

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22327

研究課題名（和文）光誘起スピン波を利用したスピン流 電流変換現象の制御

研究課題名（英文）Controlling spin-to-electric charge conversion via optically-induced spin waves

研究代表者

山田 貴大 (Yamada, Kihiro)

東京工業大学・理学院・助教

研究者番号：40874722

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：超短パルス光の高速性や偏光、波長等を活かせば、スピン流-電流変換の制御法やスピン流の新規生成法に新たな展開が期待できる。本研究では、フェムト秒光パルスの希土類鉄ガーネット膜 (GdYb-BIG) への照射によりコヒーレントなスピン波を誘起し、光誘起スピン波から生じるスピン流を電流に変換して測定することに成功した。得られた電流値はスピン波からのスピンポンピング単体では説明できないほど大きく、Ptの光吸収により生じるPt/GdYb-BIG界面の大きな熱勾配がスピン流生成を促進している可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

フェムト秒光パルスを利用したスピン流-電流変換現象はサブピコ秒の時間スケールで報告があるが、フェムト秒光パルスを用いてもスピン流をナノ秒オーダーの実電流として取り出せることは、本研究が初めて実証した。得られた大きな電流はフェムト秒光パルスだからこそ励起可能なコヒーレントなスピン波および界面の熱勾配の協奏現象の存在を示唆し、本成果が光-スピン流変換の新展開へと繋がり得る。また、外部・内部電界の補助なしで光から電流が取り出せることは、光発電等への応用を考えれば重要なことである。

研究成果の概要（英文）：By using an ultrashort optical pulse with the polarization and wavelength degrees of freedom, one can pioneer new methods for controlling spin-charge conversion phenomena and generating spin currents. In this study, we successfully measured electric currents in a Pt layer converted from spin currents originating in coherent spin waves excited by irradiating a rare-earth iron garnet film (GdYb-BIG) with a femtosecond optical pulse. The measured current is much larger than one calculated under the assumption that the electric currents result solely from the spin-pumping effect by the coherent spin waves. The light absorption by the Pt layer creates a large thermal gradient, which might promote the generation of spin currents.

研究分野：物性物理

キーワード：スピン波 スピン流-電流変換 フェムト秒レーザー

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

スピンの集団的歳差運動は波として磁性体中を伝播する。この波をスピン波(マグノン)と呼び、熱による散逸を伴わず伝播することから新たな情報担体として注目されている。スピン波のスピン角運動量の一部は隣接金属にスピン流として注入され、金属層に注入されたスピン流は逆スピンホール効果を通して電流に変換される。多くのスピンデバイス、このようなスピン流-電流変換現象を通して、スピン流を電気信号に変換して検出するため、スピン流の高効率生成法の開発とともにその電流変換現象の制御は応用上も重要なテーマである。

2. 研究の目的

本研究では、スピン波の励起にフェムト秒光パルスを用い、スピン波から生じるスピン流を実電流として測定した。高周波電流を用いる一般的な励起手法と比較して、フェムト秒光パルスを用いた励起には多くの利点があり、それらを活かすことでスピン流-電流変換の新たな展開が期待できる。たとえば、フェムト秒光パルスによる励起は、高周波電流を印加するための電極のような複雑な構造を必要としないため、物質選択の幅を広げられる。フェムト秒光パルスを用いれば、電気的手法では作りだせない高周波数の素励起も誘起できる。さらに、素励起の偏光や波長選択性を上手く利用できれば、スピン流-電流変換現象の自在な制御も可能性になると予想される。しかし、フェムト秒光パルスで励起したスピン波を実電流として検出した報告はなく、手法すら確立されていなかった。そこで、本計画では、フェムト秒光パルス誘起スピン波を、スピン流-電流変換現象を通して、実電流として検出する手法を確立した。その後、光パルスの利点を活かし、スピン流の生成やスピン流-電流変換現象の制御を目指した。

3. 研究の方法

磁気ガーネット膜をフェムト秒光パルスで励起することで、スピン波が生成可能である[1]。スピン波のスピン角運動量が散逸する過程で、その一部が隣接金属層にスピン流として流れ込む(スピンプンピング)。隣接金属層に注入されたスピン流は、逆スピンホール効果を通じて、電流へと変換される。この電流を変換・増幅し、電圧として測定する。図1に測定配置の概略を示す。GGG基板上に液相エピタキシャル成長させた膜厚 $150\ \mu\text{m}$ の $\text{Gd}_{4/3}\text{Yb}_{2/3}\text{BiFe}_5\text{O}_{12}$ (GdYb-BIG)を用意した。その上部には、膜厚 20nm のPt細線をスパッタ法により作製した。励起光には、再生増幅Ti:sapphireレーザーからの出力(繰り返し周波数 $1\ \text{kHz}$ 、中心波長 $800\ \text{nm}$ 、パルス幅 $50\ \text{fs}$)を使用した。GdYb-BIGの磁化を細線の長辺と垂直に磁場を印加して飽和させた。円筒レンズにより楕円状に集光されたパルス光の長軸が細線の長辺方向に平行になるようにし、静磁後進体積波を磁場方向と平行に伝播させた。スピン波からPt細線へと注入されるスピン流は、逆スピンホール効果により、電流に変換される。Pt細線中の電流はトランス・インピーダンス・アンプで電圧に変換・増幅し、オシロスコープで測定した。

