

トンネル磁気熱抵抗効果の研究

後 藤 穰^{*1} 石 部 貴 史^{*2}

Research on Tunnel Magneto-thermal Resistance Effect

Minori GOTO^{*1} and Takafumi ISHIBE^{*2}

In this study, we aimed to establish a measurement technique for the spin-dependent thermal conductivity of magnetic multilayer films with an insulating intermediate layer. First, we fabricated magnetic multilayer films using a magnetron sputtering device and measured the thermal conductivity using the 2ω method of the thermoreflectance method. As a result, we obtained thermal conductivity in the range of 1 to 8 W/Km, and confirmed that the thermal conductivity of magnetic multilayer films can be evaluated. However, although it is necessary to apply a magnetic field to investigate the relationship between the spin state and the thermal conductivity, a problem arose in which the stability of the measurement decreased. Therefore, we investigated a device design that can control the parallel/antiparallel state of the spins without using an external magnetic field, and demonstrated that the spin state can be controlled by the film thickness when the intermediate layer is made of metal. Specifically, by measuring with a sample vibrating magnetometer, we confirmed that the antiparallel state was stable when the film thickness of the metal layer was less than 0.7 nm, and the parallel state was stable when the film thickness was more than 0.7 nm. This established the technical basis for measuring the spin-dependent thermal conductivity without an external magnetic field and demonstrated the possibility of controlling the thermal conductivity by spin.

1. 背景と目的

スピントロニクスでは、強磁性層 | 中間層 | 強磁性層という三層のスピンデバイスが基礎・応用の両面で重要視されている。両端の強磁性層のスピンの平行と反平行の場合で電気抵抗が大きく変化することが知られており、これにより磁気センサーやメモリに利用されている。図1に、その概念図と表を示す。中間層に金属を使用した場合には電気抵抗が数10%ほど変化し、さらに中間層を絶縁体すると電気抵抗が数10%～数100%変化する¹⁻⁵⁾。このような現象の類推で、スピンの依存した熱抵抗が生じる可能性がある。近年では、中間層に金属を利用した素子において熱抵抗の変化が確認された⁶⁾。そのため、同様のメカニズムを用いれば中間層を絶縁体とした場合にも同様の効果が期待される。

そこで本研究では、中間層を絶縁体とした素子におけるスピン依存熱伝導率の測定を目指し、その基盤技術を確立する。

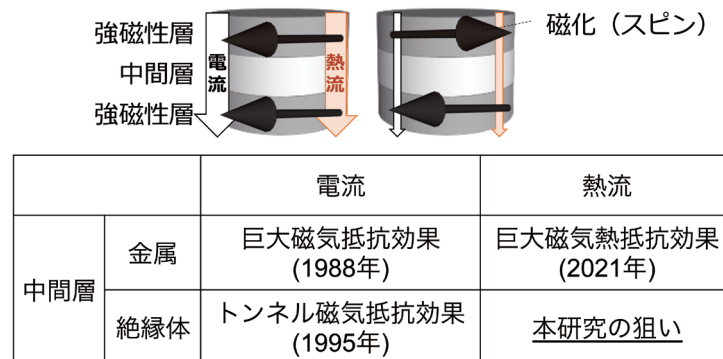


図1 強磁性層 | 中間層 | 強磁性層で構成されたスピンデバイスの概念図。

スピンの方向が平行状態と反平行状態で電気抵抗が変わる。中間層には金属もしくは絶縁体が使われ、一般的に絶縁体の方が抵抗変化率が高い。これに伴い、熱抵抗も変化すると期待される。

2025年3月1日 受理

^{*1} 福井大学学術研究院工学系部門工学領域

^{*2} 大阪大学大学院基礎工学研究科

2. 磁性多層膜の成膜と熱伝導率評価

本研究ではマグネトロンスパッタリング装置を用いて図2(a)に示す素子を作製した．これを上面から観察した写真を図2(b)に示す．熱伝導率の測定にはサーモリフレクタンス法の 2ω 法を用いた⁷⁾．上部電極に交流電流を印加し，その際に発生した熱が上部電極から磁性多層膜を通じて絶縁体基板側へ流れる．上部電極の光の反射率を測定すると上部電極の温度変化が分かるので，この温度変化を通じて磁性多層膜の熱抵抗の測定が可能となる．このような方法によって様々な磁性多層膜における熱伝導率の測定をしたところ，

1～8 W/Kmの熱伝導率が測定され，磁性多層膜の熱伝導率測定が可能となった．

一方，熱伝導率のspin方向に対する依存性を調べるためには外部磁場によってspin方向を制御する必要がある．しかし，熱伝導率の測定系に磁場を印加すると反射光強度が安定せず，精度良い測定ができなかった．そのため，本研究では次に外部磁場無しでspinの平行・反平行状態を作れる素子作製を行った．

