

平成30年4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：2016～2017

課題番号：16K13617

研究課題名（和文）ナノ狭窄構造を用いたスピン流の閉じ込めと増大

研究課題名（英文）Confinement and enhancement of spin currents by using nano constricted structure

研究代表者

湯浅 裕美（福澤裕美）（Yuasa, Hiromi）

九州大学・システム情報科学研究所・教授

研究者番号：20756233

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、現在微弱なスピン流をデバイス利用できるレベルまで増大することを目指し、ナノ狭窄構造を作り込んで磁化の急峻に変化させ、熱流により発生するスピン流が増大することを検証した。狭窄部分の面積密度を小さくするにつれ積層膜全体の熱起電力が増加するという傾向を得た。これにより、これまで磁性体の中で一方向に流れるとされて来たスピン流が、急峻な磁化の変化がある箇所では増大する可能性があることを掴むことが出来た。

研究成果の概要（英文）：In this study, we examine the possibility of the spin current confinement and enhancement by using the nano constricted structure where magnetization rapidly changes in order to utilize the spin current for applications. The spin current created by the heat current was increased as decreasing the areal density of the nano constricted region. It suggests that the rapid magnetization change has the possibility to confine and enhance the spin current.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピン流 熱流 狭窄構造

### 1. 研究開始当初の背景

電子はアップとダウンの2つのスピン量子状態を取ることが知られ、この差分の流れがスピン流となる。このため、磁性体の中では一様かつ一方向に流れるとされて来た。しかし、特異な数 nm レベルの狭窄構造では、急峻に変化する電流と磁化の支配が拮抗し、スピン流が渦状となって閉じ込められるという驚異的な予測がなされた [1]。申請者は、もしスピン流を閉じ込めて巨大なスピン蓄積を生ずることが出来れば、非磁性体へ流れ込むスピン流が増大する可能性がある点に着目した。しかしながら、数 nm レベルの狭窄構造を形成することが難しい上、閉じ込められたスピン流の検出が難しいという2つの課題があり、実証はされていない。

### 2. 研究の目的

本研究では作り込みの課題に対し、申請者が電流を狭窄することに成功したナノ狭窄構造 [2] を活用し、スピン流閉じ込めを狙う。さらに検出の課題に対し、スピン流閉じ込めが巨大スピン蓄積を生じ、非磁性体へ流れ込むスピン流増大を導くことを仮定して検出に挑戦する。また、スピン流の生成に電流を用いると検出電流との切り分けが出来ないため、スピン流発生源として電流のかわりに熱流を用いたスピンゼーベック効果を利用する。

本研究は、これまで一様かつ一方向でしか観測されたことのないスピン流を、ナノ狭窄構造によって渦状に閉じ込め、これに起因するスピン流の増大を狙う提案である。具体的なマイルストーンは以下2点である。

- (1) ナノ狭窄構造を磁性体/非磁性体の構造中に作り込み、熱流によるスピン流を閉じ込める系を実現する。
- (2) 強磁性体でのスピン流閉じ込めが、非磁性体のスピン流増大をもたらすことを検証する。

### 3. 研究の方法

ナノ狭窄構造を作成し、熱流と磁化が急峻に変化する系を得るための方策について説明する。まず、熱流の急峻な変化は、熱伝導率の異なる材料でナノ狭窄構造を作成することで実現する。図1(a)のように金属強磁性体 NiFe 等と金属非磁性体 Pt の接合部分を狭窄し、周囲を絶縁性の酸化物である Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等で埋める。ここで、それぞれの熱伝導率は、(NiFe)≈100 W/mK、(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)≈1 W/mK であることから、図1(a)に示すように熱流はナノ狭窄部に狭窄され、急峻な変化を得ることが出来る。

次に、磁化の急峻な変化は、反強磁性酸化物からの交換結合バイアスによる磁化固着と、外部磁場との拮抗を利用して実現する。IrMn のような反強磁性体と強磁性体を接すると、界面に交換結合バイアスが生じて強磁

