

# 磁性元素を添加した SnSe 薄膜における異常ネルンスト効果

和田和己、宮町俊生、水口将輝  
(名古屋大)

Anomalous Nernst effect in SnSe thin films doped with magnetic elements  
Kazuki Wada, Toshio Miyamachi, Masaki Mizuguchi  
(Nagoya Univ.)

## はじめに

異常ネルンスト効果 (ANE) は、熱磁気効果の一つであり 異常ネルンスト効果の起電力発生方向が熱流方向に垂直であるという特異性から、その素子設計を工夫することにより高性能な熱電素子への応用が可能になると期待されている<sup>1)</sup>。しかしながら、実用的な応用に結実した研究例は報告されていないため、新たな材料の開発が求められている。本研究では、大きなゼーベック係数をもつ半導体として知られる SnSe に磁性元素である Fe を添加した薄膜を作製し、その物性を調べ、異常ネルンスト効果の観測を試みた。

## 実験方法

スパッタリング法により、酸化被膜付き Si 基板上に Fe 元素を添加した SnSe 薄膜を成膜した。Fe は DC マグネトロン方式で、SnSe は RF マグネトロン方式でスパッタした。成膜後、150°C においてアニール処理を1時間施した。Fe に印加するパワーを調整することにより、Fe と SnSe の組成を変化させた試料を室温で作製した。X 線回折 (XRD) により各試料の結晶構造を、振動試料型磁力計 (VSM) により磁気特性を測定した。また、物理特性測定システム (PPMS) により各試料のホール効果、ゼーベック効果、ネルンスト効果の測定を室温で行った。

## 実験結果

XRD の測定の結果、Fe の添加によって SnSe (200), SnSe (400) の回折ピーク位置にシフトが見られ、Fe が SnSe の結晶格子に内包されていることが示唆された。VSM による磁気特性の評価の結果、Fe の含有率が 7.8% 以下の試料では自発磁化が観測されなかったが、含有率が 11.5% 以上の試料では自発磁化が観測され、Fe の含有率が増加するにつれ自発磁化も大きくなる傾向がみられた。また、特定の Fe の含有率の試料において、異常ホール電圧、異常ネルンスト電圧が観測された。図 1 に Fe の含有率が 23.5% の試料におけるネルンスト電圧 ( $V_{xy}$ ) の測定結果を示す。試料の磁化曲線と対応するネルンスト電圧曲線が得られた。講演では、Fe の含有率と物性の関係についても詳細に議論する。

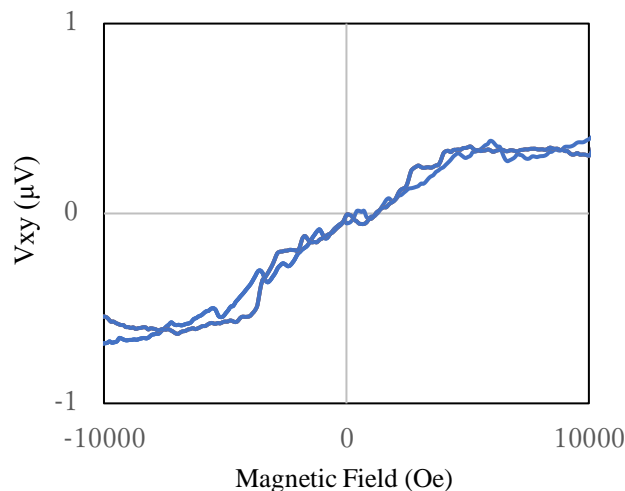


Fig.1  $V_{ANE}$  as a function of magnetic field for  $\text{Fe}_{23.5}(\text{SnSe})_{76.5}$  thin film with the thickness of 100 nm.

## 参考文献

- 1) M. Mizuguchi and S. Nakatsuji, *Sci. Technol. Adv. Mater.* **20**, 262 (2019).