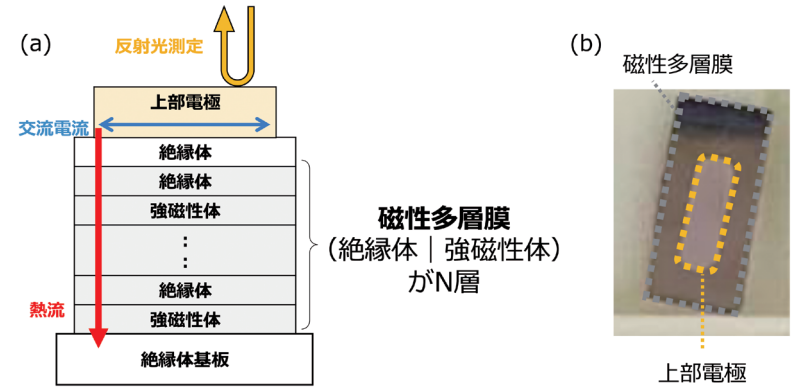


図2 (a) 磁性多層膜と，その熱伝導率測定概念図．(b) 素子の平面図．中央部分が上部電極に相当する．

3. 無磁場下における平行・反平行状態の実現

本研究では強磁性層 | 中間層 | 強磁性層の中間層に絶縁体を用いているが，この中間層を金属とし，その膜厚を調整すると両端の強磁性層のspinを平行・反平行状態とすることができる⁸⁾．spin方向が固定されている磁化固定層にこのような3層膜を用いることで，無磁場下においてもspin方向を中間層膜厚によって制御することができる．つまり，強磁性層 | 金属層 | 強磁性層 | 絶縁層 | 強磁性層とすると，金属層の膜厚によって絶縁層両端のspin方向を平行・反平行と制御することができる．このような膜を実現するため，金属層の膜厚に対して両端の磁性層がどのように変化するかを調べた．

試料振動型磁力計によって強磁性層 | 金属層 | 強磁性層の磁気モーメントの外部磁場依存性を測定した．この測定によって，2つの強磁性層を反平行化させるためのエネルギーを評価することができる．図3に，金属層の膜厚を変化させたときの，反平行化のエネルギーを示す．反平行化のエネルギーとは，具体的には以下の式の Δ_{ex} である．

$$E = -\mu_0 \mathbf{m}_1 \cdot \mathbf{H} - \mu_0 \mathbf{m}_2 \cdot \mathbf{H} + \Delta_{ex} \frac{m_1}{m_1} \cdot \frac{m_2}{m_2}$$

ここで， m_1, m_2 はそれぞれ厚膜強磁性層と薄膜強磁性層の磁気モーメントである．この結果から，約0.7 nm以下であれば反平行状態，0.7 nm以上であれば平行状態が無磁場下で実現するということが明らかになった．これにより，適切な金属層膜厚を選択することで磁場を印加しなくてもspin依存熱伝導率測定を行うことが可能になった．

4. まとめ

本研究では中間層を絶縁層としたときのspin依存熱伝導率測定を行う前に，その実験基盤技術の確立を行った．具体的には，磁性多層膜を作製し，サーモリフレクタンス法の 2ω 法によって磁性多層膜の熱伝導率測定が可能となった．一方，熱伝導率測定には装置内に磁場を印加することができず，その代わりに無磁場下でspin依存熱伝導率測定を行

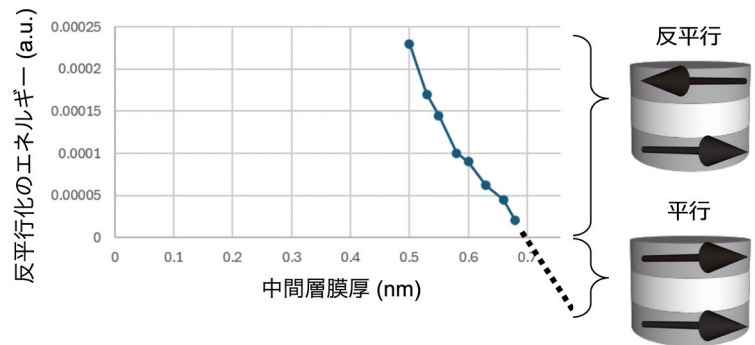


図3 2つの強磁性層の磁化を反平行化させるエネルギーの中間（金属）層膜厚依存性．反平行化のエネルギーが正の時は無磁場下で反平行状態，負の時は無磁場下で平行状態が安定となる．

えるデバイス設計の指針を示し、中間金属層膜厚が0.7 nm以下では反平行状態、0.7 nm以上であれば平行状態が安定とすることが分かった。本研究を通じて、今後はスピンによって熱伝導率を制御することが可能になると期待される。

REFERENCES

- 1) M. N. Baibich, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **61** (1988) 2472.
- 2) G. Binasch, *et al.*, *Phys. Rev. B*, **39** (1989) 4828.
- 3) T. Miyazaki and N. Tezuka, *J. Magn. Magn. Mater.*, **139** (1995) 1231.
- 4) S. Yuasa, *et al.*, *Nat. Mater.*, **3** (2004) 868.
- 5) S. S. P. Parkin, *et al.*, *Nat. Mater.*, **3** (2004) 862.
- 6) H. Nakayama, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **118** (2021) 042409.
- 7) R. Kato and I. Hatta, *Int. J. Thermophys.*, **29** (2008) 2062.
- 8) J. C. Slonczewski, *Phys. Rev. B*, **39** (1989) 6995.