音波を閉じ込めてスピン波との強結合を室温で実証 -スピン波-音波を活用した新しいデバイスへ道-

物性研究所・ナノスケール物性研究部門 大谷 義近

【研究の背景】

異なる二つのシステム間の相互作用は、私たちの日常生 活において重要な役割を果たしている。例えば、視覚認識 は視神経と光子の相互作用によって可能になり、私たちは 周囲の世界を見ることができる。また、基礎研究の分野で は、電子と他のシステムの相互作用を通じて、多くの物理 現象を観察し、様々な物理メカニズムを理解することがで きる。

近年、システム間の相互作用がシステムの外部へのエネ ルギー散逸を上回る強い結合状態(強結合)が注目を集めて いる。異なるシステム間で強結合を達成できれば、それぞ れのシステムの特性を併せ持つ新たな結合状態が生まれ、 従来の単ーシステムとは異なる原理で動作するデバイスの 実現が可能となる。このため、光と固体物質など、さまざ まなシステム間の相互作用に関する基礎研究が活発に行わ れている。

我々は、スピンエレクトロニクスデバイスや音響デバイス の機能拡張につながるスピン波と音波の結合に注目した[1]。 スピン波は、強磁性体中の局在電子が持つスピンが歳差運 動しながら空間を伝播する波動である。このスピン波を利 用することで磁気情報の伝播が可能となり、メモリデバイ スなどの応用が可能となる。一方、音波は物質中の原子の 振動が伝わる波で、特に表面を伝わる音波(表面音波)は長 距離伝播が可能であるため、タッチパネルやガスセンサー など広範な用途に応用されている。しかし、スピン波と表 面音波の散逸が大きいため、これまで強結合状態の室温で の実現は達成されていなかった。

【実験の概要】

本研究では、音響共振器を圧電基板上に作製し表面音波 を閉じ込めることで、表面音波の散逸を低減し、スピン波 と表面音波の結合について詳細に調べた。この実験では、 対となる二つのくし形電極(IDT1、IDT2)を備え、二つの くし形電極の間に音響共振器を配置した(図 1b)。音響共 振器の内部には、ニオブ酸リチウムの圧電基板上に磁性 材料として低い磁気減衰を持つコバルト鉄ボロンの薄膜 (強磁性膜)を成膜した(図 1c)。また、表面音波の周波数は、 強磁性体中のスピン波を励起が可能な周波数 6.58GHz(波長 600 ナノメートル(nm、1nm は 10 億分の 1 メートル))を 用いた。

くし形電極(IDT1)で励起された表面音波は、音響共振 器を伝わり、対となるくし形電極(IDT2)で電気的に検出 できる。スピン波と表面音波は等しい波長と周波数で結合 することから、表面音波が音響共振器内部の強磁性膜を伝 わることで、表面音波と同じ波長(λ_p)と角周波数(ω_p)を持 つスピン波が励起される(図 1a)。表面音波は音響共振器 内に閉じ込められることで散逸が低減されるとともに、表 面音波のエネルギーが強磁性膜に吸収されるため、音響共 振器を透過した表面音波の信号強度を測定すれば、スピン 波と表面音波の結合の大きさを評価できる。



- 図1 実験の模式図と試料の構造
- (a) 音響共振器内部のスピン波と表面音波の結合の概念図。
- (b) 実験に用いた試料構造の模式図。二つのくし型電極 (IDT:Interdigital Transducer)、音響共振器(反射器)、強磁 性膜から成る。くし形電極および反射器を構成する金属線 の幅(w = 175nm)と間隔(d = 125nm)から表面音波の波長 (周波数)を計算できる[λp = 2(w + d) = 600nm]。二つのくし 形電極を接続したネットワークアナライザー(VNA:Vector Network Analyer)で表面音波の透過率を測定する。
- (c) 音響共振器内部の強磁性膜の膜組成。
- (d) 試料の顕微鏡像(左)と走査電子顕微鏡像(右)。

7 物性研だより第64巻第2号



図2 表面音波の透過率および分散曲線

表面音波の進行方向と等しい(平行)方向の外部磁場を0ミリテスラ(mT)から100mTの範囲で変化させた場合の表面音波の透過率。 緑色の曲線は観測した分散曲線であり、紫色と枯草色の点線はそれぞれ結合が弱い場合のスピンと表面音波の分散関係を示す。 (a) 厚さ20nmの強磁性膜を含む音響共振器の表面音波の透過率。