## FePt 薄膜における異常ネルンスト効果の電界制御

吉田颯稀、宮町俊生、水口将輝  
(名古屋大学)

### Electric field control of anomalous Nernst effect in FePt thin films

S. Yoshida, T. Miyamachi, M. Mizuguchi  
(Nagoya Univ.)

#### はじめに

磁気メモリのようなスピントロニクスデバイスの動作には電流が必要であり、動作時の電力消費が大きいという問題がある。そこで、小さな消費電力で動作するスピントロニクスデバイスの開発にあたり、電界効果トランジスタ (FET) と同様の原理で電界を印加することで磁性材料の特性を制御するという手法が注目されている。バルクの金属では印加した電界は自由電子によって遮蔽されるが、表面の数原子層は電界の効果を受けるため、表面積と体積の比が大きい厚さ数 nm の金属超薄膜においては電界効果による特性制御が可能である。本研究では、強磁性超薄膜の異常ネルンスト効果 (anomalous Nernst effect: ANE) を電界印加により制御することを目的とした。強磁性材料として、 $L1_0$ 型構造をとった際に大きな一軸磁気異方性を持つ硬磁性材料であり、電界効果による磁気特性の変調が報告されている FePt を選択した<sup>1,2)</sup>。また、試料との間に形成される電気二重層を利用して小さな外部電圧から巨大な電界を発生させることを目的とし、電界を印加するゲート電極の材料には常温で液体として存在する塩であるイオン液体を使用した。イオン液体を利用して FePt 超薄膜にゲート電界を印加した際の ANE の変化を調べた。

#### 実験方法

MgO(001)単結晶基板上にマグネトロンスパッタリング法で MgO バッファ層 40 nm、FePt 2 nm を成膜した。FePt の  $L1_0$ 型構造への規則化を促すために、FePt 成膜時および成膜後に 250°C での熱処理を施した。作製した試料はフォトリソグラフィと Ar イオンエッチングによってホールバー形状に加工した。その上にイオン液体 (TMPA<sup>+</sup>-TFSI) のフィルムを貼り付け、表面に Au 50 nm を蒸着してゲート電極を作製した。試料の結晶構造解析は X 線回折 (XRD) 装置を用いて行った。磁気特性評価は磁気光学カー効果 (MOKE) および磁気特性測定システム (MPMS) を用いて測定した。異常ホール効果 (anomalous Hall effect: AHE) および ANE は物理特性測定システム (PPMS) を用いて室温で測定した。試料の磁化、AHE、ANE の測定時には、磁性体中に電子が蓄積する方向にゲート電界を印加した。

#### 実験結果

XRD の測定の結果、FePt 薄膜は  $L1_0$ 型規則構造になっていることが確認された。また、MOKE 測定の結果、試料は垂直磁化膜になっていることが分かった。MPMS による磁化測定の結果、ゲート電界の増加に伴って試料の磁化が増加することが確認された。また、その変化は可逆的であった。異常ホール電圧および異常ネルンスト電圧の測定を行った結果、両者の大きさにゲート電界による変調が確認された。講演では、ゲート電界依存性などについて詳細に議論する予定である。

本研究の実験にあたり、大阪大学 小山知弘氏、千葉大地氏、電力中央研究所 小野新平氏に御協力いただいた。本研究の一部は、物質・デバイス領域共同研究拠点における共同研究である。

#### 参考文献

- 1) M. Weisheit, S. Fähler, A. Marty, Y. Souche, C. Poinsignon, and D. Givord, *Science* **315**, 349 (2007).
- 2) T. Seki, M. Kohda, J. Nitta, and K. Takahashi, *Appl. Phys. Lett.* **98**, 212505 (2011).

## Fe/Pt 金属人工格子における横型熱電変換の性能指数

山崎匠<sup>1</sup>, 平井孝昌<sup>2</sup>, 八木貴志<sup>3</sup>, 内田健一<sup>1,2</sup>, 関剛斎<sup>1,2</sup>, 高梨弘毅<sup>1,4</sup>

(<sup>1</sup>東北大金研, <sup>2</sup>NIMS, <sup>3</sup>産総研, <sup>4</sup>ASRC, 原子力機構)

Figure of merit for transverse thermoelectric conversion in Fe/Pt metallic superlattices

T. Yamazaki<sup>1</sup>, T. Hirai<sup>2</sup>, T. Yagi<sup>3</sup>, K. Uchida<sup>1,2</sup>, T. Seki<sup>1,2</sup>, and K. Takanashi<sup>1,4</sup>

(<sup>1</sup>IMR, Tohoku Univ., <sup>2</sup>NIMS, <sup>3</sup>AIST, <sup>4</sup>ASRC, JAEA)

