

マグノントンネル効果の電圧制御に関する理論解析

[1] 要旨

近年、マグノンを利用した次世代デバイスの研究が活発になってきており、マグノンの運動の制御に関心が集まっている。本研究は、非磁性金属を中間層とするマグノンのトンネル接合系を舞台として、そのトンネル効果を外部電圧で制御することによりマグノン流を効率的に制御できることを理論的に示唆したものである。

[2] 本文

ダイオードやトランジスタ、またそれらの集積回路は、情報機器の基本要素の1つとして現代の高度情報化社会を支えてきた。一方で、このような電子デバイスの駆動には電流によるジュール発熱が伴い、省エネの観点からこれを低減することが強く求められている。このために、近年、電子でなくマグノンを利用することが注目されている。マグノンとは磁性体の低エネルギー励起を記述する準粒子であり、すなわち粒子のように振る舞うが、その流れ(マグノン流)は電荷の移動を伴わずジュール熱を発生しない。また、伝導電子は絶縁体に侵入できないが、マグノンは磁性体であれば絶縁体中でも動き回ることができる。この点に着目し、導体・半導体フリーの、磁性絶縁体をベースとしたジュール損ゼロの超省エネデバイス — マグノニックデバイス — の実用化が期待されている。基礎研究レベルではあるが、これまでに様々なマグノニックデバイスが考案・作製されてきており、最近ではマグノニクスという分野が形成されつつある。図1に示すような強磁性絶縁体/中間層/強磁性絶縁体の構造(MSTJ: magnonic spin tunneling junction と呼ばれる)での解析がなされている。この構造はマグノンに対するトンネル接合となっている。Ren と Zhu は、MSTJの左右の界面状態が異なる時、これが一種のダイオードとして働くことを理論的に示し、スピンゼーベックダイオード(SSD)と名付けた。磁性体に対して温度勾配 ΔT を印加するとスピンゼーベック効果によってマグノン流が駆動されるが、SSDに印加した場合はトンネルマグノン流の大きさが ΔT の符号によって違う。このようにマグノン整流効果を有することがその名の由来である。更に、SSDを2つ接合することでトランジスタとして機能するため、これによって構成されたマグノン回路からジュール損ゼロの演算回路を考えることもできる。

最近、東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻の研究グループは、MSTJの電氣的制御の可能性を検討するために、中間層に対する微視的模型を用いてマグノンのトンネル確率振幅(有効交換相互作用) $Jeff$ の電圧依存性を詳細に理論解析した。その結果、中間層の材料や層厚の条件によって $Jeff$ は多彩な電圧特性を示すことが明らかになった。これは、外部電圧に対して鈍感または敏感な SSD を目的に応じて設計可能であることを示唆している。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の2020年1月号に掲載された。

先行研究では、中間層のトンネル確率振幅はパラメータとして与えられていたため、そのままでは外部電圧依存性を議論できない。そこで本研究では、中間層の内部構造として非磁性金属を想定し、伝導電子が媒介する $Jeff$ を量子力学に基づいて記述している。また、外部電圧によって電流が生じないように、電圧は中間層面直方向に印加する系を扱っている。ゼロ電圧の場合、接合強磁性体の交換磁場により非磁性金属界面上の伝導電子が局所的にスピン分極する。そしてそのスピン分極は非磁性金属内部に向かって減衰振動を伴い浸透していく。こうしてもう片方の界面上にスピン分極が到達すれば、結果として強磁性体間に実効的な交換相互作用が働く。この描像は古くからよ

く知られているが、今回の構造のような薄膜では電圧の印加に対して伝導電子が大きな電場を感じることにになり、 J_{eff} が大きく修正される。図2は非磁性金属の電子濃度をパラメータとし (a,b,c,d,e), J_{eff} の外部電圧依存性をプロットしたものである。a, e では符号の変化が見られないが, b, c, d では変化している。後者では、ある電圧でゼロを横切るため、そこで完全にマグノンのトンネルを遮断できる。また、cのように途中まで電圧にほぼ依存しない特性を示す場合もある。このように、 J_{eff} に対する電圧の非線形効果は予想通り著しい。さらに、その電圧特性は非磁性金属の材料選択に非常に強く依存することが示めされている。

本研究は MSTJ を舞台とした有効交換相互作用の電圧制御について理論検討したものであるが、一般にマグノンの運動は交換結合に強く支配されているため、本研究で得られた知見は広くマグノンニックデバイスの制御に応用可能であると期待される。

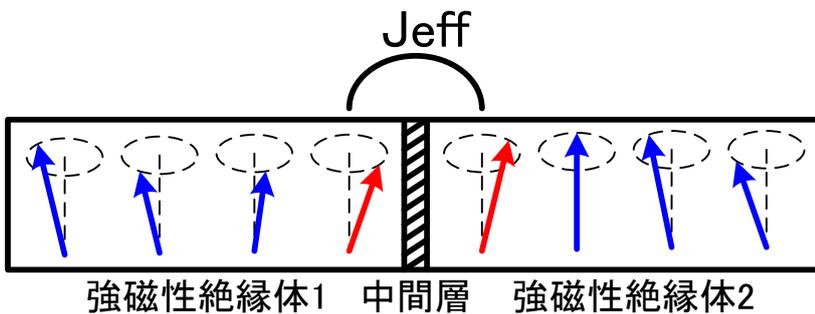


図1. MSTJの模式図. 矢印はスピンの集団励起 (マグノン) の様子を表しており、赤矢印で示した界面スピン間には中間層を介した実効的交換相互作用 J_{eff} が働くものとする。強磁性絶縁体1と2の界面状態が異なるとき、SSD効果が発現する。

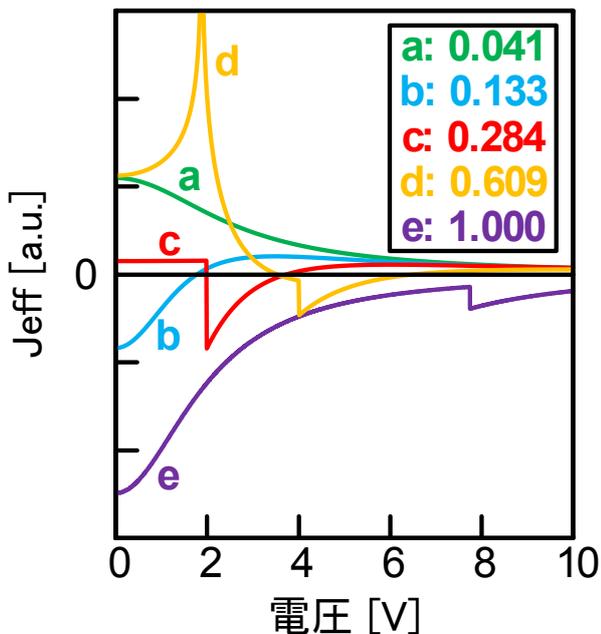


図2. 種々の電子濃度における J_{eff} の電圧依存性. 中間層は2層とした。

原論文

[Voltage-Controlled Magnonic Spin Tunneling Junction](#)

Kohei Ohgane, Yuta Yahagi, Daisuke Miura, and Akimasa Sakuma, J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 013601 (2020).

<情報提供：大金幸平（東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻）
矢作裕太（東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻）
三浦大介（東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻）
佐久間昭正（東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻） >