

**垂直磁化 GdFe 系合金薄膜の機械的変形による異常ホール特性および磁化過程への寄与
Contribution of Mechanical Deformation to Anomalous Hall Properties and Magnetization Process in Perpendicularly Magnetization GdFe-Based Alloy Thin Films**

○藤井 優樹¹, 北澤 楓太², 宋嘉浩², 小林祐希³, 吉川大貴⁴, 塚本新⁴
*Fuji Yuki¹, Fuuta Kitazawa², Yoshihiro Sou², Yuki Kobayashi³, Hiroki Yoshikawa⁴, Arata Tsukamoto⁴

Abstract To apply GdFeCo thin film samples to deformation sensor applications, we fabricate thin films on Kapton substrates and attempt to evaluate their magnetic properties and measure their AHE. In addition, the contribution of mechanical deformation to the anomalous Hall properties for bending detection on Kapton substrates is investigated. As a result, we confirmed the occurrence of AHE and the formation of perpendicular magnetization in GdFeCo on Kapton substrates, and observed pinning due to deformation, revealing the existence of physical damage in the thin film samples. The results show that electrical detection of GdFeCo magnetic thin films on Kapton substrates is possible in response to deformation.

1 はじめに

現在 IoT 機器の小型化や高機能化と共にフレキシブルエレクトロニクス^[1]が注目されており、軽薄かつ変形可能な電子デバイスによって多様な環境下におけるデータ収集が期待されている。また使用される材料には、一般的電子素子に使用される単結晶の半導体材料に比べ、より柔軟な分子系フィルムやアモルファス合金等で所望の機能を発現する材料が必要となる。そこで、GdFe 系アモルファス合金薄膜材料に注目し、応じたセンサへの応用を期待した検討を行う。GdFe 系合金薄膜はフェリ磁性体であり、特定の組成比において膜面垂直方向に磁化容易軸を持ち、比較的大きな異常ホール効果 (AHE : Anomalous Hall Effect) を示す^[2]。ただし、その磁気特性は組成や温度、膜厚によって大きく変化し^[3]、基板種や平滑性によっても変わる。我々の研究グループではこれまで Si 基板やガラス基板上磁性薄膜に関する検討を行ってきた。本研究では、GdFe 合金薄膜の変形可能なセンサ応用へ向け、まずフレキシブルなカプトン基板上薄膜作製を試み、その磁気特性評価と AHE について測定検討を行った。更に、GdFe 系合金薄膜での電気的な曲げ検出に向けた、機械的変形による異常ホール特性への寄与を検討する。

2 カプトン基板上 GdFe 系合金薄膜のホール測定

2.1 実験方法

試料は、厚さ 125 μm のカプトン基板上に、SiN (5 nm) / Gd₂₃Fe_{67.37}Co_{9.63} (20 nm) / SiN (5 nm) をマグネトロンスパッタリング法を用いて成膜した。その後室温にて、膜面垂直方向に ±5 kOe の磁場を印加しつつ膜面内方向に 0.1 mA の定電流を印加し、次に示す曲げ状態における電流印加方向の垂直方向電圧を測定し、Van der Pauw 法で評価した。試料を一度も変形させていない状態 A、短径 1.5 mm の楕円形土台を用いて変形を与えた状態 B、その後平坦にした状態を C とする。初めに A を測定し B → C → B → C → … という変形を 5 周繰り返した後の B と C の状態を測定した。Fig. 2 に試料変形状態の概要を示す。

2.2 実験結果・考察

Fig. 4 に各状態での検出電圧の外部磁場依存性を示す。成膜後の曲げ経

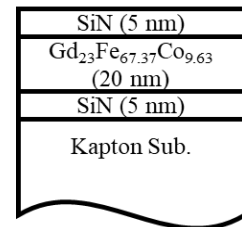
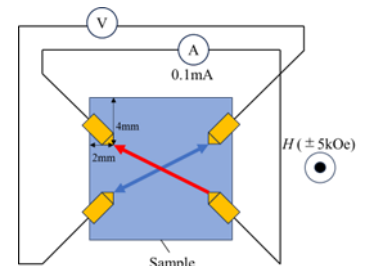
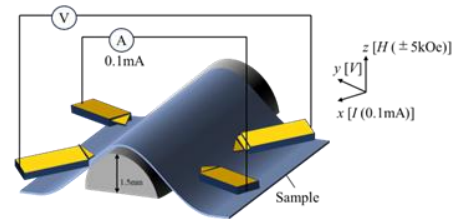