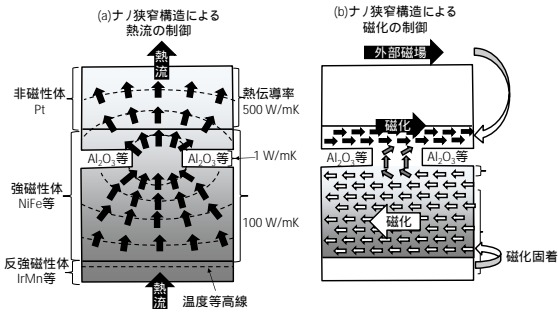


図1 ナノ狭窄構造による熱流と磁化の急峻な変化の形成方法

性体の磁化は一方向に固着される。磁化の固着方向は、昇温して交換結合がゼロとなるブロッキング温度以上とし、そこから冷却する時に掛ける磁場により決定できる。たとえば図1(b)で左方向に磁場を掛けながらブロッキング温度以上から冷却することで、強磁性体の磁化を白い矢印のように左方向に固着できる。これに対して外部から右方向に磁場を印加すると、反強磁性体から離れたナノ狭窄構造より上の部分の磁化は、黒い矢印のように右を向く。左向きの白矢印と右向きの黒矢印の間は磁壁となり、中間の方向を遷移しながら急峻に変化することとなる。このように、反強磁性体の交換結合バイアスと外部磁場の拮抗によって、ナノ狭窄構造に磁化が急峻に変化する領域が形成される。

ナノ電流狭窄構造の作成は、Al の表面酸化プロセスで行う。IrMn 等反強磁性体、NiFe 等強磁性体を成膜した後、被酸化物となる Al を成膜し、イオンビームあるいは RF バイアスを照射しながら酸素ガスを暴露し、ナノ狭窄構造を形成する。その後、上部の NiFe 等強磁性体、非磁性体 Pt と続けて成膜する。なお、図1ではナノ狭窄構造を1つだけ示したが、この手法で形成するナノ狭窄構造は、約 30nm~50nm 間隔をもって二次元面内に複数形成される。

以上のように、ナノ狭窄構造を作成し、熱流と磁化の急峻な変化を実現した。

### 4. 研究成果

図2に、スピン流増大の検出方法を示す。閉じ込められたスピン流に起因して得られる巨大スピン蓄積を、スピン流の増大として検出する。検出の流れについて、図5を用いて説明する。まず、作成した試料をペルチェ素子で挟み込み、膜垂直方向に熱流を掛ける。これにより NiFe 磁性体にスピン流が生成される。ナノ狭窄構造での熱流と磁化の急峻な変化により、スピン流が閉じ込められる。その結果、ナノ狭窄構造に巨大なスピン蓄積ができる。蓄積したスピンは、Pt 非磁性体へと流れ込む。Pt 非磁性体の中で、スピン軌道相互作用によりスピン流が電流へと変換される。このとき、電流の方向は、スピン流の方向および磁化の両方と直交す

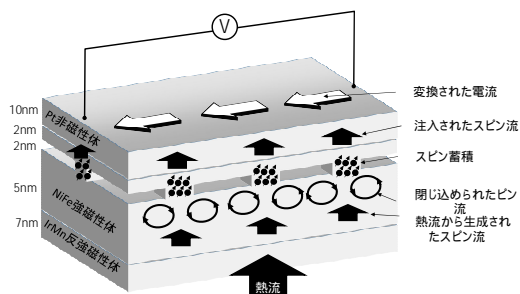


図2 スピン流増大の検出方法

る方向、つまり膜面内に流れる方向となる。この非磁性体膜面内に流れる電流の大きさで、変換前のスピンの大きさを評価する。以上より、入力である熱流に対し、出力である電流を検出することが出来る。ここで、 $S$  は既にも実証された現象であり、 $S$  のスピン流閉じ込めはシミュレーションから予測された現象である。これに対し、 $S$  の巨大スピン蓄積と  $S$  スピン流の増大はシミュレーション予測から独自に導いた仮説である。本研究では、シミュレーション予測および独自の仮説  $S$  を検証し、スピン流増大の方法を提案するものである。

