

透磁率時間変調メタマテリアルを用いたマイクロ波の周波数変換

児玉俊之¹、黒澤裕之²、大野誠吾³、菊池伸明⁴、畑山正寿⁴、岡本聡^{4,5}、富田知志^{1,3}

(¹東北大高教機構、²京都工繊大電子、³東北大院理、⁴東北大多元研、⁵東北大 CSIS)

Microwave Frequency Conversion Using Time-Varying Permeability Metamaterials

Toshiyuki Kodama¹, Hiroyuki Kurosawa², Seigo Ohno³, Nobuaki Kikuchi⁴, Masatoshi Hatayama⁴,

Satoshi Okamoto⁴, Satoshi Tomita^{1,3}

(¹IEHE, Tohoku Univ., ²Kyoto Inst. Tech., ³Dept. of Physics, Tohoku Univ., ⁴IMRAM, Tohoku Univ.,
CSIS, Tohoku Univ.)

はじめに

第 6 世代移動通信システムの社会展開のためにはミリ波やテラヘルツ (THz) 光の小型でチューナブルな THz 光源が必要不可欠である。透磁率が時間領域で変化する媒質を通過した電磁波は、周波数に変調を受けると期待される。そこで我々は透磁率を変調させる時間変調メタマテリアルを用いて、マイクロ波の周波数を変換し、ミリ波や THz 波を得ることを目指している¹⁾。本報告では数値シミュレーションの結果を示す。

シミュレーション条件

電磁場計算には COMSOL Multiphysics と RF モジュールを用いる。長方形の 2 次元モデルで、長手方向に空気層、透磁率時間変調メタマテリアル(MM)を想定した媒質、空気層と 3 つの層を構成する。平面波が片方の空気の層から入射され、透磁率時間変調 MM を通過し、他方の空気の層へと伝搬する。短手方向の幅は 2.5 mm である。空気の層の厚さは入射するマイクロ波の波長の 4 分の 1 である。マイクロ波の電場は短手方向に偏光させる。マイクロ波が入射または出射する空気の層と外部との境界は散乱境界条件を与える。短手方向の外部との境界面は周期境界条件を与える。透磁率時間変調 MM を想定した媒質の比透磁率を $\mu_r = 1 + A_0\{1 - \cos(2\pi f_{\text{mod}} \times t)\}$ として与える。ここで f_{mod} は変調周波数であり、変数 t は時間である。透磁率時間変調 MM を通過して空気層から出射するマイクロ波の電場強度を計算した。時間波形を得るためにマイクロ波の入射時刻を 0 として 80 nsec までの計算を実施した。

結果と考察

図 1 に計算結果の一例を示す。入射するマイクロ波の周波数は 10 GHz とした。比透磁率の振幅 A_0 は 100 とした。変調周波数 f_{mod} は 2 GHz とした。透磁率時間変調 MM の厚さは 0.1 mm とした。挿入図は時間波形である。これをフーリエ変換して得られた周波数スペクトルを示している。周波数分解能は約 0.01 GHz である。入射波と等しい周波数 10 GHz のマイクロ波の信号強度が最も大きい。一方で 10 GHz の高周波側と低周波側にも信号が得られている。これらの信号は 10 GHz から離れるにつれて強度が低下していることが分かる。またこれらの信号は周期的に現れており、周期間隔は 2 GHz である。これは透磁率の変調周波数とよく一致している。この結果は、透磁率時間変調 MM によりマイクロ波の周波数変換が生じていることを示している。発表では実験結果も紹介する。

謝辞

金森義明博士との有益な議論に感謝します。本研究は JST-CREST (JPMJCR2102) によって支援されています。

参考文献

- 1) 菊池伸明 他, 第 69 回応用物理学会春季学術講演会, 22p-P01-7

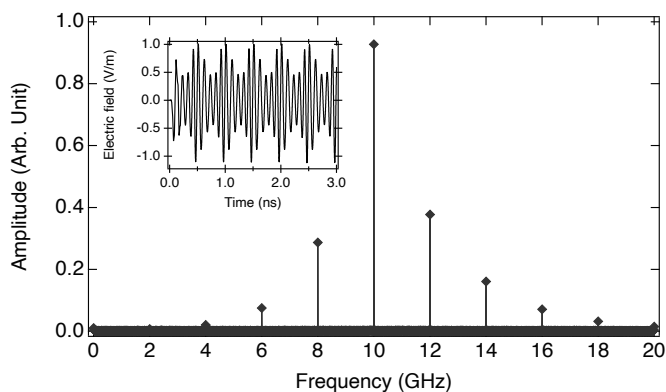


Fig. 1 : Frequency-domain spectrum of transmitted microwave through a time-varying permeability medium. (Inset: Time-domain waveform)

