

2026年1月8日

電気・電子情報工学専攻	学籍番号	第 173222 号	指導教員	中村 雄一
氏名	高口 拓己			内田 裕久

論文内容の要旨 (博士)

博士学位論文名	磁性ガーネットの動的磁化挙動解析とその磁気デバイス応用
---------	-----------------------------

(要旨 1,200 字程度)

情報通信技術の発展に伴い、高周波数帯で低消費電力動作する小型のデバイスが求められている。この実現には、高速応答性と不揮発性を兼ね備えた磁性デバイスが適すると注目されている。特に最近では、絶縁性酸化物のため安定な磁性ガーネット材料のデバイス応用が広く検討されている。磁性ガーネットは、優れた磁気・磁気光学特性を有する軟磁性体であり、光や高周波信号の変調に適していることが古くから知られている材料であるが、磁気異方性エネルギーが大きく、磁壁幅が10 nm台と小さい。このため、デバイス応用のために必要な磁化挙動のシミュレーションを行おうとすると、モデリングに必要なメッシュサイズが微細化し、膨大な計算時間が必要となる課題があった。そこで、本研究では、クラスタシステムによる大規模並列計算とマイクロ・マグネティクス計算手法を組み合わせることで計算時間を短縮し、磁性ガーネットの動的磁化挙動解析を磁気デバイス開発に適用することを目的とした。

まず、磁性ガーネットの静的磁化挙動を再現するために、隣接する磁気モーメント間の結合を決定する交換結合定数の測定を行った。従来の交換結合定数の測定法は、磁壁幅の直接観察や、10 Tを超える高磁場を必要とするなどの難点があり、10 nm台の磁壁幅を持つ磁性ガーネット膜への適用が困難であった。そこで、偏光顕微鏡で観察した磁気ドメイン周期値を大規模計算で同定する新しい測定手法を開発した。測定対象には、イオンビームスパッタ法で成膜した垂直磁気異方性をもつ膜厚130 nmのセリウム置換型イットリウム鉄ガーネット (Ce:YIG) 膜を選んだ。計算モデルサイズは十分な数の磁気ドメインが計算可能な $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m} \times 130 \text{ nm}$ とした。磁気ドメイン周期のバラツキを考慮すると試料の交換結合定数は3.8から4.4 pJ/mの範囲にあると分かった。

次に、得られた交換結合定数を用いて、磁性ガーネットの静的磁化挙動解析を行った。膜全体で均一な磁気異方性エネルギーを有するモデルで計算を行った場合は、保磁力が実験結果よりも65倍大きくなり、磁化特性に大きな差が見られた。そこで、膜厚を変化したCe:YIG膜を複数準備し、磁気異方性エネルギーの膜厚依存性を測定したところ、膜厚が薄くなるほど磁気異方性エネルギーが大きくなっていることが分かった。この膜厚方向の不均一な磁気異方性エネルギー分布を計算モデルに組み込んで再計算した結果、保磁力は13分の1となり、計算結果が実験結果と近くなった。磁気デバイス応用を想定し、磁性ガーネット膜に加える磁界パルスの大きさと幅を変化した際の動的磁化挙動を計算した。巨大な高周波磁界パルスに対して非線形な高周波磁化応答が発生することを確認し、この非線形応答に基づく新規高周波磁気デバイスを提案した。以上の結果をもって、本研究は、磁性ガーネット膜の動的磁化挙動解析を達成し、その応用として新規磁気デバイスを提案した。

Date of Submission (month day, year) : January 8, 2026

Department of Electrical and Electronic Information Engineering	Student ID Number	D173222	Supervisors	Yuichi Nakamura Hironaga Uchida
Applicant's name	Takumi Koguchi			

Abstract (Doctor)

Title of Thesis	Dynamic Magnetization Analysis of Magnetic Garnet Films and Their Application to Magnetic Devices
-----------------	---

Approx. 800 words

With the advancement of information and communication technology, the demand for compact devices that operate at high frequencies with low power consumption is increasing. Magnetic devices, which combine fast response and non-volatility, are considered promising candidates to meet these requirements. In recent years, magnetic garnet materials have been widely investigated for device applications due to their stability as insulating oxides. Magnetic garnets are soft magnetic materials possessing excellent magnetic and magneto-optical properties, and have long been recognized as suitable for modulating light and high-frequency signals. However, these materials exhibit large magnetic anisotropy energy and narrow domain wall widths on the order of 10 nm. Consequently, when performing magnetization simulations necessary for device applications, the required mesh size becomes extremely fine, resulting in enormous computational time. Therefore, the objective of this study was to reduce computational time by combining large-scale parallel computing on cluster systems with micromagnetic simulation methods, thereby enabling dynamic magnetization behavior analysis of magnetic garnets for magnetic device development.

To reproduce the static magnetization behavior of magnetic garnets, the exchange stiffness constant, which determines the coupling between adjacent magnetic moments, was measured. Conventional methods for measuring exchange stiffness constants face challenges such as requiring direct observation of domain wall widths or high magnetic fields exceeding 10 T, making their application difficult for magnetic garnet films with domain wall widths on the order of 10 nm. Therefore, a novel measurement method was developed to identify the magnetic domain periodicity observed by polarized light microscopy using large-scale computation. For the measurement, a 130 nm thick cerium-substituted yttrium iron garnet (Ce:YIG) film with perpendicular magnetic anisotropy, deposited by ion beam sputtering, was used. The computational model size was set to $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m} \times 130 \text{ nm}$, enabling the calculation of a sufficient number of magnetic domains. Considering the variation in magnetic domain periodicity, the exchange stiffness constant was determined to be in the range of 3.8 to 4.4 pJ/m.

Static magnetization behavior analysis was then performed using the obtained exchange stiffness constant. When the calculations assumed uniform magnetic anisotropy energy throughout the film, the coercivity was 65 times larger than the experimental results, revealing a significant discrepancy. Therefore, multiple Ce:YIG films with varying thicknesses were prepared, and the thickness dependence of magnetic anisotropy energy was measured. The results revealed that the magnetic anisotropy energy increases as film thickness decreases. When this non-uniform magnetic anisotropy energy distribution in the thickness direction was incorporated into the computational model, the coercivity decreased to one-thirteenth of the previous value, bringing the calculated results into better agreement with the experimental results.

Assuming magnetic device applications, dynamic magnetization behavior was then analyzed by varying the magnitude and width of magnetic field pulses applied to the magnetic garnet film. Through these simulations, nonlinear high-frequency magnetization responses to intense high-frequency magnetic field pulses were confirmed. Based on this nonlinear response mechanism, a novel high-frequency magnetic device was proposed. In conclusion, this study achieved dynamic magnetization analysis of magnetic garnet films and proposed novel magnetic devices as its applications.