

層間磁気結合を有する磁化オルソゴナル構造のスピントルク発振

劉, 楚寒

<https://hdl.handle.net/2324/7363836>

出版情報 : Kyushu University, 2024, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :



氏 名 : 劉 楚寒

論 文 名 : 層間磁気結合を有する磁化オルソゴナル構造のスピントルク発振

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

本研究では、層間磁気結合を有する磁化オルソゴナル構造におけるスピントルク発振の研究を行い、高周波かつ安定した spin torque oscillator (STO) の開発を目的とした。

第 1 章では、2 層の磁性層の間に生じる STO の発見と実証・開発の経緯を踏まえ、発振素子として期待される特徴、すなわち小型・低消費電力・周波数可変な性能について説明した。さらに、STO を活用するためには、従来の GHz 帯からサブ THz 領域まで周波数を上げる必要があること、本研究では具体的に 2 つのアイデアを導入することを説明した。一つ目は、2 層の磁性層に働く層間磁気結合である。エネルギーを高次展開した場合の一次項である Bilinear 結合係数 A_{12} と、二次項である Biquadratic 結合係数 B_{12} の現象論的な意味と制御方法を詳述した。二つ目は、磁化容易軸が膜面方向と膜面垂直である 2 層の磁性層を用いた、磁化が直交するように積層するオルソゴナル構造である。磁化が平行である場合に比べ、低いエネルギーでスピントルクを伝播できることに着目した。

第 2 章では、本研究で使用した各種実験装置とその原理について説明した。

第 3 章では、Bilinear 結合係数 A_{12} と Biquadratic 結合係数 B_{12} の精度の高い見積もりを行い、第一のアイデアの検証する基盤を確立した。オルソゴナル構造における層間磁気結合係数の報告例はこれまで存在せず、その見積もり手法自体が新しい研究テーマである。本章では、以下の 3 つの方法を用いて見積もり精度を検証した。

1. 磁化曲線からの算出

磁化が飽和する飽和磁場と層間磁気結合の関係式を導出し、飽和磁場を求めるために 4 T という高磁場を印加する為 Superconducting Quantum Interference Device (SQUID) を用いて磁化曲線を測定した。Top 層および Bottom 層の飽和磁化と、磁場を面直方向に掃引した場合の Top 層の飽和磁場を求め、関係式から Bilinear 結合係数 A_{12} と Biquadratic 結合係数 B_{12} を求めた。

2. 強磁性共鳴 (Ferromagnetic Resonance : FMR) からの算出

1. の方法では飽和磁場が正確に求められない懸念が浮上したため、FMR により発振周波数の磁場依存性を測定し、Kittel の式でフィッティングする事で Top 層の飽和磁化および試料の飽和磁場を算出した上で、関係式から Bilinear 結合係数 A_{12} と Biquadratic 結合係数 B_{12} を求めた。

3. FMR シミュレーション

2. の方法では高磁場領域での周波数の線形性が担保されなかったため、FMR シミュレーションを用いて磁場-周波数曲線のフィッティングを行い、Biquadratic 結合係数 B_{12} を最適化した。

その結果、3 つの方法による Bilinear 結合係数 A_{12} と Biquadratic 結合係数 B_{12} の差は絶対値で 2.5% と 4.8% であり、精度の高い見積もりが達成され、その手法の妥当性が確認された。

第 4 章では、最終的な目的である STO の発振周波数をマイクロマグネティックシミュレーション

により求めた。以下の観点で ST0 の挙動を調べた。

4. ST0 発振周波数は、飽和磁化が小さいほど大きい。飽和磁化の小さい順に Ni、Ni₈₀Fe₂₀、Co₉₀Fe₁₀ について調べた。発振周波数は、層間磁気結合が無い場合、各磁性材料で 0-11GHz、0-15GHz、0-26GHz だったが、Bilinear 結合がある場合には 0-62GHz、0-45GHz、0-41GHz となり、Biquadratic 結合がある場合には 0-60GHz、0-40GHz、0-37GHz となり、調整範囲が大幅に拡大した。詳しい解析の後、層間磁気結合の Bilinear 結合係数 A_{I2} と Biquadratic 結合係数 B_{I2} が、オルソゴナル構造の場合にはスピントルクを抑制する方向の有効磁場を発生し、磁化発振の均衡状態が広く維持される結果、到達する発振周波数が高くなるという事を解明した。

5. Bilinear 結合の場合、周波数-電流密度曲線は連続的に変化するのに対し、Biquadratic 結合の場合は電流密度が増加するにつれて周波数に跳変が生じることが確認された。そこで、Biquadratic 結合がスピン波モードに及ぼす影響について調査を行い、その結果、Biquadratic 結合の下では二つのスピン波モードが励起されることが明らかとなった。この結果を基に、Biquadratic 結合がスピン波モードの励起に与える影響について解析を行った。Biquadratic 結合が存在する場合、ST0 の発振モードには、Vortex モードと線状の定在波モードの二種類が現れることが確認された。これらのモードの発生機構についても考察した。これは、円盤のエッジと中心部のエネルギーの違いにより、スピン波がエッジ部分で最初に励起され、周回運動を行うことが原因であると結論付けた。さらに、電流を増加させることで励起速度が上昇し、反対方向に進む波が干渉し、定在波を形成することも明らかにした。

第 5 章では、本研究の成果を総括した。