ディスク状微細加工磁性ドットアレイによる高周波電磁波吸収材特性

彭牧天¹、大沼智幸¹、畑山正寿¹、菊池伸明¹、田丸慎吾²、岡本聡^{1,3}

(¹ 東北大多元研、² 産総研、³ 東北大 CSIS)

High-frequency electromagnetic wave absorption in micropatterned magnetic disk array

M.Peng¹, T.Onuma¹, M.Hatayama¹, N.Kikuchi¹, S.Tamaru², S.Okamoto^{1,3}

(¹IMRAM, Tohoku Univ., ²AIST, ³CSIS, Tohoku Univ.)

はじめに

第5世代移動通信方式(5G)の普及によって、より高速な通信が実現できる一方、高周波ノイズが課題となる。ノイズ抑制シート(NSS)は電磁干渉問題の対策部品として用いられており、5G用途では電磁波吸収特性を従来のUHF帯(300MHz ~ 3.0GHz)からSHF帯(3GHz - 30GHz)へ高周波化する必要がある。NSSは、扁平磁性金属とポリマーの複合構造であり、その電磁波吸収特性は扁平磁性粉内部の磁気構造が渦状磁化状態(磁気Vortex)となっており、特徴的なバイモデル型透磁率スペクトルが説明できることが分かった。本研究では、磁気Vortexモデルに基づく解析の検証を目的として、微細加工されたディスク状磁性ドットアレイを作製し、その透磁率特性を評価した。

実験方法

本研究では、電子線微細加工を用いて、カプトンフィルム上にディスク状FeSiドットアレイを作製した。FeSiドットの直径は $D = 2 \sim 20 \mu\text{m}$ で、厚みは $t = 200 \text{ nm}, 400 \text{ nm}$ とした。透磁率スペクトルはトランス結合型透磁率測定法(以下TC-Perm)²⁾を用いた。

TC-Permでは外部磁場印加中の透磁率測定が可能であり、ここでは $\mu_0 H_{dc} = 0 \sim 200 \text{ mT}$ を印加した。周波数は10 MHz ~ 40 GHzとした。

実験結果

Fig.1に磁性ドットアレイ($t = 200 \text{ nm}, D = 10 \mu\text{m}$)の虚部透磁率スペクトルを示す。これまでの扁平磁粉を用いたNSSと同様にバイモデル型透磁率スペクトル³⁾となっており、磁気Vortex状態がその起源であることを改めて確認した。Fig.2に磁性ドットアレイ($t = 200 \text{ nm}$)の高周波側ピーク f_{HR} 及び低周波側ピーク周波数 f_{LR} の直径依存性を示した。磁気Vortex理論に基づいて計算されるGyrotropic mode⁴⁾とFlux closure modeでの計算結果をそれぞれ赤線と青線で示した。 f_{HR} と f_{LR} はドット径の減少に伴い高周波側にシフトしており、NSSの高周波対応は磁性粉の直径を下げるのが有効であることが示される。また f_{LR} はGyrotropic modeの計算値とほぼ一致しているが、 f_{HR} はFlux closure modeよりも低い値となっている。この違いはドット形状が理想的な円筒形状からのズレなどが原因と考えており、今後詳細に検討する。

参考文献

- 1) 五十嵐 利行、東北大学博士論文、2021
- 2) S. Tamaru, et al. IEEJ Trans. FM, Vol.141, No.5, 2021
- 3) J. Neige, et al. Appl. Phys. Lett., vol. 102, p. 242401, 2013.
- 4) B. A. Ivanov, C. E. Zaspel, J. Appl. Phys. **95**, 7444 (2004)

