

ホモダイン検波法による  
スピントルク検出の高精度化に関する研究

2022年2月

洞口 泰輔

報告番号	① 乙 第	号	氏 名	洞口 泰輔
主 論 文 題 名： ホモダイン検波法によるスピントルク検出の高精度化に関する研究				
(内容の要旨) スピントルクとは、伝導電子と局在電子の間でスピン角運動量を授受することにより、強磁性体の磁化を回転させる機構であり、高速・省電力な不揮発磁気メモリや論理演算素子への応用が期待されている。このスピントルクによるナノスケール磁性体の磁化ダイナミクス研究は、非平衡スピンが緩和する長さ以下(sub- $\mu\text{m}$ ~nm)での微細加工技術とともに発展し、様々なスピントルク測定法に应用されてきた。しかし、スピントルクを生成する電流は、Ampere の法則にしたがう磁場も発生させ、両者が磁化ダイナミクスを励起するため、常に「磁場トルクとスピントルクの分離」問題が付きまとう。本博士論文では、広く用いられるホモダイン検波法によるスピントルク検出に焦点を当て、その整流電圧スペクトルに含まれる様々なアーティファクト信号を定量化することにより、その高精度化に関する研究を行った。 まず、空間的に非一様な磁気構造中の電流が作るスピントルクの高精度評価を実証した。様々なスピントルク現象の理解に不可欠な非断熱スピントルクを見積もるため、ひょうたん型に微細加工した Ni81Fe19 薄膜中に閉じ込めた磁気渦対の連成振動をホモダイン検波法により検出した。交流電流を与えることにより、スピントルクと磁気トルクの両方に由来する磁気渦コア対の旋回運動を励起した。ひょうたん型試料を用いることにより、磁気渦対に含まれるダイヤモンド型の磁区が試料中央にピン止めされ、左右対称な磁気渦を形成することに成功した。これは、スピントルクと磁場トルクの分離測定において不可欠な4つの連成振動モードを実現する上で極めて重要な成果である。スピントルクと磁場トルクは、固有周波数の異なる連成振動モードと結合するため、両者の整流電圧スペクトルを分離測定できる。実際、ノンコリニア磁気構造に発生するスピントルクの微視的理論と定量的に一致するスピントルクを測定することに成功した。 次に、強磁性体と非磁性体からなる二層膜におけるコリニア磁気構造に作用するスピントルクを測定する最もよく用いられる方法の一つであるスピントルク強磁性共鳴(ST-FMR)法の高精度化について研究した。一般にスピントルク効率 $\xi_{\text{FMR}}$ は、ST-FMR スペクトルの対称・反対称成分の強度比から見積もられる。しかし、ST-FMR を誘引する交流電流の分布が非対称になると面直磁場成分が発生し、これが対称・反対称成分の強度比に影響を与えるため、 $\xi_{\text{FMR}}$ の決定において不確かさを生む。本研究では、ST-FMR スペクトルの外部磁場印加角依存性を測定し、その角度依存性を詳細に分析することにより、交流電流分布に非対称性がある場合でも $\xi_{\text{FMR}}$ を高精度に決定できることを実証した。さらに、10 GHz 以下の低周波領域において ST-FMR スペクトルの強度が大きく増大する効果を発見した。この効果は、これまでに ST-FMR 法で報告されているどのタイプのアーティファクトとも定量的に一致しないことが分かった。この結果は、高精度な $\xi_{\text{FMR}}$ の決定には周波数依存性の測定も不可欠であることを示す。最後に、本研究で開発した高精度スピントルク検出法を用いて、ナノメータ厚の Si/Al 傾斜材料における全く新しいスピン流生成を実証した。スピン軌道相互作用(SOI)が弱い物質から構成される傾斜材料において、代表的な強 SOI 材料である Pt の3倍以上のスピントルクが発生することを発見した。このスピン流発生効率は、Si/Al 傾斜幅の減少に伴い増加すること、傾斜幅ゼロの界面では急減することが分かった。それに加え、SOI に由来するスピンホール効果とは異なり、電流とスピン流の変換が極めて非相反的になることを確かめた。これらは、Si/Al 傾斜材料において全く新しい機構に基づくスピン流生成が実現していることを示唆しており、スピントロニクス材料の高性能化に大きく貢献する結果である。				

