

カイヤル オード効

東京大学 先端科学技術研究センター 野本 拓也(現 東京都立大学)、有田 亮太郎
東京大学 理学系研究科 肥後 友也、中辻 知
産業技術総合研究所 日比野 有岐、山本 竜也、田丸 慎吾、野崎 隆行、薬師寺 啓
高輝度光科学研究センター 小谷 佳範、中村 哲也

【研究の背景】

情報爆発時代の到来に伴い、低消費電力かつ高速に情報を処理・伝達する技術の需要が高まっている。この課題に対処すべく、電子の電荷だけでなくスピンの利用する「スピントロニクス」が注目されてきた。従来のスピントロニクスでは、強磁性体の磁化の向きを情報担体として利用することで磁気記録や磁気メモリの開発が進んできた。一方で、強磁性体の重要な特徴として、磁化の運動がマイクロ波と容易に結合することも見逃せない。例えば、絶縁体を二つの強磁性体で挟んだ磁気トンネル接合素子において、マイクロ波電流を流すと直流電圧が発生する「スピントルクダイオード効果」が広く知られており、次世代のマイクロ波検出器として期待されている[1,2]。この効果は次のように簡単に理解できる。マイクロ波を強磁性体に印加すると、強磁性共鳴によって磁化の歳差運動が誘起される。この時デバイスの抵抗が磁気抵抗効果によって同相で振動している場合、出力電圧は次のように書ける。

ここで、 $I \cos \omega t$ は印加したマイクロ波電流、 $R + \Delta R \cos \omega t$ はマイクロ波と同相で振動する抵抗であり、コサイン同士の積により定数成分が残り、直流電圧が発生する。印加磁場を大きくすれば、強磁性共鳴の周波数が高くなり動作周波数を制御できるが、磁化の歳差角が小さくなるため、整流信号が周波数に反比例して減少してしまう(図 1(a))。

反強磁性体はこの課題を解消する可能性を持っている。例えば、スピンの面内に配向した **Easy-plane** 反強磁性体において、**Easy-plane** に垂直なスピンを注入する。この際、面内を向いていたスピンはこの注入スピンからのトルクを受け、面外方向に立ちあがる。すると、このスピンを面内に押し戻そうと、交換相互作用による有効磁界が面直方向に発生し、スピンはその有効磁界の周りで歳差運動を始める(図 1(b))。強磁性体の場合、磁化の歳差運動の周波

数は磁場や磁気異方性のエネルギーに対応する GHz 帯に制限されるが、反強磁性体の場合、桁違いに強い交換相互作用エネルギーを利用できるため、GHz から THz 帯にわたる動作が原理的に可能である。

