

コヒーレント磁気弾性強結合状態に基づく高効率スピン流生成手法の開拓

Efficient spin current generation based on coherent magnetoelastic strong coupling state

課題番号：19H05629

大谷 義近 (OTANI Yoshichika)

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・チームリーダー



研究の概要（4行以内）

強磁性体薄膜に表面弾性波を伝搬させることでコヒーレントな磁気弾性強結合状態を実現し、高効率なスピン流生成を実現することを目的として研究を遂行している。当初の計画通り、最適化された素子設計・作成手法を確立した。作成された素子を用いて、2.96倍に増強されたスピン流生成に成功した他、非線形応答や100%に及ぶ整流効果を観測した。

研究分野：スピントロニクス、固体物理、磁気工学

キーワード：磁気弾性結合、スピン流、エデルシュタイン効果、強結合

1. 研究開始当初の背景

磁性体に磁場を印加すると歪が生じる磁歪現象や逆に歪を加えることで磁化が変化する磁気弾性効果は、今から150年以上前に発見され、よく知られた物理現象である。近年、この磁気弾性効果によるスピン波（マグノン）や格子振動（フォノン）波のマグノン・フォノン結合やそれらの伝搬の非相反性等の新たな側面に注目が集まっている。しかしながら通常の実験素子では関与するマグノンやフォノンの緩和による損失が大きく、強い結合効果が期待できない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、第一に、上述のマグノン・フォノンの結合に着目し、まず、それらを音響キャビティに閉じ込めることで結合を増強する手法を確立することである。次にマグノン・フォノン結合状態とスピン流生成機構の詳細を明らかにするとともに、既存技術よりも効率的なスピン流の生成を実現する。また、マグノン・フォノン結合の非相反性やパラメトリックポンピングを通じたスピン流生成の非線形効果などの発現の実験的検証と機構解明を行う。プロジェクトの最終目的として、量子情報技術に資するコヒーレントな強結合状態を実現することを目指す。

3. 研究の方法

すだれ状電極（IDT）に交流電圧を印加すると、IDTの双方向に表面弾性波が発生する。本研究では、より効率的にフォノンを閉じ込めるため、図1のようなキャビティ構造を作

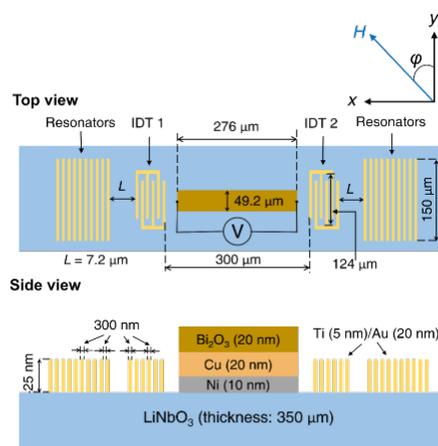


図1 素子構造の模式図 (b)IDT とブラッグ反射鏡 (Resonator) のレーザー顕微鏡像

製する。このキャビティ構造は、チタン・金積層ナノ細線を平行に並べた金属細線列からなる一対のブラッグ反射鏡で構成されている。これらの微細構造を、電子線描画・真空蒸着およびリフトオフ法を用いて、圧電基板上に作り込む。二つの反射鏡に挟まれた空間は、表面弾性波（フォノン）の閉じ込め空間となる。この空間にIDTを配置し、発生させた表面弾性波の減衰過程を実験と数値計算の両面から性能指数を算出し、フィードバックをかけながらキャビティ構造を最適化することで、(1)スピン流生成の増強と(2)マグノン・フォノン結合の非相反性や非線形効果を実現する。

#### 4. これまでの成果

本研究プロジェクトの前半の達成目標は、3. 研究の方法でも述べたように、(1)キャビティ構造の最適化によるスピン流生成の増強、(2)作製された素子を用いてマグノン・フォノン結合の非相反性と非線形効果の実現である。(1)については、図1に示すような最適化