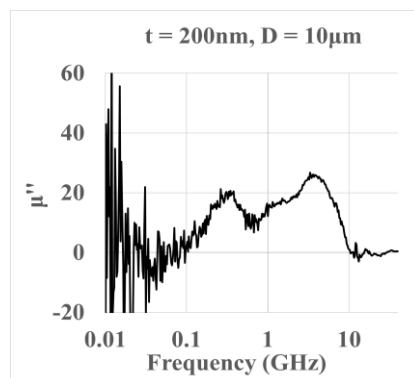


Fig.1 Imaginary part of permeability of magnetic dot array

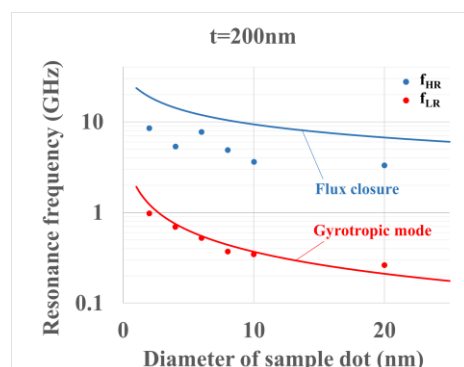


Fig.2 Peak frequencies of f_{HR} and f_{LR} of magnetic dot array

微粒子試料における異方性磁場の定量的評価手法の検討

窪田寛久、岸本幹雄、柳原英人
(筑波大学)

Study of quantitative evaluation methods for anisotropic magnetic field in magnetic particles

H.Kubota, M. Kishimoto, and H. Yanagihara
(Univ. of Tsukuba)

はじめに

配向性の低い微粒子や粉末形態の磁性材料においては、一般的に磁気異方性定数や異方性磁場の定量的な評価は困難である。従来から粉末試料や多結晶試料の磁気異方性評価手法として磁気トルクの回転ヒステリシスを用いる方法[1]や高磁場での磁化曲線を用いる方法[2]が知られているが、これらの手法で得られる磁気異方性定数の比較や手法を適用できる条件などが系統的に十分整理されているとは言い難い。そこで本研究では、磁気異方性が既知の粉末材料について、静磁場配向の度合いを変化させた試料を用意し、これら2つの手法により磁気異方性の解析を行い、評価方法の定量的な比較を試みた。

実験方法

磁性材料として、市販の針状 γ - Fe_2O_3 微粒子を用いた。共重合樹脂(ソルバイン TAO)と MIBK 溶媒を攪拌して作製した 20 wt% のバインダー溶液 10 g と $\phi=5.0$ mm のビーズ 60 g、 γ - Fe_2O_3 を 1.0 g、ボールミルを用いて十分時間攪拌して分散させた。試料をプラスチックフィルム上に薄く塗り、印加する磁場や時間を調整して配向させた。調整した試料を振動試料型磁束計 (VSM) による磁化測定を行い、角型比 (M_r/M_s) を算出した。磁気異方性については、磁気トルク測定を行い、各磁場で得られた回転ヒステリシスを用いる手法と振動試料型磁力計等による磁化測定を行い、高磁場での飽和漸近則 (LAS) を用いる二つの手法で異方性磁場を見積もった。

実験結果

Fig.1 に各試料の磁化測定結果を示す。無配向試料(角型比 $M_r/M_s = 0.5$)に対し、印加する磁場や時間が増加すると角型比は増加し、最大で $M_r/M_s = 0.79$ を示した。形状磁気異方性が支配的であるとすると、針状 γ - Fe_2O_3 の異方性磁場は 2.5 kOe である。Fig.2 に回転ヒステリシス損失 W_r の磁場変化を示す。ピークを越えた後の変曲点から直線的に $W_r=0$ に外挿し、x 切片から異方性磁場 H_A を決めた。各試料の角型比に関わらず $H_A = 1.7$ kOe 程度であった。Fig.3 に試料と平行方向に磁場を印加して磁化測定した後に LAS を用いて解析した結果を示す。x 軸が $1/H^2$ 、y 軸が dM/dH のグラフに磁気測定値をプロットして得られた一次式の切片と傾きから異方性磁場を算出した。 $M_r/M_s = 0.5$ の場合、 $H_A = 4$ kOe であった。講演では Stoner-Wohlfarth model[3]の数値シミュレーションと実験の比較についても報告する。