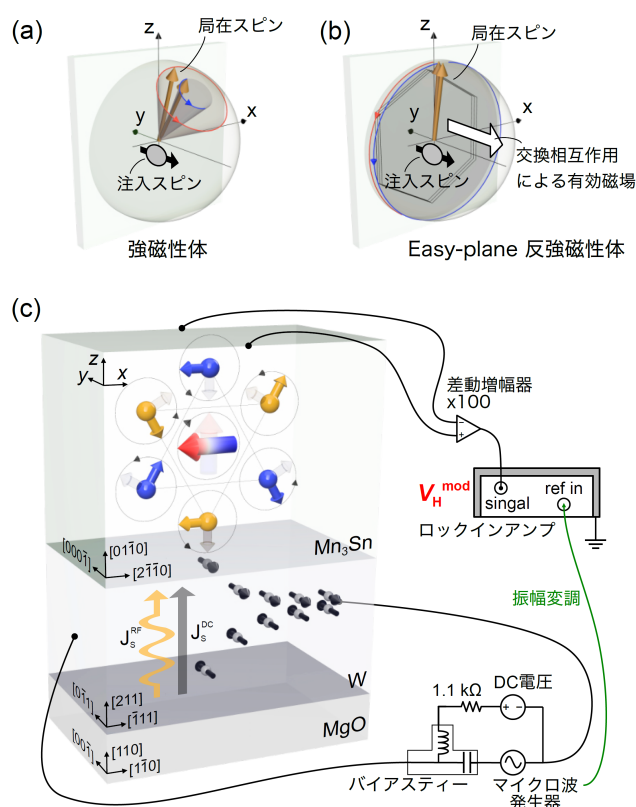


図 1(a)強磁性体と(b)Easy-plane 反強磁性体におけるスピントルク誘起のスピニ歳差運動の模式図。強磁性体では周波数を上げると歳差角が減少するのに対し、反強磁性体では歳差角の減少が小さい。(c)スピントルクダイオード効果の実験セットアップ。

本研究では Mn_3Sn に着目した。 Mn_3Sn は、 Mn のカゴメ格子が積層した結晶構造を持ち、 Mn スピンがカゴメ格子上で逆三角スピン構造を形成する **Easy-plane** 反強磁性体である。この逆三角スピン構造は、拡張磁気八極子が強

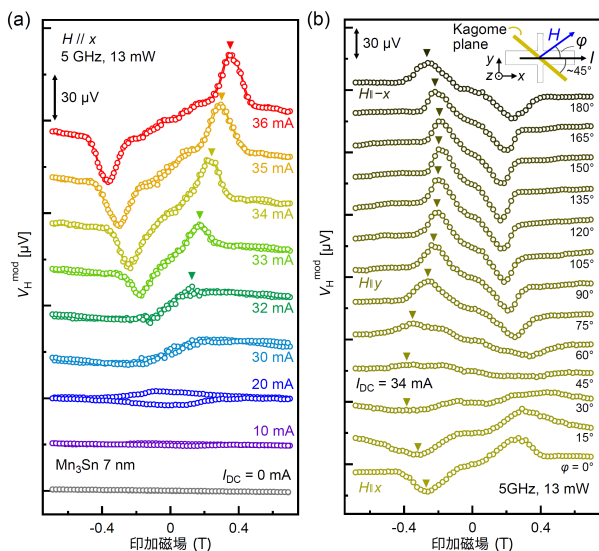


図 2 (a)マイクロ波印加下の DC ホール電圧の DC 電流と印加磁場依存性。(b)磁場角度依存性。

的に偏極した状態(以下、八極子偏極)として解釈される。この八極子偏極は、強磁性体における磁化に相当し、巨視的に時間反転対称性を破るため、強い強磁性的応答を示すことで知られている。近年、我々はカゴメ面が直立した Mn_3Sn を W の上にエピタキシャル成長させる技術を開発し、電気的な八極子偏極の完全反転[3]、トンネル磁気抵抗効果[4]、X 線磁気円二色性[5,6]などを実証してきた。この二層膜では、 W のスピントルク効果を利用してカゴメ面(Easy-plane)に垂直なスピンを注入することができる。すると、前述した機構によって八極子偏極が面内で回転する「カイラルスピン回転」が起こる[7]。そこで、我々はこの二層膜を用いることで、反強磁性体に特有の高周波動作性能と、強磁性体に匹敵する大きな電気応答を組み合わせた「反強磁性スピントルクダイオード効果」の実現が期待できると考えた。これを検証するため、 $\text{W}/\text{Mn}_3\text{Sn}$ の単結晶二層膜を分子線エピタキシー法で作製し、直流電流とマイクロ波電流を同時に印加して、直流の整流ホール電圧を検出する実験を行った(図 1(c)) [8]。

【実験結果の概要】

まず、5 GHz、13 mW のマイクロ波印加下において、直流電流を変えながら磁場を掃引して得られた整流ホール電圧を図 2(a)に示す。直流電流が 30 mA 以下においては、特徴的な構造が見られないのに対し、32 mA 以上ではある磁場でピークが出現することがわかった。この電流値は、八極子偏極の反転およびカイラルスピン回転の閾値電流と一致する。また、このピークは DC 電流を大きくすると高磁場側にシフトしていく特徴的な振る舞いを示す。図 2(b)

