

学位論文の要約

題目 表面弾性波を用いたフォノン角運動量の研究

氏名 多賀光太郎

序論

角運動量は物理学の根幹を成す物理量である。磁性をはじめとした多くの物理現象において、角運動量は重要な役割を担っている。さらに近年、電子のスピン角運動量を利用するスピントロニクスなど、情報担体として角運動量を応用する研究も盛んに行われ、基礎と応用の両面において角運動量の理解は重要となっている。そのような状況の中、固体中に普遍的に存在する素励起であるにも関わらず、フォノンの角運動量はこれまで実証されてこなかった。このような背景には、コヒーレントに制御可能な角運動量を持つフォノン系の開発が進んでこなかったという事実がある。しかし最近になって物質表面に局在して伝搬する表面弾性波(Surface Acoustic Wave: SAW)に付随するフォノンの角運動量が見直され、特にフォノンとマグノン間の結合、フォノンと光の結合における角運動量の変換現象の実証と理解が大きなテーマとなっている。

フォノンの角運動量に関わる物理現象は少しずつ発見され始めており、その一つにパルスレーザを用いた超高速消磁や有効磁場生成が挙げられる。これらは、磁化と光学フォノン間での角運動量変換(Einstein-de Haas 効果、Barnett 効果)によって発現していると考えられている。また、音響フォノンとスピン波間の角運動量変換についてもいくつかの報告が存在する。しかしながら、実験的な観測例は依然として限られており、フォノンとその他の物理系間での角運動量変換の詳細なメカニズムは解明されていない。

本研究では、フォノンとその他の物理系との角運動量変換のメカニズムを解明するため、レイリー型や縦波漏洩型の SAW に着目した。特にレイリー型の SAW は表面に局在して伝搬する弾性波であり、表面での対称性の破れに起因して、フォノンの角運動量を持つ。古典的な情報通信デバイスや気体・液体センサーに使われるなど、制御性に優れている。本研究では、SAW を用いて、以下に示す2つの研究を行った。

1. SAW 誘起のスピン波共鳴現象

2011 年、SAW に紐づく弾性体中の歪みが強磁性 Ni 薄膜中の磁化と結合し、Ni 薄膜中のスピン波を共鳴的に励起することが見出された。その結合は磁気弾性結合と呼ばれる。そ

れ以来、様々な種類の磁性薄膜を用いた系において、SAW による磁気弾性結合を介したスピン波共鳴励起の研究が行われている。一方、SAW は、物質中に歪みだけでなく、角運動量に関連した回転や渦も生み出す。それらは、歪みとは異なった形で磁化や電子スピンとそれぞれ相互作用することが示唆されている。回転と磁化間の相互作用は磁気回転結合、渦と電子スピン間の相互作用はスピン渦結合と呼ばれる。これまでに、Ni などの磁歪の大きな磁性物質では、磁気弾性結合が支配的となり、他の 2 つの相互作用が無視できることが示されてきた。一方、磁気弾性結合の小さい NiFe 合金などの物質では、それら 3 つの相互作用が競合していると考えられているが、これまでそれらを弁別して評価した報告例はひとつもない。そこで本研究では、SAW からスピン波へのエネルギー移行の周波数依存性に注目した。異なる 3 つの相互作用を適切に理論モデルに取り込むことにより、磁気回転結合とスピン渦結合の干渉によって生じる特異な周波数依存性の存在を理論的に明らかにした。また、広帯域に SAW を励起可能なデバイスを作製し、実験的にも SAW とスピン波の結合の周波数依存性を評価した。

2. 面直方向の角運動量を持つフォノンの生成

従来のフォノン研究においては高効率な励起や検出が可能なレイリー型の SAW を用いて行われてきた。しかし、その格子変位成分に起因して、レイリー型 SAW が持つ角運動量は常に試料面内方向を向いている。試料表面に対して面直方向に角運動量を持つフォノンを自在に制御することができれば、他の物理系との角運動量変換の研究に新たな舞台を提示することができる。

本研究では、縦波漏洩型の SAW(Longitudinal Leaky SAW: LL-SAW)と呼ばれる疑似的な縦波 SAW に着目し、それらを直交して重ね合わせることで、面直方向の角運動量を持ったフォノンの生成手法を考案した。まず、有限要素法シミュレーションにより、最適な物質と結晶軸方向を選定した。その後、電気測定と光学測定による SAW のイメージングを組み合わせることで、面直方向のフォノン角運動量を持った LL-SAW の重ね合わせ状態の評価に成功した。LL-SAW の重ね合わせ部分では、フォノン角運動量の極性が縞状に分布する。そして、その空間分布は、2 つの LL-SAW の相対位相を変化させることで制御することが可能である。本系はフォノンと磁化、そして光との角運動量変換を研究する上で新しい舞台となると期待できる。