

令和 2 年 7 月 6 日現在

機関番号：13904

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18856

研究課題名(和文)磁性フォノン結晶の創成と熱流制御スピントロニクス素子の実現

研究課題名(英文) Formation of magneto phononic crystal and realization of spintronics device controlled by heat flow

研究代表者

中村 雄一 (Nakamura, Yuichi)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20345953

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ナノ多層膜構造によりフォノン(熱)伝導を制御し、それによりスピン流を制御する人工磁気格子の創成を目指し、多層膜構造がスピンゼーベック(SS)効果の出力に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。まず単純なモデルによりフォノンの伝搬について計算し、ナノ構造が伝搬に及ぼす影響について系統的に評価した。またPt膜の抵抗変化から試料表面温度を正確に評価する手法を開発し、精密な出力評価ができるようになった。これにより、多層膜の構造を変えた際のSS出力の変化を評価した結果、層数が増えるほど出力が大きくなる傾向が得られ、多層膜構造によりフォノン伝導が影響されている可能性が確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、磁性膜を含めたナノ多層膜構造(磁性フォノン結晶)を適切に設計することで、多層膜構造により熱伝導を制御できる可能性を示し、それをスピンゼーベック効果により電気的に検知することに成功した。これによりナノ多層膜により局所的な熱伝導の制御が出来る可能性があり、また将来的にはスピンゼーベック効果を用いた熱電発電の変換効率向上にも繋がると期待される。

研究成果の概要(英文)：The target of this study is a creation of an artificial magnetic lattice that controls spin current through the control of phonon (heat) transfer by designing nano-multilayered structure and clarify the effect of the multilayered structure on the output of the spin Seebeck (SS) effect.

The propagation of phonon was systematically calculated using a simple model, and the effect of nano-structure on the propagation was evaluated. In addition, precise evaluation method of the surface temperatures of the sample from the resistance change of the Pt films was developed for precise SS output evaluation. As a result, the SS output was changed by the difference in the multilayer structure; the SS output tended to increase by an increase of the number of layers and by a specific structure. This suggests that the phonon transfer may be affected by the multilayer structure.

研究分野：電気・電子材料

キーワード：フォノン結晶 スピンゼーベック効果

1. 研究開始当初の背景

近年、フォノンエンジニアリングとして、フォトニック結晶のアナロジーから、フォノン(熱)の波としての性質を利用し、ナノスケール周期構造体(フォノニック結晶)を用いたナノスケールの構造制御による熱伝導制御(熱伝導の抑制)が提唱されている。しかしながら、単純なナノスケール 1 次元の積層構造(1D-フォノニック結晶)を用いた熱伝導制御や磁性フォトニック結晶のようにマイクロキャビティを用いたフォノン局在に関する研究報告は未だなされていない。これは 1D-フォノニック結晶による膜厚方向の熱流・温度勾配の変化やフォノン局在の影響を精密に検知するのが容易でないことがその一因と考えられる。一方、スピンゼーベック (Spin Seebeck: SS) 効果は、強磁性体に温度差を与えることにより電子のアップスピンとダウンスピンの化学ポテンシャルに差(スピン圧)が生じ、強磁性体に接触させた金属にスピン流が生じる現象であり、金属材料の逆スピンホール効果を用いたスピンゼーベック素子(SS 素子)とすることで、スピン流の変化を電気信号として検知することができる。SS 素子では、強磁性体/金属界面付近のわずかな温度勾配の変化が電圧変化として検知できるため、1D-フォノニック結晶と組み合わせることで、構造によるわずかな熱流・温度勾配の変化も検知できる可能性がある。

2. 研究の目的

上記背景のもと、本研究では、熱でスピン流を制御する全く新しいスピントロニクス分野の創成を目指し、ナノ構造を制御して任意の周波数においてフォノン(熱)伝導を制御し、それによるスピンの流れを制御する、全く新しい熱流を制御する人工磁気格子 (Phonon-Artificial Magnetic Lattice: P-AML, 磁性フォノニック結晶) の創成と、フォノン(熱)により制御されたスピン流を電気的に検知する手法の確立を目的とする。そのため SS 素子を音速の異なる材料を積層した 1 次元 P-AML 構造と組み合わせて P-AML/SS 構造を形成することより、フォノン(熱)伝導を制御し、強磁性体中に強いフォノン遮断あるいは局在状態を実現することによるスピン流の変化を電気信号として検知することを目指した。

