダイオード素子へと加工した。ばらつきを抑えられる加工条件を検討するため、素子サイズ・形状・エッチング深さの異なるサンプルを加工した。特に、エッチング条件を検討することで自由層が参照層から受ける漏れ磁界の影響を減らすことを狙った。エッチングを MgO 障壁層で止めたものは漏れ磁界が抑えられ磁化ダイナミクスの均一性が向上するという報告があった[⑨]。

③ スピントルクダイオード測定：高周波アナログ信号発生器を用いて高周波電流をスピントルクダイオード素子に入力し、直流電圧出力の入力周波数依存性を測定した。

④ 解析：マイクロマグネティック・シミュレータ「Spin-PM」を用いた理論解析を行った。

(2) 研究の目的の(3)の研究では、マクロスピン・モデルに基づいて、参照層に働く STT と FLT の大きさを評価するのに必要な解析式を導いた。

4. 研究成果

(1) スピントルクダイオード特性の素子間のばらつきを抑制する課題に取り組んだ。まず、漏れ磁界の抑制による磁化ダイナミクスの均一性の向上を期待し、微細加工中のエッチング条件の検討を試みた。同一基板上に I. 従来通り MgO 層のみならず下部の強磁性層までエッチングした素子と II. MgO 層止めエッチングした素子を作製し、それらのダイオード特性を比較した。後者の素子で漏れ磁界が抑えられるはずであったが、磁気抵抗(MR)比の低下などで検波感度が前者の従来型素子の場合の 1/10 という結果となった。また前者の素子よりも後者の素子において「FLT に起因する信号/STT に起因する信号」の比が大きいことがわかった。検波感度を向上させる目的を優先させるため前者の

エッチング条件を選んで研究を遂行することとした。

次に、前者のタイプの素子で、低い抵抗面積積(3.8 オーム・平方ミクロン)で高いMR比(182%)を示す面内磁化膜を用いて、ダイオード特性が素子間でどのようにばらついているのか調べる実験を行った。同一設計の複数の素子に対して、面内外部磁界を 0.5 kOe に固定しその角度を振ってダイオード・スペクトルを測定した。面内外部磁界角度の定義を図 2 (a)に、測定結果のまとめを図 2 (b)に示す。図 2 (b)では、ダイオード・スペクトルでピークが見られた条件が黒いパターンとして示されている。磁界角度 90 度で周波数が最低となる自由層に由来するピークと、平行磁化配置では自由層のピークよりも高周波数で観測される他方のピークが、ある磁界角度で重なる特徴が見られた。ダイオード測定を行った素子のうち4割程度の素子が類似した磁界角度依存性を示すことを見出した。さらにそれらの素子では、2つのピークが重なる磁界角度において、一定の面内外部磁界のうちで出力 dc 電圧および検波感度が最高となることがわかった。

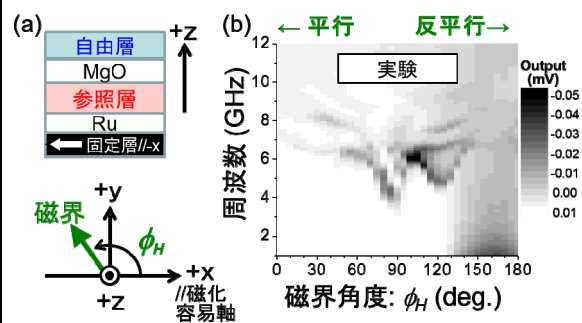


図2 (a)外部磁界角度の定義と(b)スピントルクダイオード出力 dc 電圧の磁界角度・周波数依存性

(2) スピントルクダイオード素子の検波感度向上の課題に(1)の研究結果を踏まえて取り組んだ。図 2 (b)の実験結果に対するマイクロマグネティック・シミュレーション結果を図 3 に示す。

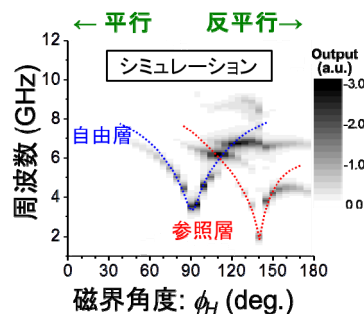


図3 マイクロマグネティック・シミュレーションによるスピントルクダイオード出力 dc 電圧の磁界角度・周波数依存性

シミュレーション結果から、他方のピークは参照層に由来する可能性があることを明らかにし、さらに自由層と参照層が逆位相で振動することで感度が向上することも明らかにした。

