

コプレーナ導波路を用いた磁性ガーネット薄膜の磁気共鳴の評価

Magnetic resonance of garnet films observed by coplanar waveguides

○齊藤日菜¹, 笠谷雄一², 羽柴秀臣³, 柴田国明⁴, 芦澤好人⁴, 大貫進一郎⁵, 塚本新⁴, 中川活二⁴*Hina Saito¹, Yuichi Kasatani², Hideomi Hashiba³, Kuniaki Shibata⁴, Yoshito Ashizawa⁴, Shinichiro Ohnuki⁵, Arata Tsukamoto⁴ and Katsuji Nakagawa⁴

A coplanar waveguide (CPW) is designed for observing the magnetic resonance of magnetic garnet films. The magnetic garnet film is fabricated by the metal organic decomposition (MOD) method and The CPW is made on the film by electron beam lithography (EBL) and lift-off technique. The magnetic resonance of the film is confirmed by using vector network analyzer. From the measurement of the reflectional S parameter with changing the applied microwave frequency, the effective Gilbert damping factor of the magnetic garnet film is estimated to be 0.073.

1. はじめに

酸化物磁性体中のスピン波は電流を伴うことなく伝搬するため、その位相状態を用いて情報処理を行うことでジュール熱を抑制した省エネルギー演算素子への応用が期待されている。酸化物フェリ磁性体である磁性ガーネットはスピン波のダンピング定数が小さいことが知られている^[1]。我々は様々な元素を置換した磁性ガーネットを用いて、スピン波の伝搬特性の高機能・高性能化を目指している^[2]。スピン波伝搬特性の評価には、結晶性の良い単結晶液相成長(LPE)による磁性ガーネットを用いることが最適と考えられるが、特性評価のための複数種類の薄膜作製は簡単ではなく、組成の変更が比較的容易である有機金属分解 (MOD)法で基礎特性を評価する手法を採用した。ここでは MOD 法で試作した磁性ガーネット薄膜の磁気共鳴のダンピング定数評価のために、元素置換した磁性ガーネット薄膜に高周波磁場を印加するコプレーナ導波路 (CPW)を設計・作製し、磁性ガーネット薄膜の磁気共鳴現象を観測した。

2. 実験方法

2.1. 電子線リソグラフィを用いたコプレーナ導波路の設計と作製

CPW 先端部の設計図を Figure 1 に示す。ベクトルネットワークアナライザ (VNA)から CPW 先端に効率よく電流を誘導するために、VNA との接続部分から先端部分にかけて徐々に線の幅が細くなる形状にした。CPW 先端部は先行研究^[3]の形状を参考にし、Cu 線幅を 2.1 μm , Cu 線間の距離を 1.4 μm とした。CPW は電子線リソグラフィにより作製した。まず、薄膜に高感度レジスト剤 MMA, 希釈レジスト剤 (ZEP520A : ZEP アニソール = 1 : 2)をスピコート塗布し、露光・現像処理を行った。その後、Ta を 5 nm, Cu を 100 nm, 最後に Au を 20 nm スパッタし、リフトオフを行った。作製条件の調査のため、ドーズ量を 150, 200, 250, 300, 350 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ と変化し、形成した CPW を走査型電子顕微鏡 (SEM)により観察した。

2.2. コプレーナ導波路を用いた磁性ガーネット薄膜の磁気共鳴の評価

CPW を用いて磁気共鳴現象を評価する場合、磁性ガーネット薄膜に直流磁場を印加し、CPW に高周波信号を掃引する。磁性薄膜中の磁気モーメントが CPW により生じる高周波磁場の周波数と共鳴 (磁気共鳴)するとき磁性薄膜の透磁率が変化する。磁気共鳴による磁性薄膜の透磁率の変化は入力反射係数 S_{11} の変化として観測することができる。CPW と平行な薄膜面内方向に印加した直流磁場を 0.5~5.9 kOe, 高周波磁場の周波数を 1~10 GHz の範囲で変化したときの S_{11} を観測することで磁気共鳴を評価した。



Figure 1. Design of the coplanar waveguide

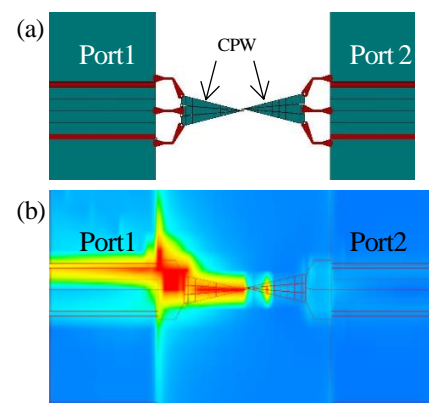


Figure 2. Electromagnetic field analysis of the coplanar waveguide (a) Simulation model (b) Magnetic field mapping

3. 実験結果

3.1. 電子線リソグラフィを用いて作製したコプレーナ導波路

設計した CPW 対を Figure 2 (a) のように配置し、Port 1 側の CPW に高周波信号を掃引した場合の電磁界シミュレーションによる磁場強度マッピングを Figure 2 (b) に示す。これより、高周波信号を掃引した CPW 先端に磁場が集中することがわかる。また、実際に電子線リソグラフィを用いて作製した CPW は、ドーズ量 300, 350 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ のとき設計通りにできていることを確認した。ドーズ量 300 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ の CPW の SEM 像を Figure 3 に示す。