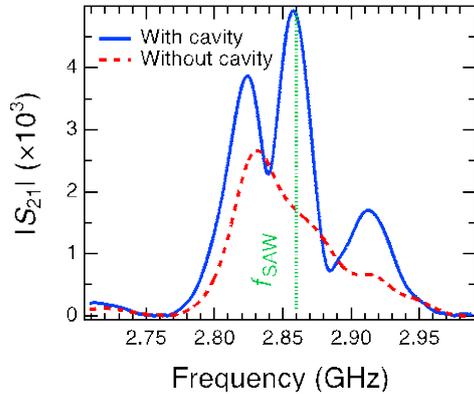


図2 表面弾性波透過・吸収係数  $S_{21}$  の周波数依存性

された素子構造の設計手法を確立した。特にIDTと反射鏡の位置と表面弾性波の波長との最適関係などを明らかにした。(2)については、図2に示すように表面弾性波の透過吸収係数  $S_{21}$  が2.04倍に増強されること、これにより素子中に配置された強磁性体が増強された音響磁気共鳴効果を示し、最終的に増強されたスピンポンピング効果により2.96倍に増強されたスピン流を生成することに成功した。さらに、生成されるスピン流信号の表面弾性波を励起するパワー依存性の測定から、非線形効果が生じることも新たに見出した。これらの成果は、発表論文[4]として出版した。

また、予期せぬ研究副産物として実験の過程で従来とは質的に異なる100%に及ぶ非相反現象(ダイオード効果)を発見した。この現象が40年以上昔に理論的に予言されていた磁気回転結合を起源とすることを、実験と理論の両面から明らかにし、論文[2][3]として発表した。

#### 5. 今後の計画

以上のように成果も出て、研究は順調に進んでいる。研究成果の論文発表も達成しており、中期目標の課題は計画通り達成できていると判断する。

今後は、上述のコロナ禍の影響で購入した低温クライオスタットの納入が遅れたため今後は、次年度までの目標であるパラメトリックポンピングや非相反効果などの非線形効果に力点を置いて、低温の実験を精力的に進めて行く。また、ブリュアン光散乱実験を

分担者と進めることで、マグノン・フォノン結合状態にある準粒子生成を実現し、その状態密度を決定する実験を進めて行く。

#### 6. これまでの発表論文等

論文発表

- [1] F. Chen, X. Ge, W. Luo, R. Xing, S. Liang, X. Yang, L. You, R. Xiong, Y. Otani, and Y. Zhang, “Strain-induced Megahertz Oscillation and Stable Velocity of an Antiferromagnetic Domain Wall Phys. Rev. Applied **15**, 014030-1-8 (2021).
- [2] K. Yamamoto, W. Yu, T. Yu, J. Puebla, M. Xu, S. Maekawa, G. Bauer, “Nonreciprocal Pumping of Surface Acoustic Waves by Spin Wave Resonance”, J. Phys. Soc. Jpn. **89** (11), 113702-1-5 (2020).
- [3] M. Xu, K. Yamamoto, J. Puebla, K. Baumgaertl, B. Rana, K. Miura, H. Takahashi, D. Grundler, S. Maekawa, Y. Otani, “Nonreciprocal surface acoustic wave propagation via magneto-rotation coupling”, Science Advances **6** (32), eabb 1724-1-5 (2020).
- [4] Y. Hwang, J. Puebla, M. Xu, A. Lagarrigue, K. Kondou, \*Y. Otani, “Enhancement of acoustic spin pumping by acoustic distributed Bragg reflector cavity”, Appl. Phys. Lett. **116**, 252404-1-5 (2020).
- [5] J. Puebla, J. Kim, K. Kondou, \*Y. Otani, “Spintronic devices for energy-efficient data storage and energy harvesting”, Communications Materials **1**, 1-9 (2020).
- [6] J. Puebla, M. Xu, B. Rana, K. Yamamoto, S. Maekawa, Y. Otani, “Acoustic ferromagnetic resonance and spin pumping induced by surface acoustic waves”, J. Phys. D: Applied Physics **53** (26), 264002-1-8 (2020).

国内・国際会議 (オンライン)

- [1] Y. Hwang, J. Puebla, M. Xu, A. Lagarrigue, K. Kondou, and Y. Otani, “Enhancement of acoustic spin pumping by acoustic distributed Bragg reflector cavity”, 2020 Autumn meeting of the Physical Society of Japan, Online, September 2020.
- [2] Y. Otani, “Magneto-Rotation Coupling between Surface Acoustic Waves and Spin Waves”, Department Seminar at ICQM Peking University, 22nd March 2021.

#### 7. ホームページ等

大谷研究室ホームページ

<http://www2.riken.jp/lab/nanomag/indexjpn.html>

論文発表ページから論文リストアクセス可