

GdFe への隣接 Gd 層挿入による磁化特性変調および異常ホール抵抗・縦抵抗への寄与検討  
 Modulation of magnetization characteristics by insertion of adjacent Gd layer into GdFe and study of contribution to abnormal Hall resistance/longitudinal resistance

○宋嘉浩<sup>1)</sup>, 北澤楓太<sup>1)</sup>, 小林 祐希<sup>2)</sup>, 笠谷 雄一<sup>3)</sup>, 吉川大貴<sup>4)</sup>, 塚本新<sup>4)</sup>  
 Yoshihiro Sou<sup>1)</sup>, Fuuta Kitazawa<sup>1)</sup>, Yuki Kobayashi<sup>1)</sup>, Yuichi Kasatani<sup>2)</sup>, Hiroki Yoshikawa<sup>3)</sup>, Arata Tsukamoto<sup>3)</sup>

**Abstract:** In order to understand the anomalous Hall effect brought about by the magnetic properties of GdFe-based alloys, we placed adjacent Gd layers next to each other and investigated the correlation between magnetic properties and electrical conductivity properties in samples with different magnetic properties. The results showed that while the film thickness dependence of  $M_S$  differs greatly due to the insertion of a Gd adjacent layer, the film thickness dependence of  $\rho_{xx}$  and  $\rho_{xy}$  does not change compared to MS, and the differences due to structure are small. It has become clear that the net magnetization vector, both sign and quantity, cannot be an effective indicator for GdFe-based alloys.

1. はじめに

GdFe に代表される希土類遷移金属 (RE-TM) アモルファス合金フェリ磁性体はスピントロニクスへの発展に向け多くの検討が行われている。異常ホール効果 (AHE) は局所的な磁化応答検出の代用等へ利用が期待される。異なる温度依存性を持つ副格子磁化から成る RE-TM アモルファス合金薄膜はその磁気異方性やミクロスコピックな磁気秩序に議論が続いており、更なる AHE の大きさは磁化との相関や縦伝導率の相関が続いている。本研究は GdFe 系合金での磁気特性がもたらす異常ホール伝導特性への理解を目指し磁気特性が膜厚により非線形な応答を示す GdFe 薄膜<sup>1)</sup>と磁気特性変調を期待し界面に Gd 薄膜を隣接させた試料により、AHE と磁化及び縦抵抗率の相関を検討する。

2. 実験方法

マグネトロンスパッタリング法により作製した試料群 A : SiN (5 nm) / Gd<sub>25</sub>Fe<sub>75</sub> (t nm) / SiN (60 nm) / Si sub. (t = 5, 10, 15, 20, 30, 60, 100) と試料群 B : SiN (5 nm) / Gd (0.5 nm) / Gd<sub>25</sub>Fe<sub>75</sub> (t nm) / Gd (0.5 nm) / SiN (60 nm) / Si sub. (t = 5, 10, 15) を用いた。試料形状は 5 mm × 5 mm の正方形を目安に切り出し、電流-電圧四端子計測を行った。端子配置は Fig.1 に示すように縦抵抗測定では電流端子方向 (x 方向) と平行になるように電圧端子を、横電圧測定では電流端子方向 (x 方向) に対し垂直方向 (y 方向) に配置した。それぞれ 1 mA の直流電流を印加したときの電圧を測定した。外部磁場  $H$  は z 方向に +5kOe ~ -5kOe の範囲で印加した。縦抵抗測定では零磁場での電圧から各温度・各膜厚での縦抵抗率  $\rho_{xx}$  を、横抵抗測定では飽和時における電位差を元に異常ホール抵抗率  $\rho_{xy}$  を算出した。これらの測定は到達真空度  $3 \times 10^{-5} \sim 8 \times 10^{-5}$  Pa 程度で、100 ~ 300 K の範囲で行った。また、振動試料型磁力計 (SQUID - VSM) により各試料の磁化測定を行った。更に、ガラス基板上に成膜した同等試料で優勢副格子磁化とその膜厚依存性の議論のため波長 632 nm における磁気光学ファラデー回転角の測定を行った。

3.1. 試料群 A, B における各膜厚の磁気特性

300 K にて試料群 A, B で、磁気光学ファラデー回転角と異常ホール電圧の磁場依存性を確認し、試料群 A は t = 10 nm, B は t = 5 nm を境に磁場との符号関係が反転した。この結果より、膜厚減少により優勢な副格子磁化が反転したと考えられる。300K における各試料の膜面垂直方向の飽和磁化量を Fig.2 に示す。また、優勢副格子磁化の方向を考慮した飽和磁化  $M_S$  を Fig.2 内差し込み図に示す。両試料群は 60 nm 以下において膜厚減少にともない  $M_S$  が減少し  $M_S = 0$  となる磁化補償状態を示す有限の膜厚が存在する。その膜厚は試料群 A では t = 10 ~ 15 nm に、B では t = 5 ~ 10 nm にそれぞれ存在し、試料群 A と試料群 B は磁化補償状態を示す膜厚が異なると考えられる。また、5 nm における  $M_S$  は試料群 B で試