参考文献

- [1] H.Nishio, H.Humihiko, H.aguchi, and T.Takeishi: J.Jpn.Soc.Powder and Powder Metallurgy, 41,701(1994)
- [2] T. Kuno, S. Suzuki, K. Urushibata, K. Kobayashi, N. Sakuma, K. Yokota, M. Yano, A. Kato and A. Manabe: J. Jpn. Soc.Powder Powder Metallurgy 63 (2016) 1053–1059.
- [3] Stoner, E. C. & Wohlfarth, E. P. A mechanism of magnetic hysteresis in heterogeneous alloys. Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. A 240(826), 599–624 (1948)

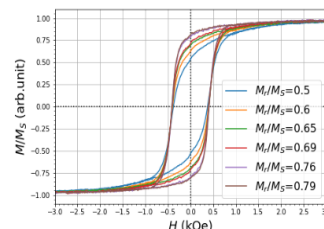


Fig.1 VSM measurements for different M_r/M_s

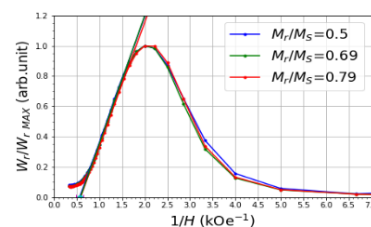


Fig.2 Rotational hysteresis loss of different M_r/M_s

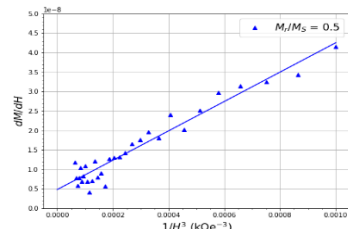


Fig.3 LAS at high magnetic fields

XMCD を用いた Co フェライトの陽イオン欠陥の定量解析

岡林潤、田中雅章*、森下雅也*、柳原英人**、壬生攻*

東大理、*名工大、**筑波大

Quantitative analysis of cation defects in Co ferrites studied by XMCD

J. Okabayashi, M. A. Tanaka*, M. Morishita*, H. Yanagihara**, and K. Mibu*

U. Tokyo, *Nagoya Inst. Tech., **U. Tsukuba

はじめに スピネル型フェライト CoFe_2O_4 (CFO) は、スピフィルター、高周波デバイス、磁気弾性効果などの応用から多くの研究が行われてきている。近年では、基板からの格子ひずみによる垂直磁気異方性 (PMA) も報告されている [1]。CFO は、 O_h 対称サイトの Co^{2+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} , T_d 対称サイトの Fe^{3+} から構成される。これらの構成比を調べるには、元素選択的かつサイト選択的な計測が必要となり、内殻励起を用いた X 線吸収分光 (XAS), X 線磁気円二色性 (XMCD) が強力な手法となる。今回、XAS, XMCD から求まる Co と Fe の組成比、陽イオンサイトの原子数の比、電荷中性条件を連立することによって、陽イオンサイトの欠損量を定量的に求める方法を検討したので報告する。

実験方法 試料について、パルスレーザー堆積法にて $\text{MgO}(001)$ 基板上に膜厚 13 nm の $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_{4+\delta}$ ($x=0.2, 0.6$) を堆積した。 $x=0.2$ では PMA を示し、 $x=0.6$ では面内磁化容易軸を示す。表面には Cu を 1 nm 堆積した。X 線回折から CFO の面内に引っ張りひずみが印加されていることも判っている [1]。Fe, Co L 吸収端の XAS, XMCD 測定について、高エネ研 Photon Factory BL-7A (東大理) にて、室温にて行った。

結果と考察 XAS の強度比が $\text{Fe}:\text{Co}=14:1$ 程度となり、 $x=0.2$ と一致することを確かめた。 $\text{Fe}^{2+}(O_h)$, $\text{Fe}^{3+}(O_h)$ の磁気モーメントが平行で、これらは $\text{Fe}^{3+}(T_d)$ の磁気モーメントと反平行結合であることが図 1 の XMCD の符号から明確に観測できる。サイト別の成分に分離するために、配位子場理論計算によるスペクトルの再現を行った。 $\text{Co}^{2+}(O_h)$ は一成分から成り立つことがスペクトル形状から判った。PMA の起源は、Co の大きな軌道磁気モーメントに起因することが判った [2]。

