

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K14118

研究課題名（和文）電圧によるスピン波の屈折率制御と電圧制御型スピンレンズの開発

研究課題名（英文）Voltage control of spin-wave reflection index and its application for voltage-controlled spin lens

研究代表者

山本 竜也（Yamamoto, Tatsuya）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・研究員

研究者番号：20805139

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、電圧による磁気異方性変調効果に着目し、高速かつ高効率なスピン制御を可能とする萌芽的技術の開発に取り組んだ。主要な成果として、マイクロ波電圧印加によるパラメトリック励振の観測が挙げられる。従来のマイクロ波磁界を用いた手法ではスピンの一斉歳差の励振にmWオーダーの電力が必要であったが、開発手法ではわずか0.4 uWの電力で励振することに成功した。本成果はスピン波制御だけでなく、電圧によるスピン反転を利用した磁気メモリ素子への応用も期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の主要な成果である、マイクロ波電圧印加によるパラメトリック励振の技術はスピン波の電圧制御だけでなく、磁気メモリ素子における磁化反転の精度向上に応用することも可能である。また、本研究で開発した電圧波形の補正手法は、スピンドायナミクスの精密制御を可能とするものであり、外場によるスピン波の励起・同期現象を正しく理解する上で欠かすことのできない技術である。

研究成果の概要（英文）：We have studied the voltage-controlled magnetic anisotropy (VCMA) effect to develop a novel technique which allows for high-speed, energy-efficient control of magnetization in ferromagnetic thin films. Our major scientific achievement would be the observation of parametric resonance induced by a microwave voltage pumping. In the conventional techniques using a microwave magnetic field, the excitation of parametric resonance requires a power of the order of mW, whereas our VCMA-based technique allowed to excite parametric resonance at 0.4 uW. The present technique is applicable not only for controlling the spin waves but also for magnetic memory devices based on VCMA-driven magnetization switching.

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 磁性 電圧制御

1. 研究開始当初の背景

強磁性体中におけるスピンの反転や歳差運動のようなダイナミクスを利用することで、ナノサイズのマイクロ波発振素子や整流素子として応用することができる。また、磁性体中におけるスピンの空間的な揺らぎである「スピン波」は電荷の移動を伴わずに伝搬するため、ジュール損失なく媒体中を伝わっていくという特徴がある。磁性体中におけるスピンの歳差運動は外部からの磁場印加によってモードや周波数、伝搬方向を制御することができる。実際に、導線中に電流を流すことにより生じるエルステッド磁場を利用したスピン波の制御も研究されてきた。しかし、このエルステッド磁場を用いる手法では電流投入によりジュール損失が生じてしまうため、スピン波の伝搬によるエネルギー損失が小さいとしてもデバイス全体で消費される電力を下げることはできない。そこで、本研究では「電流」ではなく「電圧」で磁性体中におけるスピンのダイナミクスを効果的に制御する手法の開発を目指した。特に、金属強磁性体/誘電体界面に電圧を印加することによって生じる電圧誘起磁気異方性変化 (VCMA) に着目することで、高速かつ低エネルギーなスピン制御技術の開発を目指した。

2. 研究の目的

本研究では、金属強磁性体/誘電体界面における VCMA 効果を利用することで、強磁性体中におけるスピンを高効率に制御する技術の開発に取り組んだ。特に、VCMA 効果の高速性を利用することで、スピンのダイナミックな挙動を電氣的に制御し、観測するための手法を探索した。

3. 研究の方法

通常、金属においては遮蔽効果によって電圧の影響は界面から数原子層の領域に制限されてしまうが、強磁性体の膜厚が非常に薄い (1 nm 程度) 場合には、電圧印加に伴う界面での電子数変化の影響が薄膜全体の磁氣的性質変化として観測できる。従って、本研究ではまず超薄膜磁性体におけるスピンダイナミクスの電圧制御に取り組み、その後比較的膜厚の厚い磁性体チャネルにおけるスピン波の励起および制御にステップアップしていった。また、インピーダンス不整合の問題を回避してスピンの精密制御を行うために、印加する電圧波形を精密に制御する手法の開発にも取り組んだ。

4. 研究成果

(1) 電圧波形の精密制御技術開発

電圧によるスピン制御を行う場合、電流による影響を排除するために誘電体層の膜厚を厚くする必要がある。従って、素子のインピーダンスは必然的に高くなり、高周波の反射の影響を無視することができなくなる。回路内で意図しないリングングや多重反射が生じてしまうと印加電圧と観測結果との対応が取れなくなってしまいうので、精密なスピン制御を行うためには、素子に印加される電圧波形を把握し、必要に応じて波形補正を行う必要がある。本研究では、de-embedding の手法を応用することで測定回路において生じる波形の歪みを正確に再現し、またあらかじめ生じうる歪みの影響を出力側に補正データとして取り込んでおくことで、歪みのないクリーンな波形を素子に印加するための手法の開発に取り組んだ。