Thesis Abstract

No. \_\_\_\_\_

Registration Number	<input checked="" type="checkbox"/> “KOU” <input type="checkbox"/> “OTSU” No. _____ *Office use only	Name	Horaguchi Taisuke
Thesis Title A study on high-precision measurement of spin torque by a homodyne phase detecting technique			
Thesis Summary <p>The spin torque (ST), which leads to magnetization dynamics via spin angular momentum transfer between conduction electron and localized electron, is a potential candidate for practical applications to high speed and low power consuming spintronic devices. The study on the magnetization dynamics excited via ST in nanoscale ferromagnets has been developed along with an improvement of microfabrication techniques, and a variety of methods to measure the ST have been proposed. However, an electric current used to generate the ST simultaneously produces a magnetic field according to the Ampere's law. As a consequence, in order to evaluate the ST precisely, we need to separate the magnetic field torque. In the doctoral thesis, we investigated on high-precision measurement of ST by a homodyne phase detecting technique with an evaluation of various artifacts in the rectified voltage spectrum quantitatively.</p> <p>Firstly, demonstrated a high precision detection of the ST caused by an electric current in a non-collinear magnetic configuration. We detected the coupled oscillation of magnetic vortices in Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub> gourd-shaped thin films by a homodyne phase detecting technique to evaluate the nonadiabatic ST, which is important for understanding a variety of ST-related phenomena. We excite a translational mode in coupled magnetic vortices by applying an alternating electrical current that causes both ST and magnetic field torque. In the gourd-shaped thin film, we confirmed that a highly symmetric pair of magnetic vortices was successfully formed by pinning a diamond-shaped magnetic domain at the center of the sample. This enables to realize four modes of coupled oscillation, which are significant for separating the ST from the magnetic field torque. Since the coupled oscillation modes due to the ST and magnetic field torque have totally different eigenfrequencies, the coupled oscillation spectrum can be used to evaluate the STT. Indeed, we succeeded to evaluate the nonadiabatic ST, whose amplitude was consistent with the microscopic theory of the STT.</p> <p>Next, we improved the precision of ST-ferromagnetic resonance (FMR) method, which is one of the most common methods to evaluate the ST in a collinear magnetic configuration in metallic bilayers consisting of ferromagnetic and nonmagnetic materials. In general, the ST efficiency (<math>\zeta_{\text{FMR}}</math>) can be evaluated from the amplitude ratio between symmetric and anti-symmetric components of the ST-FMR spectrum. However, the ratio is also affected by an unnecessary magnetic field owing to the asymmetric alternating current flow used to excite the ST-FMR. In this study, we demonstrated that <math>\zeta_{\text{FMR}}</math> could be precisely evaluated from the full-angular dependence of the ST-FMR spectrum even though the distribution of alternating current flow was highly asymmetric. Moreover, we also found that the ST-FMR was strongly enhanced in a low frequency region below 10 GHz. From the quantitative comparison to conventional theories for artifacts in the ST-FMR, the frequency-dependent artifact was not attributed to the artifacts which have been reported so far. Namely, the frequency dependence of the ST-FMR should be also examined to determine <math>\zeta_{\text{FMR}}</math> precisely.</p> <p>Finally, we demonstrated a novel spin current generation in nanometer-thick Si/Al gradient materials by means of the high precision detection of ST developed. The gradient material could produce a ST over three times as large as that of platinum, despite the weak spin orbit interaction (SOI) of these compositions. The ST efficiency could be improved by decreasing the thickness of the gradient, while a sharp interface was not found to increase the ST. In addition, we also found that the conversion between electric- and spin-currents showed a strong nonreciprocity. The effect cannot be associated with the conventional mechanism of spin current generation via SOI. Namely, these findings suggest an existence of novel type of spin current generation in the Si/Al gradient material and will pave the way to improve the spintronic materials.</p>			