(b) 厚さ30nmの強磁性膜を含む音響共振器の表面音波の透過率。

(c) 厚さ30nmの強磁性膜を含み、音響共振器のない試料の表面音波の透過率。

まず、表面音波の透過率と分散関係を調べた(図 2)。ス ピン波は外部磁場の強度によって周波数が変化する。一方、 表面音波は磁場強度には依存せず、二つのくし形電極の電 極間の距離によって周波数が決められる。そのため、磁場 を変化させると、スピン波と表面音波の周波数が交差する 点が生じる。スピン波と表面音波が強く結合している場合、 二つの分散関係にその結合強度に比例した反発が生じ、交 差できない擬交差を示す(図 2a)。この擬交差を評価する ことで、スピン波と表面音波の結合の強度を評価できる。

今回の実験では図2のように、表面音波の進行方向と平 行する方向に磁場を印加したときの表面音波の透過率を測 定することで、表面音波の分散曲線を観測した。表面音波 の透過率は黄色の部分で高く、黒い部分が低いことを意味 している。結合が弱い場合には、スピン波と表面音波の分 散関係は図2の紫色の点線と枯草色の点線のように交差す る。一方、実験で観測した分散関係は緑色の曲線になり、 交差点付近において明確な擬交差が確認された(図2a,b)。 図2cでは音響共振器がない場合の観測結果を示している。 この場合には、分散関係の擬交差を観測できないことから、 音響共振器による音波の散逸抑制が強結合を実現するため に重要な役割を担っていることが分かる。

次に、印加する外部磁場の角度依存性を系統的に調べた ところ、磁場と表面音波の進行方向が平行の場合に、結合 強度が最も強くなることが明らかになった。これは、ニオ ブ酸リチウムの圧電基板上の表面音波は、縦波よりも横波 の方がスピン波と強く結合することを示している。 さらに、強磁性膜の厚さが 20nm の場合(図 2a)に比べ、 厚さが 30nm の場合(図 2b)では、擬交差の反発が強くなる ことから、強磁性体の膜厚を変えるだけで結合強度が変化 することが分かる。膜厚と結合強度との相関を室温におい て測定したところ、強磁性膜が厚くなるほどスピンの数が 増え、結合強度が強くなることが確認できた(図 3)。特に、 強磁性膜の厚さが 20nm 以上になると、結合強度(黒色の 丸形)がスピン波の散逸(紫色の四角形)と表面音波の散逸 (青色の三角形)より大きくなり、強結合領域に入っているこ とが分かる。つまり、膜の厚さが 20nm 以上のとき、スピ ン波と表面音波の強結合に到達していることを示している。



図3スピン波と表面音波の結合強度・散逸と強磁性膜の厚さの関係 強磁性膜の厚さが20nm以上になると、結合強度がスピン波の散 逸(紫色の四角形)と表面音波の散逸(青色の三角形)より高くなり、 強結合領域に入る。

【まとめと今後の展開】

表面音波の研究の歴史は長く、これまでにガスの探知や 電子機器のセンサー、タッチパネルなどに広く応用されて いる。さらに、強磁性体におけるスピン波も、磁気メモリ デバイスや磁気ロジック回路などに用いられ、現代社会で 必要不可欠な物理現象である。その二つを強く結ぶ強結合 の室温での実現は、それぞれの波の特性を併せ持つため、 磁場で制御できる表面音波センサーや、表面音波を用いた 磁気メモリデバイスなど、新しい原理に基づく音響および スピントロニクスデバイスの開発に役立つことが期待され る。

謝辞

本研究は、日本学術振興会(JSPS)科学研究費補助金基 盤 S「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(研究代表者:大谷義近)」、LANEF Chair of Excellence, QSPIN project, at University Grenoble Alpes(研究代表者:大谷義近)の支援を受けて行 われた。

参考文献

 Y. Hwang, J. Puebla, K. Kondou, C. Gonzalez-Ballestero, H. Isshiki, C. S Sánchez Muñoz, L. Liao, F. Chen, W. Luo, S. Maekawa, & Y. Otani, "Strongly coupled spin waves and surface acoustic waves at room temperature", Phys. Rev. Lett. 132, 056704 (2024).