は、DC 電流を 34 mA に固定し、印加する磁場の方向を変えながら測定した結果である。図から見て取れるように、カゴメ面の持つ対称性を反映し、ピーク磁場の位置が 2 回対称性を示すことがわかった。これらのことは、観測されたピークが Mn_3Sn の八極子偏極のダイナミクスを反映した整流現象、すなわち「スピントルクダイオード効果」であることを示唆している。さらに、数値計算はこの振る舞いをよく再現し、カイラルスピン回転が磁場によって抑制され、止まりかけた状態においてマイクロ波電流が印加されると、カイラルスピン回転が効率的に変調を受け、整流信号を生むことがわかった。

最後に、当初の目的であった周波数依存性を調べた結果を図 3 に示す。30 GHz まで周波数を変えて実験を行ったところ、整流ホール電圧はほとんど周波数に依存しないことがわかった。数値計算の結果も実験をよく再現している。この振る舞いは強磁性体において、整流信号が周波数に反比例して減少するのとは本質的に異なるものである。

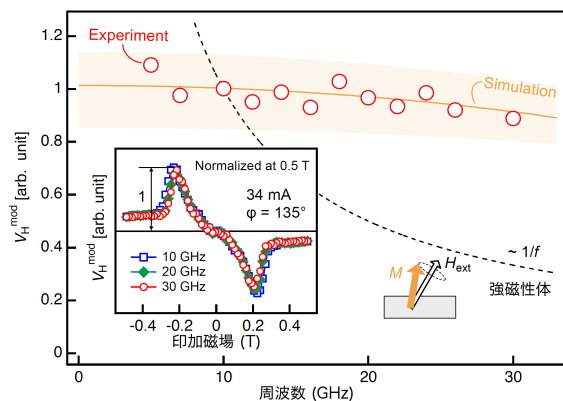


図 3 整流ホール電圧の周波数依存性。強磁性体では典型的には信号が反比例するのとは異なり、30 GHz まで信号が安定している。

【まとめと展望】

本研究では、高周波電流を直流電圧にスピンを介して変換する「スピントルクダイオード効果」を反強磁性体で初めて実証した。特に高周波帯域での安定性は、反強磁性体特有の現象であり、新奇材料であるカイラル反強磁性体のスピントロニクスデバイス応用に期待を与えるものである。

【謝辞】

本研究は、東京大学物性研究所の物質合成・評価施設、電子顕微鏡室、量子物質ナノ構造ラボ、SPRING-8 の BL23SU(2022A1072)を利用して行われました。本研究は、JSPS 科研費 (JP19H05825、JP21H04437、JP22H

00290、22H04964、23H01833、24H02234)、JST-CREST (JPMJCR18T3)、JST-Mirai Program(JPMJMI20A1)、JST-PREST(JPMJPR20L7)、X-NICS(JPJ011438)、JST-ASPIRE(JPMJAP2317)、Spin-RNJ の支援により実施されました。

【参考文献】

- [1] A. A. Tulapurkar *et al.*, Nature **438**, 339-342 (2005).
 - [2] S. Miwa *et al.*, Nat. Mater. **13**, 50-56 (2014).
 - [3] T. Higo *et al.*, Nature **607**, 474-479 (2022).
 - [4] X. Chen *et al.*, Nature **613**, 490-495 (2023).
 - [5] S. Sakamoto *et al.*, Phys. Rev. B **104**, 134431 (2021).
 - [6] S. Sakamoto *et al.*, Phys. Rev. B **110**, L060412 (2024).
 - [7] Y. Takeuchi *et al.*, Nat. Mater. **20**, 1364-1370 (2021).
 - [8] S. Sakamoto *et al.*, Nat. Nanotechnol. (2024).
- <https://doi.org/10.1038/s41565-024-01820-0>