$x=0.2$ の場合の欠損量の評価のために、陽イオンサイト数、単位胞内の電荷中性、XMCD 強度について以下の 4 式が成り立つ。

$$14\text{Co}^{2+} = \text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+}(O_h, T_d) \quad (1)$$

$$2\text{Co}^{2+} + 2\text{Fe}^{2+} + 3\text{Fe}^{3+}(O_h, T_d) = 8 \quad (2)$$

$$\text{Fe}^{3+}(T_d):\text{Fe}^{3+}(O_h):\text{Fe}^{2+}(O_h) = 1:1.3:0.25 \quad (3,4)$$

パラメータは Co, Fe (3 種) の陽イオン数の 4 つであり、方程式の数は Fe XMCD の強度比 (2 つ) を含めて 4 つあり、連立方程式から各サイトを占める原子数が算出される。酸素欠陥量はないものとする。その結果、カチオン数の形式価数からのずれを陽イオン欠陥数として見積もれる。実際に陽イオン欠陥数は 0.185 となり、主に B サイト欠陥によることが判った。Co 組成の異なる場合でも試み、欠損量の組成依存性を捉える手法として有用であることを実証している。この解析は、サイト別にスピン軌道状態を観測できる内殻磁気分光により初めて行えるものである。講演では、X 線磁気線二色性 (XMLD) を用いた定量解析の詳細、モデルの妥当性についても議論する。

参考文献

[1] K. Naruse et al., J. Magn. Magn. Mater. **475**, 721 (2019).

[2] J. Okabayashi et al., Phys. Rev. B **105**, 134416 (2022).

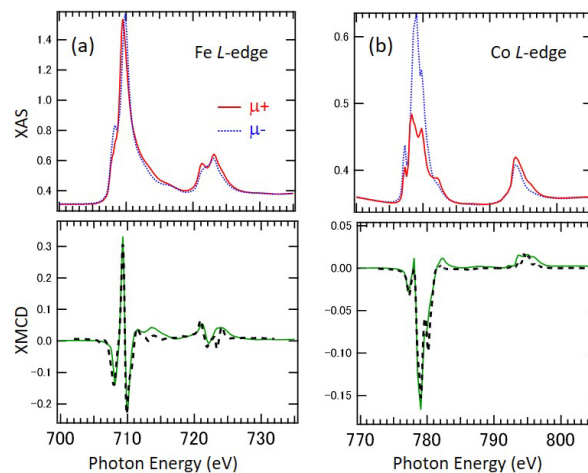


Fig. 1, XAS and XMCD of $\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{2.8}\text{O}_{4+\delta}$ film.

(a) Fe L edge and (b) Co L edge. Dot curves in XMCD are the calculation using ligand-field theory. [2]

強磁性共鳴測定による $\text{EuBi}_2\text{Fe}_{5-x}\text{Ga}_x\text{O}_{12}$ 薄膜の評価

朝野 航¹、西 敬生²、大島大輝³、加藤剛志³、李 基鎮⁴、河原正美⁵、西川雅美¹、石橋隆幸¹
(¹長岡技科大、²神戸高専、³名古屋大学、⁴西江大学、⁵高純度化学)

Characterization of $\text{EuBi}_2\text{Fe}_{5-x}\text{Ga}_x\text{O}_{12}$ thin films by Ferromagnetic Resonance Measurements

W. Asano¹, T. Nishi², D. Oshima³, T. Kato³, K. Lee⁴, M. Kawahara⁵, M. Nishikawa¹, T. Ishibashi¹

(¹Nagaoka Univ. Tech., ²Kobe City College Tech., ³Nagoya Univ., ⁴Sogang Univ., ⁵Kojundo Chem.)

1. はじめに

我々はこれまでに、 $\text{Nd}_{0.5}\text{Bi}_{2.5}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜を開発し、磁気光学イメージングにおいて 6 GHz までの高周波に応答することを確認した¹⁾。高周波特性をさらに向上させるためには磁気回転比を増大させる必要がある。我々は、角運動量補償組成付近で大きな磁気回転比が得られることに着目した。そして、希土類元素に Eu を選択することで、角運動量補償組成付近で面内磁気異方性を維持したまま、高周波特性の改善ができる可能性があると思した。そこで今回は、 $\text{EuBi}_2\text{Fe}_{5-x}\text{Ga}_x\text{O}_{12}$ ($x=0, 0.5, 1, 1.5, 2$) 薄膜を作製し、強磁性共鳴(FMR)測定により評価した結果について報告する。

