

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 吉峯 功

電子のスピン歳差運動は、交換相互作用や磁気双極子相互作用などのスピン間の相互作用により、波のように伝播する。この伝播する集団的歳差運動はスピン波と呼ばれる。スピンを利用したデバイスを創出しようとする研究分野が一般にスピントロニクスと呼ばれるのに対して、その中でスピン波を利用した情報伝達や情報処理応用を目指した研究はマグノニクスと呼ばれている。スピン波の励起の方法には、マイクロ波周波数の交流磁場による方法、スピン偏極電流を注入する方法などがあるが、近年光磁気効果を介した光パルスによるスピン波の励起が注目されている。光によるスピン波の励起の利点は、電極やアンテナ等を作りつける必要が無く、集光した光パルスの照射位置や照射形状により、より自由度の大きなスピン波の制御ができる点にある。光磁気効果を介したスピン波の励起には熱的なものと非熱的なものがあり、後者は偏光による励起スピンの制御ができる点、より高速な励起ができる点などで一層の利点を持っている。

非熱的なスピン歳差運動の励起は 2005 年に Kimel らによりファラデー効果の逆過程である逆ファラデー効果により初めての実験例が報告され、励起円偏光の回転方向によりスピン歳差運動の初期位相が反転可能であることが示された。さらに 2012 年には当研究室の佐藤らにより逆ファラデー効果によりスピン波を励起し、さらにその伝播の様子をファラデー効果により 2 次元的に計測するという実験が報告された。ここでは励起されたスピン波の波数分布が、励起光パルスの空間強度分布により制御できることも示され、光パルスによるスピン波制御の大きな可能性が切り開かれた。しかしながらこの時点では、スピン波の空間波形は光スポットをスキャンし、そのファラデー回転角から計測していたため、2 次元の同時計測はできなかった。またスキャンに非常に長い時間を要するため、スピン波の空間波形の時間発展を計測することは事実上不可能であった。さらには逆ファラデー効果は円偏光により起こされるため、自由度は右回りと左回りの 2 とおりで、取りうる初期位相は 0 と π のみであった。

このような背景の下、本論文ではより上記のような制約を乗り越え、より自由度の高いスピン波の励起と伝播の制御を目指し、スピン波の空間分布の 2 次元同時計測、逆ファラデー効果に加えて逆コットンムートン効果も利用したより自由度の高いスピン波の初期位相励起、磁性体間のギャップを飛び越えるスピン波の計測、さらには複数点での光励起によるスピン波の伝播制御を行った。

本論文は 8 章から構成されている。

第 1 章では序論として本研究の背景や位置づけ、構成を述べている。

第 2 章では、まずスピン波の励起の方法に関して光以外の方法も含めて説明している。次いで、スピン波の伝播に関する静磁波の理論、スピン波の伝播の計算方法について説明している。

第 3 章では、スピン波の伝播媒質として、本研究の全般を通して使用した希土類鉄ガーネットについてその物性、磁気特性、光学特性について説明している。

第 4 章では、本研究の基盤となる計測法である、画像取り込みによるスピン波の 2 次元同時計

測について記述している。従来は集光されたレーザーパルスを探光として用い、ファラデー効果による偏光回転角を1点1点計測していた。これに対して本研究では、レーザー光を広げた平行光としてサンプル全面に照射し、偏光の回転情報をカメラにより同時計測した。カメラを用いた計測法は本研究が初めてではないが、ここではデータの処理法に改良を加え、従来法よりも1桁精度の高い、1mradの分解能を実現した。点計測法と比較すると、同等の計測精度を保ったまま計測速度を3桁高速化したことになる。これによりスピン波の空間波形の時間発展の計測を可能にした。

第5章ではスピン波の透過と反射、特に air gap を飛び越えてその先の磁性体へのスピン波のトンネルについて計測し、理論的にそのふるまいを解析した。従来のスピン波の air gap でのトンネルの計測では、スピン波の振幅の絶対値の空間分布と、作りつけた固定アンテナの位置での複素振幅が測られていただけだったが、第4章で構築した計測法により、スピン波の複素振幅が2次元平面上で測れるようになった。これにより、air gap 透過後のスピン波の振幅と位相の gap 幅依存性を計測し、理論と良く一致することを示した。

第6章では、逆コットンムートン効果による光励起により、スピン波の初期位相を0から 2π まで連続的に制御可能であることを実験的に示した。その際、当初予想していなかった光誘起磁気異方性の効果が無視できないことが明らかになり、これら2つの効果が合わさって初期位相が決定されることを示した。

第7章では第4章と第6章の成果を総合し、複数点励起によるスピン波の伝播制御を試み、その例として、2点励起によるスピン波の一方向伝搬が可能であることを実験的に示した。一般に波は、単色波であれば4分の1波長離れた2点で $\pi/2$ の位相差をもって励起を行えば、一方向には強め合いの干渉が、その反対方向には弱め合いの干渉が起こり、波の一方向伝播が実現される。しかしスピン波の場合は波束として伝搬し、周波数広がりを持つため、単純には一方向伝播は難しい。このような条件下で、最適な空間間隔、初期位相の関係をシミュレーションと実験により求め、一方向伝播の実現、その解析と共に最適化を図った。

第8章では全体のまとめと今後の展望について述べている。

以上のように伝播するスピン波の2次元同時計測法を開発し、また励起スピン波の初期位相の連続制御を実現することにより、これまでになかった自由度の高いスピン波の制御を可能とした。スピン波も他の波動と同様に、反射、屈折、干渉、回折を起こすが、本研究により光波や音波と同様の自由度でスピン波の制御と観測が行えることが明らかになった。これは今後のマグノニクス発展の基盤となり、またこれからの応用への展望を明確に示したものであると言える。その意味で本研究の成果は今後の物理工学の発展に大きく寄与することが期待される。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。