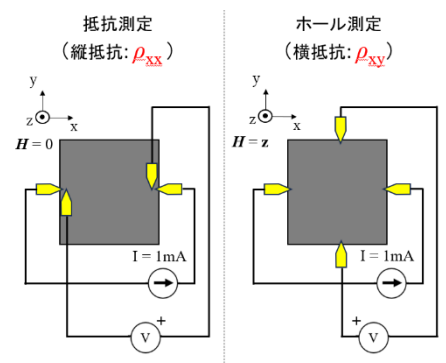


Fig. 1 Measurement systems for current magnetic and resistivity measurements

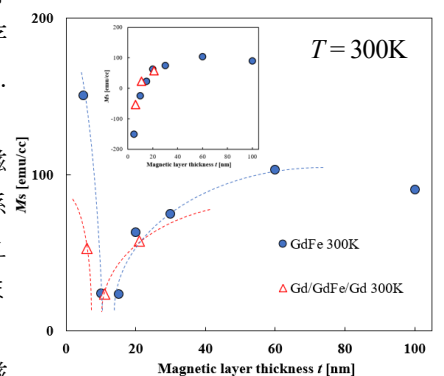


Fig. 2 Film thickness dependence of  $M_S$

1 : 日大理工・博士課程前期・電子 2 : 日大理工・博士課程後期・電子 3 : 日大理工・研究所研究員 4 : 日大理工・教員・電子工学

料群 A に比べ約 3 倍大きくなることから、Gd 挿入により  $M_S$  の膜厚依存性が小さくなったと考えられる。ここで膜厚に依存しない磁化量として定数項  $M_{sf}$  の存在を考え、以下の式(1)を用いて評価を行った。

$$M_S \cdot t = M_V t + 2M_{sf} \quad (1)$$

$t$  は膜厚、 $M_V$  は内部磁化に相当する定数であり実験で得られた  $M_S$  に  $t$  を乗じた値を  $t$  に対してプロットしたものを Fig.3 に示す。式(1)を用いてフィッティングを行ったところ試料群 A と B では異なる定数項(界面項)  $M_{sf}$  と傾き(内部項)  $M_V$  を得られた。ここから Gd 挿入により内部、外部領域ともに磁気特性が変化すると考えられ、GdFe 合金薄膜の界面近傍に磁気モーメントが異なる領域の存在が示唆された。

### 3.2. 試料群 A, B における縦抵抗率, 異常ホール抵抗率

Fig. 4 に試料群 A, B の各温度・各試料の縦抵抗率  $\rho_{xx}$  を示す。両試料群ともに 20 ~ 30 nm 以下において膜厚減少に対し  $\rho_{xx}$  は単調に増加する膜厚依存性を有することを示した。また、各膜厚における  $\rho_{xx}$  の温度依存性は小さいことを示した。次に Fig.5 に試料群 A, B の各温度・各試料の異常ホール抵抗率  $\rho_{xy}$  を示す。両試料群ともに各温度にて  $\rho_{xy}$  は連続的に変化する膜厚依存性を示した。特に 100 K で両試料群において膜厚の減少につれ  $\rho_{xy}$  は増加し、 $t = 15$  nm 以下でその増加を顕著に確認した。さらに  $\rho_{xy}$  の試料温度による減少率は膜厚が増加するに伴い低下した。なお、外部磁場に対する AHE により生じる電圧のヒステリシスループ応答は磁化補償点となる膜厚を境にその符号が異なり、副格子磁化に対応すると考えられる。

### 3.3. 試料群 A, B の異常ホール抵抗率と磁化及び縦抵抗率の相関

上記 3.2 の結果より両試料群にて膜厚減少に対し  $\rho_{xy}$  と  $\rho_{xx}$  は同様に単調増加を示した。一方、 $M_S$  は単調な減少だけでなく磁化補償膜厚以下の膜厚で増加した。そして 5 nm における試料群 A, B を比べると、 $M_S$  が大きく異なる一方で、 $\rho_{xy}$  と  $\rho_{xx}$  の差は小さい。ここで、 $M_S \cdot t$  と同様に膜厚に依存しない項  $\rho_{xx, sf}$ ,  $\rho_{xy, sf}$  を用いて 100 K における  $\rho_{xx} \cdot t$ ,  $\rho_{xy} \cdot t$  の評価を行った結果を Fig.6 に示す。両試料群において正の定数項(界面項)  $\rho_{xx, sf}$ ,  $\rho_{xy, sf}$  の存在を確認した。 $\rho_{xx, sf}$  と  $\rho_{xy, sf}$  を試料群 A と試料群 B の間で比較するとそれぞれ同程度の値が算出された。傾き(内部項)  $\rho_{xx, V}$ ,  $\rho_{xy, V}$  についても同様であった。対して Fig.3 の界面項 ( $M_{S, sf}$ ) と内部項 ( $M_{S, V}$ ) がともに試料構成により異なる。特に試料群 A の  $M_{S, sf}$  と比較して試料群 B のそれは 1/2 以下となった。これらのことから GdFe 系合金における  $\rho_{xy}$  と  $\rho_{xx}$  との相関は  $\rho_{xy}$  と  $M_S$  との相関に比べて強いことが示された。加えて、GdFe 系合金において、異常ホール効果の膜厚依存性は正味の磁化の膜厚依存性と大きく異なる依存性を示した。