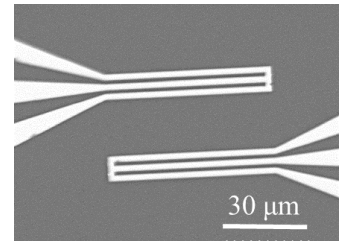


Figure 3. SEM planer view image of the coplanar waveguides

3.2. コプレーナ導波路を用いた磁性ガーネット薄膜の磁気共鳴の評価

MOD 法を用いて作製した $\text{Y}_2\text{Bi}_1\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜上に CPW を作製し、磁気共鳴の評価を行った。直流磁場 5.9 kOe における S_{11} を周波数 1~6 GHz の高周波磁場に対して Figure 4 に示す。 S_{11} は高周波磁場の周波数 3.95 GHz のとき極大、4.56 GHz のとき極小となった。これらの周波数の中間周波数が磁気共鳴周波数 f_0 となる。また、 S_{11} が極大、極小となる周波数の差 Δf と f_0 より、磁気共鳴のダンピング定数 α は以下の式で表される^[4]。

$$\alpha = \Delta f / 2f_0 \quad (1)$$

式(1)より算出した $\Delta f / 2f_0$ を直流磁場に対して Figure 5 に示す。これより、MOD 法を用いて作製した $\text{Y}_2\text{Bi}_1\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜の α は 0.073 であった。一方、LPE 法で作製した $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜の α は 0.4×10^{-4} ^[5] である。MOD 法で作製した薄膜の α が大きい原因として MOD 法で作製した薄膜は LPE 法で作製した薄膜よりも粒界が大きいことや薄膜内の結晶構造が不均一であることが考えられる。今後、結晶性向上も目指して MOD 法による試作を検討する。

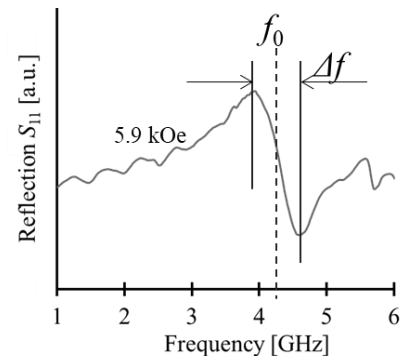


Figure 4. Frequency dependence of S_{11} in experimental magnetic field of 5.9 kOe

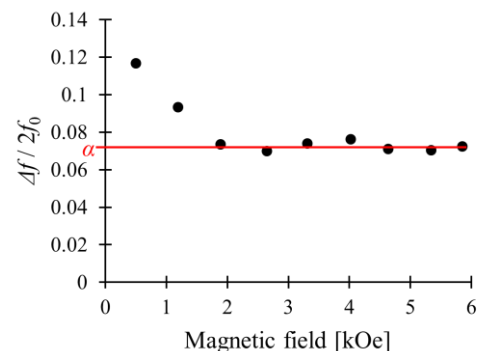


Figure 5. Experimental field dependence of $\Delta f / 2f_0$

4. まとめ

MOD 法で試作した磁性ガーネット薄膜の磁気共鳴のダンピング定数評価のために、CPW を設計・作製し、直流磁場を 0.5~5.9 kOe、高周波磁場の周波数を 1~10 GHz の範囲で変化させたときの S_{11} を観測した。それぞれの直流磁場における磁気共鳴周波数 f_0 と S_{11} が極大、極小となる周波数の差 Δf より磁気共鳴のダンピング定数 α を算出した。MOD 法を用いて作製した $\text{Y}_2\text{Bi}_1\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜の α は 0.073 であり、LPE 法で作製した $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜の α の約 2×10^3 倍であった。これは、今回 MOD 法で作製した薄膜の結晶性が悪いことが原因と考えられる。

謝辞

本研究の一部は、平成 25~29 年度文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業 (S1311020) の助成を受けた。

参考文献

- [1] A. A. Serga, A. V. Chumak, B. Hillebrands : “YIG magnonics”, J. phys. D: Appl. Phys., 43, 264002, 2010.
- [2] H. Saito, D. Naito, Y. Ashizawa, and K. Nakagawa : “Magnetic characteristics of $\text{Y}_{1.5}\text{Bi}_1\text{R}_{0.5}\text{Fe}_4\text{Ga}_1\text{O}_{12}$ ($R=\text{Dy}, \text{Eu}$) films fabricated on glass substrates by metal organic decomposition method”, Digests of Magnetics and Optics Research International Symposium 2015, Mo-P-09, 2015.
- [3] H. Yu, O. Kelly, V. Cros, R. Bernard, P. Brandl, R. Huber, I. Stasinopoulos, D. Grundler : “Magnetic thin-film insulator with ultra-low spin wave damping for coherent nanomagnonics”, Scientific Reports, 4, 6848, 2014.
- [4] 太田恵造:「磁気工学の基礎 II」, 共立出版株式会社, pp.345, 1973.
- [5] C. Dubs, O. Surzhenko, R. Linke, A. Danilewsky, U. Brückner, and Jan Dellith : “Sub-micrometer yttrium iron garnet LPE films with low ferromagnetic resonance losses”, J. phys. D: Appl. Phys., 50, 204005, 2017.