自由層と参照層の逆位相振動は、高周波数帯・ゼロ dc バイアスという感度向上が難しい条件においても感度向上を可能にする方法である。この方法を提案する学会発表を平成 26 年度中に国内(応用物理学会)と国外(MMM)で行った。

(3)自由層と参照層が逆位相振動するために必要な条件を調べるために、そして参照層に働く STT と FLT の大きさを評価するのに必要な解析式を得るために、参照層の磁化ダイナミクスによるスピントルクダイオード特性をマクロスピン・モデルによって解析的に記述した。この理論モデルでは、参照層は(1)下部の磁化固定層と反強磁性結合し、(2)自由層と磁化固定層の両方と STT および FLT を介した相互作用をする と仮定した。得られた解析式から、ダイオード・スペクトルにおける参照層に由来するピークの符号は、磁化固定層との STT を介した相互作用の大きさによって変化することが明らかとなった。さらに、自由層との STT を介した相互作用よりも磁化固定層とのそれが大きい方が、逆位相振動に有利であるという知見も得られた。また、本研究で得られた解析式は、ダイオード・スペクトルから参照層に働く STT と FLT を介した相互作用の大きさを定量的に評価することを可能とするものである。本研究結果について、平成 26 年度中に JJAP 誌に論文発表を行った。また、平成 27 年度中に国際学会(ICM2015)において口頭発表を行うことが確定している。

<引用文献>

- ① S. Yuasa et al., Nature Mater., 3 (2004) 868.
- ② S. S. P. Parkin et al., Nature Mater., 3 (2004) 862.
- ③ JST プレスリリース 2011 年 12 月 19 日.
- ④ A. A. Tulapurkar, et al., Nature, 438 (2005) 339.
- ⑤ H. Kubota et al., Nature Phys., 4 (2008) 37.
- ⑥ J. C. Sankey et al., Nature Phys. 4 (2008) 67.
- ⑦ S. Miwa et al., Nature Mater. 13 (2014) 50.
- ⑧ R. Matsumoto et al., APEX, 4 (2011) 063001.
- ⑨ C. Wang et al., J. Appl. Phys., 106 (2009) 053905.

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 1 件)

- ① Rie Matsumoto, Hitoshi Kubota, Toshiki Yamaji, Hiroko Arai, Shinji Yuasa and Hiroshi Imamura, Spin-torque diode spectrum of a spin valve with a synthetic antiferromagnetic reference layer, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有、53 巻、2014、123001-1 ~ -5 DOI: 10.7567/JJAP.53.123001

[学会発表] (計 4 件)

- ① Rie Matsumoto, Hitoshi Kubota, Hiroshi Imamura, Shingo Tamaru, Kay Yakushiji, Akio Fukushima, Shinji Yuasa, Bias Voltage Dependence of Field-like Torque in Asymmetric CoFeB/MgO/CoFe/NiFe Magnetic Tunnel Junctions, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会、2013 年 9 月 5 日、同志社大学京田辺キャンパス (京都府京田辺市)
- ② Rie Matsumoto, Hitoshi Kubota, Toshiki Yamaji, Hiroko Arai, Hiroshi Imamura, Kay Yakushiji, Akio Fukushima, Shinji Yuasa, Enhancement of spin-torque diode sensitivity at high-frequency by utilizing anti-phase dynamic coupling of free and reference layers, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、2014 年 9 月 19 日、北海道大学 札幌キャンパス (北海道札幌市)
- ③ Rie Matsumoto, Hitoshi Kubota, Toshiki Yamaji, Hiroko Arai, Hiroshi Imamura, Kay Yakushiji, Akio Fukushima, Shinji Yuasa, Enhancement of spin-torque diode sensitivity at high-frequency by utilizing anti-phase dynamic coupling of free and reference layers, The 59th Annual Magnetism and Magnetic Materials (MMM) Conference, 2014 年 11 月 5 日、Honolulu (U.S.A.)
- ④ Rie Matsumoto, Hitoshi Kubota, Toshiki Yamaji, Hiroko Arai, Shinji Yuasa and Hiroshi Imamura, Effect of spin-transfer-torque induced dynamics of a synthetic antiferromagnetic reference layer on a spin-torque diode spectrum, 20th International Conference on Magnetism (ICM2015)、2015 年 7 月 6 日、Barcelona (Spain)

〔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：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 利映 (MATSUMOTO, Rie)
産業技術総合研究所 研究員
研究者番号：10635303

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：