## 4. まとめ

GdFe 系合金での磁気特性がもたらす異常ホール効果への理解を目指し Gd 層隣接を隣接させ、磁気特性が異なる試料において正味の磁化と電気伝導特性の相関を検討した。いずれの構造においても  $M_S$ ,  $\rho_{xx}$ ,  $\rho_{xy}$  は膜厚依存性を示した。しかし  $M_S$  は試料構成により界面項と内部項が大きく異なるのに対し、 $\rho_{xx}$  と  $\rho_{xy}$  は異なる構造であっても同程度の界面項と内部項を示した。 $\rho_{xy}$  と  $\rho_{xx}$  との相関は  $\rho_{xy}$  と  $M_S$  に比べ強く示された。このことから従来強磁性体において異常ホール効果は磁化ベクトルに強い相関を有するものとして検討が行われているが GdFe 系合金では正味の磁化ベクトルが符号・量いずれも有効な指標となり得ない事が明らかとなった。

## 5. 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 21K04184 の助成を受けたものである。

## 6. 参考文献

1) Y. Futakawa et al., *IEE Japan., Technical Meeting on "Magnetics"*. MAG-17-150 (2017).

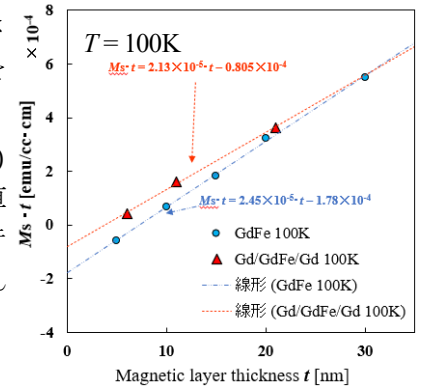


Fig. 3 Dependence of  $M_S \cdot t$  on magnetic layer thickness

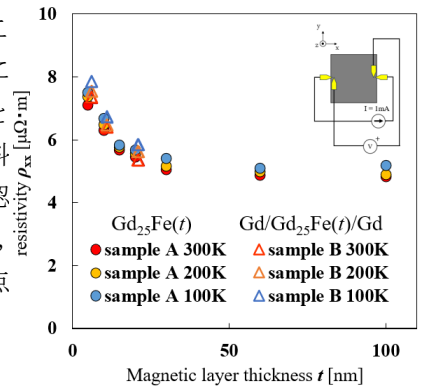


Fig. 4 Film thickness dependence of Hall resistivity  $\rho_{xx}$

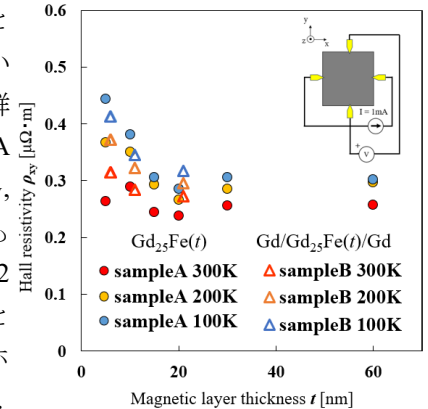


Fig. 5 Film thickness dependence of Hall resistivity  $\rho_{xy}$

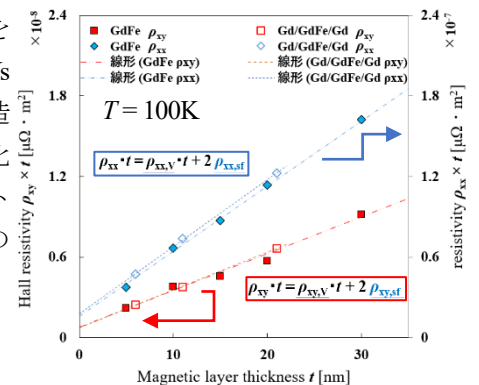


Fig. 6 Dependence of  $\rho_{xx} \cdot t$ ,  $\rho_{xy} \cdot t$  on magnetic layer thickness