ナノ狭窄構造の面積密度は、狭窄部分の周囲を埋める Al-O (アルミナ) を作成する際の、酸素暴露量を変化することで調整した。酸素暴露量が少なく金属の面積密度が多い時は、ナノ狭窄構造を介した 2 層の強磁性層の磁化は平行に結合する。これに対し、酸化暴露量を増やして金属の面積密度を減らすと、2 層の強磁性層の磁化の結合が弱くなり、固着されていない強磁性層のみが磁化反転をする。これを磁化曲線で確かめたものが、図 3 の上図である。酸素暴露量を増やすと 2 層の強磁性層の磁気結合が切れ、思惑通りにナノ狭窄構造の面積密度を制御できた。

次に、これの熱起電力を測定した。熱起電力の磁場依存性が、図 3 の下図である。磁化配列に依存して熱起電力が変化している様子が分かる。残念ながら、ナノ狭窄構造における熱起電力の寄与は小さい。従来技術である強磁性層中における異常 Nernst 起電力の方が大きく、全体の熱起電力に対して支配的であった。しかしながら、図 4 に示すように酸素暴露量依存性をよく調べると、暴露量を増やすにつれて起電力が増加することが分かった。酸素暴露量が大きい場合はナノ狭窄構造の面積密度が小さくなる。つまり、磁化の変化がより急峻になる。以上のことから、磁化の急峻な変化によって熱起電力が生じる、つまり、スピン流が発生する、という傾向を掴むことができた。

本研究では、ナノ狭窄構造を形成することで磁化の急峻な変化を実現し、スピン流の増大に起因した熱起電力発生を観測した。しかしながらその量は微量で、従来から知られている異常 Nernst 起電力を上回るものではない。

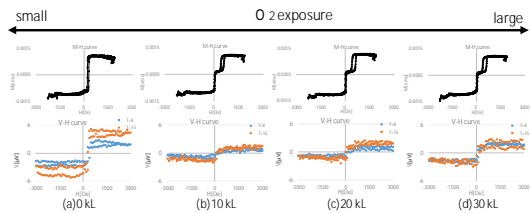


図3 ナノ狭窄構造作成時の酸化強度を変えたときの磁化と熱起電力の外部

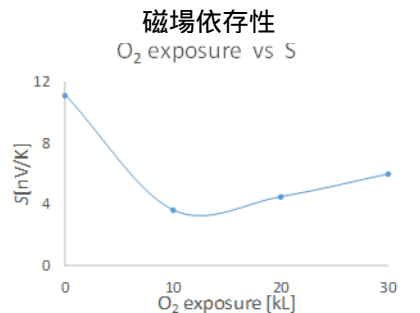


図4 熱起電力の酸化強度依存性

い。今後は、ここで得られた知見を端緒とし、更にスピン流をジャンプアップする構造を考案し、スピン流活用の研究を発展して行く。

< 引用文献 >

[1] Phys. Rev. B **84** 024416 (2011).  
 [2] Appl. Phys. Lett. **92** 262509 (2008).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)  
 (1) Spin Seebeck coefficient enhancement by using Ta50W50 alloy and YIG/Ru interface, Hiromi Yuasa, Fumiya Nakata, Ryohei Nakamura and Yuichiro Kurokawa, J. Phys. D: Appl. Phys. 51 134002 (2018). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aaaf89>  
 (2) Spin mixing conductance enhancement by increasing magnetic density, Hiromi Yuasa, Kouki Tamae, and Norimasa Onizuka, AIP ADVANCES 7 55928 (2017). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4977496>  
 (3) “YIG/Pt 界面への強磁性層挿入によるスピンミキシングコンダクタンス制御”, 中村瞭平, 玉江航稀, 湯浅裕美, 信学技報 (IEICE Technical Report) vol. 116 No. 258 pp.31-34 (2016).

〔学会発表〕(計 30 件)

(1) 【招待】湯浅裕美, “スピンゼーベック効果における界面・材料の役割” 平成 30

年電気学会全国大会 シンポジウム 新規スピndeバイスに向けた光・熱・磁気間相互作用の基礎と応用, 2018/3/14-16 (九州大学, 福岡)