3. 研究の方法

まず多層膜中のフォノンの伝搬について、単純な弾性波の伝搬モデルを用いて、種々の構造を有するフォノン遮断型およびフォノン局在型 P-AML/SS 素子の伝搬特性を評価した。

また実際に P-AML/SS 素子を作製し、その SS 出力特性の評価を行った。P-AML/SS 素子は SiO₂ と Ta₂O₅ をイオンビームスパッタ装置により 5 ペア積層し、その上にイットリウム鉄ガーネット (YIG) および白金を形成することで作製した。その際、Ta₂O₅ の膜厚を一定として SiO₂ の膜厚の異なる P-AML/SS 素子について、膜面垂直方向の温度勾配をペルチェ素子により制御して、P-AML 構造の SS 出力電圧への影響を評価した。ただし本実験結果においては、測定毎のバラツキが比較的大きく、測定系における膜面垂直方向の実際の温度差に差異が生じている可能性が懸念された。そこで高精度に試料にかかる温度差を評価する手法について、評価試料の表面および基板裏面に形成した Pt 膜の電気抵抗の温度変化から試料膜厚方向の温度差を評価することで、試料膜厚方向の温度差と SS 出力の関係を正確に評価する手法について検討した。

4. 研究成果

従来のフォトニック結晶の設計指針を参考に、フォノン遮断型およびフォノン局在形 P-AML/SS 構造中の弾性波(フォノン流)の伝搬について計算を行った。波の減衰を考慮しない場合、フォノン遮断型においては周期的に波の伝搬しない遮断域が周期的に現れ、多層膜のペア数が大きいほど遮断域が明確になることが分かった。一方、フォノン局在形では、フォトニック結晶と同様、遮断域の中に波の局在を示す通過帯が見られたが、フォトニック結晶の場合と異なり、計算で得られたピーク波長は設計波長から若干のずれが生じることが分かった。また波の減衰を考慮した場合、局在波長での波の強度は低下し、また半値幅も若干広がることが分かった。種々の構造及び減衰率について計算を行った結果、この局在ピークの強さと構造の長さは、規格化された関係式で統一的に表現できることが分かった。

こうした計算の結果を踏まえ、実際に種々の膜厚を有する P-AML/SS 素子を作製し、その SS 出力特性の評価を行った。その結果、単純なモデルの予想と少々ズレが見られたものの、古典的な熱伝導理論からは説明できない SiO₂ 膜厚による SS 電圧出力の変化が見られ、P-AML 多層膜構造によるフォノン遮断に起因する温度勾配の変化が生じている可能性が示唆された。ただし測定毎のバラツキが比較的大きく、測定系において試料を保持する治具間の界面など、膜面垂直方向で実際に試料にかかる温度差のバラツキが大きい可能性が懸念された。

そこで実際に試料にかかる温度差をより正確に評価して SS 出力電圧との関係を明らかにするため、測定治具の構造を改良すると共に、温度評価を試料の両面に成膜した Pt 膜の抵抗値の変化から推定することとした。その結果、測定方法および得られたデータの統計処理方法などを工夫することで、数以下の微小な温度変化に起因する電気抵抗の変化から P-AML 試料の表面と基板裏面の温度を約 0.03 の精度で評価できるようになった。その結果、数 μV ~ 15 μV 程度の

SS 出力電圧に対して、平均値で規格化した標準偏差が、従来は 35%以上あったのに対し、10%未満とでき、微弱な SS 出力電圧の変化に対しても安定して評価できるようになった。この手法を用いて、多層膜の層数を変えた際の SS 出力の変化を評価した結果、層数が大きいほど出力が大きくなる傾向が得られ、多層膜化によりフォノン流に何らかの影響を与えられることが改めて確認された。

ただしフォノン局在形 A-AML/SS 素子については、昨年度後半に成膜装置が故障し使用できなかったため、十分な検証ができなかった。現在は復帰したため、フォノン局在型構造が SS 週力に及ぼす影響については引き続き検証を進めている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 豊田雄大; 中村雄一; 後藤太一; 林攀梅; 内田裕久; 井上光輝
2. 発表標題 スピンゼーバック出力精密評価のための温度評価方法の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 電子部品・材料研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村雄一; 滝川 新; 後藤太一; 内田裕久; 井上光輝
2. 発表標題 周期多層膜構造の縦スピンゼーバック出力への影響
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2020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