図 1 (a) に測定回路の模式図を示す。実際のデバイスを模擬するため、電圧の出力端は pick-off tee (PT) の P ポート (225 ohm) に接続した。任意波形発生器 (AWG) で生成された電圧パルスはプリアンプ (AMP) で増幅された後、bias-tee (BT) を通って PT へ到達する。図 1 (b) に測定結果および計算結果の比較を示す。図中青線および緑線はそれぞれ BT および PT の先で得られた波形である。BT を通過した時点でリングングが生じており、PT においては PT 端で反射された波形が AMP の出力端でさらに跳ね返ってきた波形が見えている (図中矢印)。そして、本研究で用いた de-embedding を拡張した計算により得られた結果 (赤線) は緑線で示した実測結果をほぼ完全に再現しており、計算により波形歪みを正確に予測できることが証明された。

図 1 (c) は波形計算の手法を応用し、波形の補正を行なった例である。図中青線が AWG へアップロードした波形であり、各コンポーネント通過後に生じる波形歪みを打ち消すために歪んだ波形となっている。実際に測定された波形 (緑線) は計算で予想された波形 (赤線) と良く一致し、反射やリングングのない綺麗な矩形波となっている。

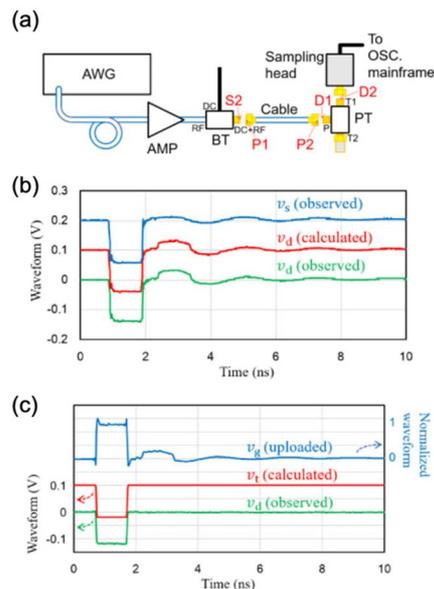


図 1: (a) 測定に用いた回路の模式図。(b) 波形歪みの測定結果。(c) 波形補正の結果

本手法は2端子素子のように素子に入力する波形を直接観測して補正を行うことが困難な場合でも有効であり、幅広い素子に対して適用可能な強力な手法である。この研究成果は Japn. J. Appl. Phys.誌にて誌上発表した。(S. Tamaru, TY et al., “Accurate calculation and shaping of the voltage pulse waveform applied to a voltage-controlled magnetic random access memory cell”)

(2) 磁気トンネル接合素子におけるスピン波制御

続いて、VCMA 効果を用いた高速かつ精密なスピン波の制御及び観測に取り組んだ。ここでは、スピン波の励起・制御・検出を行う電極を面内に配置した素子を使う代わりに、図2(a)に示すような2層の強磁性層を1層のトンネル障壁層で隔てた磁気トンネル接合(MTJ)を用いた。一方の磁性層は1.1 nm厚のCoFeBとし、電圧印加により効率良く異方性制御が得られるようにした。もう一方の磁性層はCoPtの多層膜をベースに構成し、ハード磁性を有する磁気固定層とすることで、トンネル磁気抵抗効果を介してCoFeB層のスピンの方の相対的な変化を高精度に検出できるようにした。

上記のMTJ素子において、電圧を印加していない状況ではCoFeB層のスピンは上向きあるいは下向きの2状態が安定状態となる。十分大きなパルス電圧を素子に印加すると、VCMA効果によって膜面直方向の異方性が瞬間的に消えるため、膜面内方向に有効磁界が存在すれば、その有効磁界に沿ってスピンの歳差運動が始める。従って、パルス電圧印加によってCoFeB層中にスピンのダイナミクスを「励起」することができる。続いて、GHz帯域の高周波電圧を印加することで、パルス電圧により励起されたスピン波の「制御」を行なった。具体的には、VCMA効果を介して周期的な異方性変調を誘導することで特定のスピン波成分を選択的に励振し、さらに位相変調等の制御を行うことを目指した。そして、トンネル磁気抵抗効果による抵抗変化を読み取ることで高周波印加終了時におけるスピン状態の「検出」を行なった。磁気緩和後、最終的に検出されるスピン状態はパルス印加終了時の状態に依存するため、スピンの反転確率をパルス幅を変えながら測定することで、CoFeB層中のスピンのダイナミクスの「スナップショット」を撮ることができる。

図2(b)はスピン反転確率のパルス幅依存性である。パルスと同時に印加する高周波の周波数を2.65 GHzとした際に周期性が向上しており、特定のスピン波モードが高周波電圧により励振されていることがわかる。数値シミュレーションを用いた解析の結果、本手法では共鳴周波数の2倍周波数での異方性変調によりスピン波の0次モードがパラメトリック励振されていることが明らかになった。