- (2) Sho Inami, Hiromi Yuasa, Yuichiro Kurokawa, Ryohei Nakamura, Fumiya Nakata, Thermal induced voltage in magnetic layer with nano-constricted spin valves, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会 2018/3/17 (早稲田大学).
- (3) 【招待】H. Yuasa, "Spintronic phenomena and devices ~ past, current and future ~", Joint workshop btw SKKU and Kyushu University "Emerging materials and devices", 2018/1/15 (Kyushu Univ. Fukuoka).
- (4) 【招待】H. Yuasa, "Inserted layer effect on Spin Mixing Conductance in Spin Seebeck Effect" Reimei/GP-Spin/ICC-IMR International Workshop "New Excitations in Spintronics" 2018/1/10-12 (Tohoku Univ. Sendai).
- (5) 【招待】H. Yuasa, "Enhancement of Spin Mixing Conductance Enhancement of Spin Mixing Conductance Enhancement of Spin Mixing Conductance" 3rd Japan-Korea Spintronics Workshop 2017/12/18-20 (KIST, Korea).
- (6) H. Yuasa, F. Nakata, R. Nakamura, S. Inami and Y. Kurokawa, "Spin Seebeck voltage enhancement by using Ta50W50 alloy and YIG/Ru interface", MMM2017, 2017/11/6-10 (Pittsburgh, US).
- (7) H. Yuasa, R. Nakamura, M. Suzuki, F. Nakata, G. Nagashima, Y. Hirayama, S. Inami and Y. Kurokawa, "Spin Seebeck voltage improvement of Y3Fe5O12/ultra-thin magnetic layer/Pt and XMCD and XAS investigation for Pt" MMM2017, 2017/11/6-10 (Pittsburgh, US).
- (8) 【招待】H. Yuasa, Enhancement of spin mixing conductance and utilizing large spin Hall angle in spin Seebeck effect, York-Tohoku-Kaiserslautern Research Symposium on "New-Concept Spintronics Devices", 2017/6/21-23 (Univ. York, UK).
- (9) Ryohei Nakamura, Sho Inami, Fumiya Nakata, Hiromi Yuasa, Enhancement of spin mixing conductance by ferromagnetic layer, SpinTECH IX, 2017/6/7 (福岡国際会議場).
- (10) Fumiya Nakata, Ryohei Nakamura, Sho Inami, Hiromi Yuasa, Spin Seebeck voltage enhancement by Ta50W50 with large spin Hall angle, SpinTECH IX, 2017/6/7 (福岡国際会議場).
- (11) Sho Inami, Ryohei Nakamura, Fumiya Nakata and Hiromi Yuasa, Spin-current detection in magnetic multilayer with

nano-constricted region, SpinTECH IX, 2017/6/7 (福岡国際会議場).

- (12) 【招待】Hiromi Yuasa, Enhancement of spin mixing conductance and spin Hall angle in spin Seebeck effect, Program of Core-to-Core and Spintronics Workshop 2017, 2017/3/20-22, (Serni Hankyu Hotel, Osaka).
- (13) Sho Inami, Ryohei Nakamura, Fumiya Nakata, Hiromi Yuasa, Increase of spin current in nano-constricted spin valves, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会 2017/3/14 (パシフィコ横浜, 神奈川県横浜市).
- (14) Sho Inami, Ryohei Nakamura, Fumiya Nakata and Hiromi Yuasa, Increase of spin-current in nano-constricted spin valves, 2nd Japan-Korea Spintronics Workshop 2016/12/16 (九州大学箱崎キャンパス, 福岡).
- (15) H. Yuasa, K. Tamae and N. Onizuka, Spin Mixing Conductance Enhancement by NiFe Insertion at YIG/Pt Interface, 61st Conference on Magnetism and Magnetic Materials 2016/10/31-11/4 (New Orleans, US).
- (16) H. Yuasa, N. Onizuka and K. Tamae, Thermoelectric Power based on Spin Seebeck effect in YIG/[Ta/W]n system 61st Conference on Magnetism and Magnetic Materials 2016/10/31-11/4 (New Orleans, US).
- (17) H. Yuasa, Spin Seebeck power generation toward energy harvesting EMN Las Vegas meeting on spintronics 2016/10/10-14 (Las Vegas, US).
- (18) 湯浅 裕美, 玉江 航稀, 鬼塚 法正, NiFeを挿入したYIG/Pt界面のスピニングコンダクタンス 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会 2016/9/13-16 (朱鷺メッセ, 新潟県新潟市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

湯浅 裕美 (YUASA Hiromi)

九州大学・大学院システム情報科学研究  
院・教授

研究者番号: 20756233