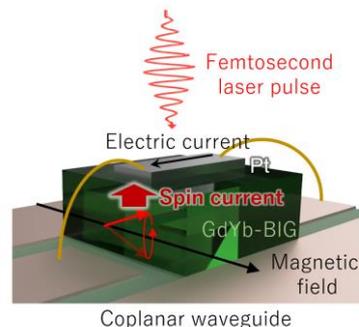


図1. 測定配置の概略

4. 研究成果

直線偏光フェムト秒光パルスでPt/GdYb-BIGを励起した際に生じるナノ秒程度で緩和する電流を測定することに成功した(図2)。磁場方向を反転させると電流の極性は逆転し、磁場を切ると電流は消失する。また、 $\lambda/4$ 波長板を用いて励起光の円偏光状態を変えながら電流を測定したが、電流のピーク値には円偏光依存性が確認できなかった。このことから、今回用いた測定条件では、スピン波は、逆ファラデー効果のような非熱的な効果ではなく、光吸収による熱的效果により生じているとわかる。さらに、光パルスの位置依存性を調査したところ、光パルスと細線が空間的に重なっている場合に特に大きな電流が生じていることがわかった。

コヒーレントな磁化の歳差運動からスピンプンピングに

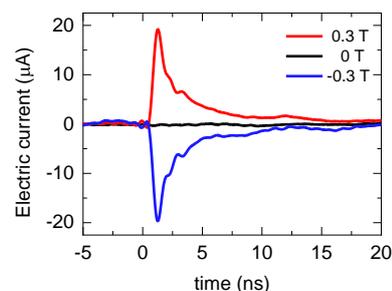


図2. フェムト秒光パルス誘起電流の磁場依存性

より生じたスピンの流れが Pt の逆スピンホール効果を通して電流に変換されたと仮定を置き、電流のピーク値から歳差角度を計算すると約 12 度であった。計算された歳差角度は、フェムト秒光パルスで励起可能な大きさを明らかに逸脱していることから、上で置いた仮定では考慮されていない要素があると考えている。光パルスと細線が空間的に重なった場合にとりわけ大きな電流が生じることより、Pt の光吸収が重要な可能性がある。励起波長が 800nm の場合、GdYb-BIG よりも Pt の光吸収係数の方がずっと大きいため、Pt の光吸収により巨大な熱勾配が Pt/GdYb-BIG に生じる得る。この巨大な勾配が、スピンゼーベック効果を通して、コヒーレントなスピン波からのスピンの流れの生成を促進したと考えている。

フェムト秒光パルス誘起スピン波を、スピン流-電流変換現象を通して、ナノ秒程度で緩和する実電流として検出することに成功した。フェムト秒光パルスを用いたスピン流-電流変換現象はサブピコ秒スケールで報告があるが、フェムト秒光パルスにより生じるスピンの流れを実電流として取り出せると本研究で初めて実証することができた。得られた大きな電流は、フェムト秒光パルスだからこそ励起可能なコヒーレントなスピン波および界面の熱勾配の協奏現象の存在を示唆し、本成果は光-スピン流変換の新展開へと繋がり得る。また、外部・内部電界の補助なしで光から電流が取り出せることは、光発電等への応用を考えれば重要なことである。連続光源を用いた先行研究と比較しても本研究で得られたスピンの流れはずっと大きく、スピン流-電流変換の新たな知見が眠っている可能性がある。引き続き機構解明を目指して実験を行っていく予定である。

<引用文献>

- [1] T. Satoh et al., Nat. Photon. **6**, 662-666 (2012).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kihiro T. Yamada, Alexey V. Kimel, Kiran Horabail Prabhakara, Sergiu Ruta, Tian Li, Fuyuki Ando, Sergey Semin, Teruo Ono, Andrei Kirilyuk, and Theo Rasing	4. 巻 4
2. 論文標題 Efficient all-optical helicity dependent switching of spins in a Pt/Co/Pt film by a dual-pulse excitation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 765848
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fnano.2022.765848	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山田貴大, Alexey Kimel, Sergiu Ruta, Roy Chantrell, Kiran Horabail Prabhakara, Tian Li, 安藤冬希, Sergey Semin, 小野輝男, Andrei Kirilyuk, Theo Rasing
2. 発表標題 強磁性金属薄膜におけるダブル光パルスを用いた高効率偏光依存型磁化反転
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菅野瑛人, 山田貴大, 大林尚文, 佐藤琢哉
2. 発表標題 GdYb-BIG/Pt におけるフェムト秒レーザー誘起磁場依存性電流の電氣的検出
3. 学会等名 電気学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山口 湖太郎, 山田 貴大, 小林 裕太, 小野 輝男, 森山 貴広, 佐藤 琢哉
2. 発表標題 走査型磁気光学Kerr顕微鏡によるカイラル反強磁性体Mn3Irの磁気ドメインの可視化
3. 学会等名 NanospecFY2021mini
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------