Fig. 1 GdFeCo thin film composition



(a) Terminal arrangement for measurement at no deformation



(b) Terminal arrangement for measurement at during deformation

Fig. 2 Measurement systems for current magnetic conditions

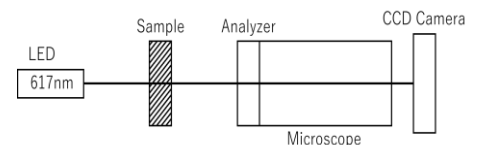


Fig. 3 Magneto-optical Imaging System for Faraday effect

1: 日大理工・学部生・電子 2: 日大理工・博士課程前期・電子 3: 日大理工・博士課程後期・電子
4: 日大理工・教員・電子工学

験の無い A では検出電圧符号の外部磁場依存性の角型比 (H_k/H_C) が高く, Si 基板上的試料の角形比から同等の磁気特性を確認した. 一方, 機械的変形を経験した B や C では角形比が低かった. その中でも B が最低であり, C は A よりも B に近い角形比を示した. また, 測定時に機械的変形を加えていない C と A でも, 異なる角形比を示した. 各種状態での飽和磁場に注目すると, A がおよそ 0.4 kOe であり B では約 1.9 kOe, C では約 2.36 kOe であった. 変形によって飽和磁場が増加し, B が最大であった. ここで A にて電圧符号が反転する磁場値の ± 0.20 kOe 付近に注目すると, B や C でも ± 0.20 kOe 付近にて符号反転が開始し, その後は徐々に飽和値へ変化する事が確認できる. 一方, ± 0.45 kOe ~ ± 1.65 kOe の間では検出電圧が B と C で変形に起因し大きな違いが生じ, また A と C との比較から非可逆成分が生じている事が分かる. Fig. 4 から磁化回転モードにより磁化の向く角度が変化している場合と, 磁壁移動モード中での磁壁ピンニング現象による 2 つの可能性が考えられる. その他 5 kOe と -5 kOe 印加時の電圧差を検出電圧差 (V_{xy}) と定義すると, A が 1.43 mV, B が 1.33 mV, C が 1.30 mV であり, 変形の有無によらず 0.1 mV 以内の精度で再現した.

3 カプトン基板上 GdFe 系合金薄膜磁気光学イメージング

3.1 実験方法

前述の機械的変形により生じたヒステリシスループ形状の変化に対し, 考察を深めるために検証を行った. 磁気光学 Faraday 効果を用いた磁気イメージングから磁区観察を行った. Fig. 3 に示すよう, 磁気光学 Faraday 効果計測は中心波長 617 nm の LED 光源を試料に入射し, 直線偏光の透過光から CMOS カメラを用いて $3.6 \mu\text{m}$ の分解能で磁区観察を行った.

3.2 実験結果・考察

磁気光学イメージング観察を行ったところ, Faraday 効果にて磁気コントラストを確認した. 磁場に対する磁化過程の様子には状態 A と状態 C で大きな違いが観察された. 状態 A においては磁場印加後, 端から全体に広がる様に磁化反転が起きた. 一方, C 状態では Fig. 5 に示すように, 濃淡は磁場印加方向から全体へ向かうのではなく, ある区切られた部分が反転していた. これによりピンニングサイトが機械的変形によって生成されたことがヒステリシスループ形状の変化を生じた原因の 1 つである事が確認できた.

4 まとめ

今回磁性体へ機械的変形を与えたことによる AHE と磁化過程への寄与を検討した結果, まず Fig. 4 より外部磁場に対するヒステリシス応答が得られた事から, AHE の発現とカプトン基板上に GdFeCo の垂直磁化形成が確認できた. また, 磁性体の曲げ変形によって外部磁場に対するヒステリシスループ, つまり磁化過程へ影響を与えることを明らかにした.

これによりカプトン基板上 GdFeCo 磁性薄膜において, 変形を与えていない状態とは異なった磁区形成が生じることが分かった. そこで磁気光学イメージング測定による磁区観察を行った. Fig. 5 より C 状態ではピンニングサイトが見られ, 変形によってピンニングが見られたことから, 薄膜試料への物理的なダメージの存在が明らかになった. 以上より, フレキシブルなカプトン基板上 GdFeCo 磁性薄膜において, 変形に応じた電氣的な検出が可能であることを示した.

5 参考文献

- [1] Yanfang Meng, Xiaojia Zhang, Yinji Ma, Xue Feng, ACS Appl. Electron. Mater. 3577-3584 (2020, 2, 11)
- [2] M. Liu, C. R. Cao, Y. M. Lu, W. H. Wang, H. Y. Bai, Appl. Phys. Lett. 110, 031901 (2017)
- [3] Y. Kobayashi, Y. Kasatani, H. Yoshikawa, A. Tsukamoto, T. Magn. Soc. Jpn. 7, 34-39 (2023)
- [4] Yasuhiro Futakawa, Hiroki Yoshikawa, Yuichi Kasatani, Masahiro Tanaka, Souliman El Moussaoui, Arata Tsukamoto, Mag-17-138~139・141~152

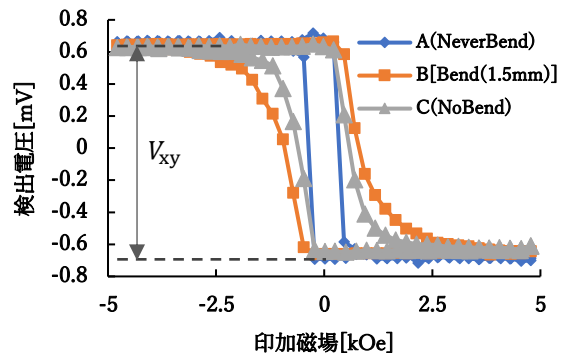


Fig. 4 Magnetic field dependence of hall voltage at Bending and Bend

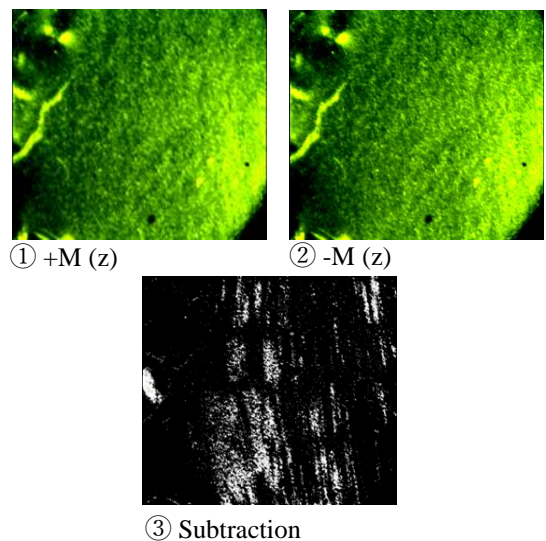


Fig. 5 Magnetic domain observation image of bended Sample