2. 実験方法

$\text{EuBi}_2\text{Fe}_{5-x}\text{Ga}_x\text{O}_{12}$ ($x=0, 0.5, 1, 1.5, 2$) 薄膜は、MOD 溶液($\text{BiFeEu}(2/5/1)$, $\text{BiFeEuGa}(2/3/1/2)$), 高純度化学研究所)を用いて各 Ga 置換量になるように調製した溶液を $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (GGG) (100)基板上に滴下、スピコーターで 3000 rpm, 30 秒の条件で塗布した。その後、100°C のホットプレートで 10 分間乾燥させ、450°C のホットプレートで 10 分間仮焼成を行った。この操作を 5 回繰り返した後、770°C のマッフル炉で 3 時間本焼成を行った。FMR 測定は、マイクロ波周波数 9.09 GHz、掃引磁場範囲 0 - 10 kOe、電力 5 mW、磁場印加角度 $\beta = 0 - 180^\circ$ (面直方向を 0°)として行った。

3. 結果および考察

Fig.1 に Ga 置換量=1 の FMR の磁場印加角度依存性の測定結果を示す。共鳴磁場 H_{res} は印加磁場を面直方向($\beta = 0^\circ$)から面内方向($\beta = 90^\circ$)に変化させると 2.45 kOe から 1.70 kOe まで変化した。 H_{res} は $\beta = 90^\circ$ で最小値を示していることから、面内方向に磁化容易軸を持つことがわかる。Fig.2 に $\beta = 0^\circ$ での Ga 置換量と H_{res} および磁気回転比 γ の関係を示す。 H_{res} は Ga 置換量=0 - 0.5 で約 5 kOe を示したが Ga 置換量=1 - 1.5 で約 2.5 kOe と急激に下がった。一方、 γ は Ga 置換量=0 - 0.5 で約 15 MHz/Oe を示したが Ga 置換量=1 - 1.5 で約 30 MHz/Oe と急激に増加した。この理由は、Ga 置換量が 1 付近に角運動量補償組成が存在しているためと考えられる。また、Ga 置換量 1 の γ の値は、過去に報告された $\text{Nd}_{0.5}\text{Bi}_{2.5}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ の $\beta = 0^\circ$ での γ ¹⁾と比較すると約 1.3 倍大きい。詳細は、当日報告する。

謝辞：本研究の一部は、JSPS 二国間交流事業(JPJSBP120208805)名古屋大学未来材料・システム研究所共同研究の支援を受けて実施された。

参考文献

1) T. Ishibashi et al., J. Magn. Soc. Jpn., 44, 108 (2020)

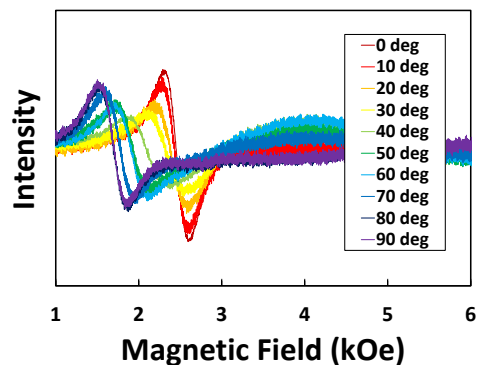


Fig.1 FMR spectra of $\text{EuBi}_2\text{Fe}_4\text{Ga}_1\text{O}_{12}$ thin films measured at $\beta = 0 - 90^\circ$.

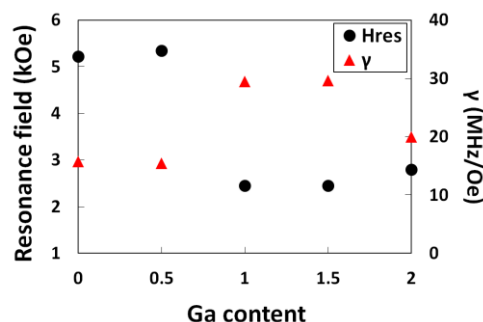


Fig.2 Resonance magnetic fields of $\text{EuBi}_2\text{Fe}_{5-x}\text{Ga}_x\text{O}_{12}$ thin films with Ga content of 0 - 2 measured at $\beta = 0^\circ$.