続いて、高周波の位相を変えることでスピン歳差の位相変調を試みた。図2(c)に示すように、 $\pm 40^\circ$ の範囲では4 ns以下の時間幅で高速に位相変調が起こっている。一方で、 110° においては周期性が消失しており、パラメトリック励振の周波数の条件は満たしているにもかかわらず励振が生じない「死角」が存在することが明らかになった。

本成果については特許出願(「磁気記憶装置」山本竜也 他、特願 2019-007726) Nano Letters誌での誌上発表(TY et al., “Voltage-Driven Magnetization Switching Controlled by Microwave Electric Field Pumping”) 国際会議での発表(TY et al., “Voltage-torque-driven magnetization switching using microwave-superimposed voltage pulse”, MMM2019)および応用物理学会での発表を行い(TY et al., “Improved accuracy of voltage-torque-driven magnetization switching using microwave-superimposed voltage pulse”) 応用物理学会では講演奨励賞を受賞した。

(3) 面内スピン波素子の開発

(2)で用いたMTJ素子では励起されるスピン波は0次モードに限定されていた。そこで、より高次のモードを励起し、電圧制御を実証するために、図3に示すように強磁性体チャンネル上に励起アンテナ、ゲート電極および検出アンテナをそれぞれ面内に配置した素子の開発を行なった。本デバイスにおいて0次モードを含む複数次のスピン波モードの励起・検出には成功したものの、高次のスピン波モードを長距離に渡ってさせるためには強磁性層の膜厚を20 nm程度に増やす必要があり、残念ながら現状のVCMA効率では検出可能な程のスピン波変調を得ることはできなかった。しかしながら、本研究で設計・作製した素子はあらゆる強磁性体/誘電体接合を用いて形成可能であり、今後の材料開発によるVCMA効率の改善によりスピン波の屈折や集光などを観測できるものと期待する。

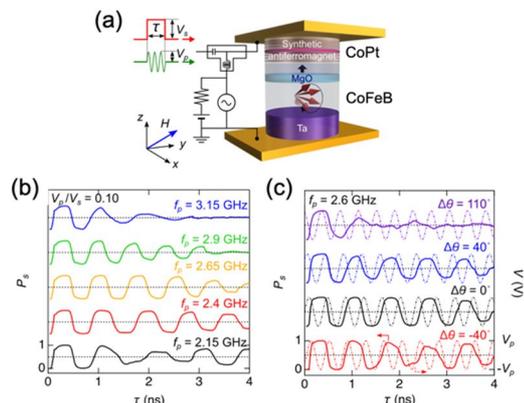


図 2: (a) 測定に用いた素子および回路の模式図。(b) スピン波のパラメトリック励振。(c) スピン波の位相変調。

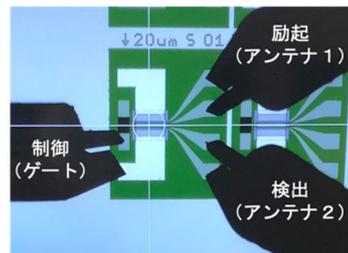


図 3: 作製した面内スピン波素子の光学顕微鏡写真。

図 3: 作製した面内スピン波素子の光学顕微鏡写真。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tamaru Shingo, Yamamoto Tatsuya, Nozaki Takayuki, Yuasa Shinji	4. 巻 57
2. 論文標題 Accurate calculation and shaping of the voltage pulse waveform applied to a voltage-controlled magnetic random access memory cell	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 073002 ~ 073002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.073002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamamoto Tatsuya, Nozaki Takayuki, Imamura Hiroshi, Tamaru Shingo, Yakushiji Kay, Kubota Hitoshi, Fukushima Akio, Yuasa Shinji	4. 巻 20
2. 論文標題 Voltage-Driven Magnetization Switching Controlled by Microwave Electric Field Pumping	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 6012 ~ 6017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.0c02022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山本竜也、野崎隆行、今村裕志、田丸慎吾、薬師寺啓、久保田均、福島章雄、鈴木義茂、湯浅新治
2. 発表標題 Improved accuracy of voltage-torque-driven magnetization switching using microwave-superimposed voltage pulse
3. 学会等名 第80回応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本竜也、野崎隆行、今村裕志、田丸慎吾、薬師寺啓、久保田均、福島章雄、鈴木義茂、湯浅新治
2. 発表標題 Voltage-torque-driven magnetization switching using microwave-superimposed voltage pulse
3. 学会等名 Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本竜也、野崎隆行、今村裕志、田丸慎吾、薬師寺啓、久保田均、福島章雄、鈴木義茂、湯浅新治
2. 発表標題 マイクロ波重畳パルスによる電圧トルク磁化反転精度の改善
3. 学会等名 第67回応用物理学会 春季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 磁気記憶装置	発明者 山本 竜也	権利者 産業技術総合研究所
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-007726	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

応用物理学会 講演奨励賞, 2020.03

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------