### はじめに

横型熱電変換は温度勾配に対し垂直な方向に電場が生じる現象であり、接合部の無い単純な素子構造により出力を増強できるという、従来型の熱電変換にはない特長を有する[1]。磁性体中に生じる現象としては異常ネルンスト効果が挙げられる。横型熱電変換性能の評価指標である無次元性能指数  $ZT$  ( $= S_T^2 \sigma_{yy} / \kappa_{xx}$ ) は横熱電能  $S_T$  ( $x$  方向に与えた温度勾配と  $y$  方向に発生した電場  $E_y$  の比)、電気伝導率  $\sigma_{yy}$ 、熱伝導率  $\kappa_{xx}$  によって決定される。金属人工格子では  $S_T$  が增大することが知られており[2,3]、また、界面の存在により積層方向に  $\kappa_{xx}$  を抑制できる可能性があるため、 $ZT$  の増大に繋がり得る。しかし、これまでに金属人工格子の  $\kappa_{xx}$  を評価した報告例はなく、 $ZT$  の定量評価もなされていない。そこで本研究では時間領域サーモフレクタンクス法 (TDTR) [4]により金属人工格子の膜厚方向の  $\kappa_{xx}$  を計測する。さらに、熱流束法による横型熱電効果計測[5]や4端子法と組み合わせることで  $S_T$  および  $ZT$  を評価する。

### 実験結果

スパッタリング法を用いて SrTiO<sub>3</sub>(STO)(001)基板および Quartz 基板上に  $N$  ( $=50, 100, 200$ ) を変化させた Fe( $2\text{ nm}$ )/[Pt( $t_{\text{Pt}}$ )/Fe( $t_{\text{Fe}}$ )] <sub>$\times N$</sub>  人工格子を室温積層した。ここで、全ての  $N$  に対し Fe/Pt 人工格子全体の膜厚がおおよそ一定になるよう、 $t_{\text{Fe}}$  と  $t_{\text{Pt}}$  を変化させた。加えて、Fe と Pt の共蒸着により FePt 合金膜も参照試料として作製した。TDTR 用の試料にはトランスデューサー層の Al 膜を最上層に成膜した。反射高速電子線回折法より STO 基板上の Fe/Pt 人工格子がエピタキシャル成長していることを確認した。

$\kappa_{xx}$  を TDTR により、 $\sigma_{yy}$  をホールバー形状に微細加工した試料を用いた 4 端子法により計測し、それぞれの  $N$  依存性を調査した。 $\kappa_{xx}$  と  $\sigma_{yy}$  は  $N$  の増加に伴い単調に減少する傾向を示し、 $\kappa_{xx}$  は  $N = 200$  で最小値を示した。また、STO 基板と Quartz 基板上の試料間の値を比較すると、 $\kappa_{xx}$  は基板に依存した違いが顕著でないのに対し、 $\sigma_{yy}$  は全ての  $N$  において STO 基板上の試料の方が Quartz 基板上の試料より高い値を示した。これは、 $\kappa_{xx}$  において電子熱伝導率が支配的だとすると、Fe、Pt 各層におけるエピタキシャル膜と多結晶膜の電子散乱の寄与の差が膜面内方向と膜厚方向とで異なっていることを示唆している。

面内磁化配置の  $S_T$  を熱流束法により評価した。面内磁化配置における Fe/Pt 人工格子中の横型熱電効果には異常ネルンスト効果とスピンゼーベック効果の寄与が含まれる。熱流束法では、印加した熱流束  $-j_q$  で規格化した  $E_y$  が得られる。 $S_T = \kappa_{xx} E_y / (-j_q)$  より、TDTR で計測した  $\kappa_{xx}$  を用いることで  $S_T$  を見積もることが可能となる。 $S_T$  の  $N$  依存性を調べたところ、 $S_T$  は  $N$  の増加に伴い単調に増加し、 $N$  が大きい領域では STO 基板上の試料の方が Quartz 基板上の試料と比べて大きくなる傾向が得られた。また、 $ZT$  も  $N$  の増加と共に上昇する結果となった。講演では、 $S_T$  の  $N$  依存性の起源について詳細に議論する。

### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 (JP18H05246, JP22K20495), JST CREST (JPMJCR17I1), および JST ERATO (JPMJER2201) の支援を受けて行われた。

### 参考文献

[1] K. Uchida and J. P. Heremans, *Joule* **6**, 2240 (2022). [2] K. Uchida *et al.*, *Phys. Rev. B* **92**, 094414 (2015). [3] T. Seki *et al.*, *Phys. Rev. B* **103**, L020402 (2021). [4] D. G. Cahill, *Rev. Sci. Instrum.* **75**, 5119 (2004). [5] A. Sola *et al.*, *Sci. Rep.* **7**, 46752 (2017).