

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¹⁾。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。

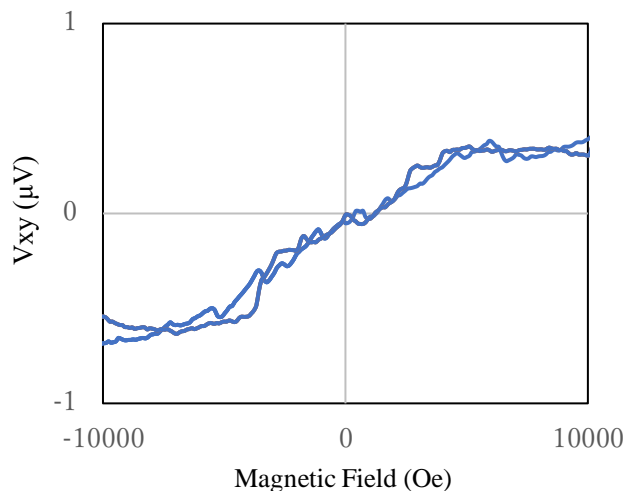


Fig.1 V_{ANE} as a function of magnetic field for $\text{Fe}_{23.5}(\text{SnSe})_{76.5}$ thin film with the thickness of 100 nm.

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^{1,2)}。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⁺-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¹, 平井孝昌², 八木貴志³, 内田健一^{1,2}, 関剛斎^{1,2}, 高梨弘毅^{1,4}

(¹東北大金研, ²NIMS, ³産総研, ⁴ASRC, 原子力機構)

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

T. Yamazaki¹, T. Hirai², T. Yagi³, K. Uchida^{1,2}, T. Seki^{1,2}, and K. Takanashi^{1,4}

(¹IMR, Tohoku Univ., ²NIMS, ³AIST, ⁴ASRC, 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 σ_{yy} , 熱伝導率 κ_{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 κ_{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 κ_{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 κ_{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 SrTiO₃(STO)(001)基板および Quartz 基板上に N ($=50, 100, 200$) を変化させた Fe(2 nm)/[Pt(t_{Pt})/Fe(t_{Fe})] _{$\times N$} 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_{Fe} と t_{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。

κ_{xx} を TDTR により, σ_{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。 κ_{xx} と σ_{yy} は N の増加に伴い単調に減少する傾向を示し, κ_{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, κ_{xx} は基板に依存した違いが顕著でないのに対し, σ_{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, κ_{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 κ_{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).

アモルファス TbFeCo 磁性薄膜における熱電テンソルの組成依存性

小峰啓史, 安藤亮* (茨城大, *茨城高専)

Composition dependence of thermoelectric tensor in amorphous TbFeCo magnetic thin films

Takashi Komine, Ryo Ando* (Ibaraki Univ., *NIT, Ibaraki College.)

1 はじめに

近年、磁性材料における熱とスピンの相互作用が着目され、異常ネルンスト効果が活発に議論されている¹⁾。我々は、これまでに希土類-遷移金属アモルファス合金である TbFeCo 垂直磁気異方性薄膜の輸送特性について研究を行い、異常ネルンスト効果と異常ホール効果が補償組成を挟んで同様に符号反転することを明らかにした²⁾。しかし、異常ネルンスト効果の大きさを決定する熱電テンソルの組成依存性は十分に調べられていない。本研究では、Tb 量を変えて作製した TbFeCo 垂直磁気異方性薄膜の熱電特性に寄与する各輸送特性から熱電テンソル $\underline{\alpha}$ を算出し、熱電テンソルの組成依存性を報告する。

2 実験方法

RF マグネトロンスパッタリング装置を用いて、ガラス基板上に AlN(25nm)/Tb-Fe-Co(50nm)/AlN(5nm) を積層することで試料を作製した。輸送特性に対する膜組成の影響を正しく評価するために、電極を磁性膜に対して点接触するように配置した³⁾。膜面垂直方向に磁場を印加しながら、素子両端に 0 から 10K の温度差を付与し、温度差方向に生じるゼーベック電圧、および、磁場印加方向と温度差方向に直交する方向に生じる異常ネルンスト電圧を測定することで、温度差に対する傾きから、ゼーベック係数 S_{xx} と異常ネルンスト効果に相当する Off-diagonal thermopower(ODT) S_{yx} を算出した。また、同じ素子において電気抵抗率 ρ_{xx} 、異常ホール抵抗率 ρ_{yx} を評価した。

3 結果と考察

ゼーベック係数 S_{xx} 、及び、ODT S_{yx} の Tb 量依存性を Fig.1 に示す。ゼーベック係数 S_{xx} は、TM-rich に向かうにつれて単調に増加する。一方、ODT S_{yx} は補償組成を挟んで符号反転し、この符号が異常ホール係数と一致することは以前の報告²⁾と同様である。

熱電現象を含む一般化されたオーム則より、ゼーベック係数 S_{xx} 、ODT S_{yx} は、抵抗率テンソル $\underline{\rho}$ 、熱電テンソル $\underline{\alpha}$ を用いて以下のように表すことができる。

$$S_{xx} = \rho_{xx}\alpha_{xx} + \rho_{xy}\alpha_{yx},$$

$$S_{yx} = \rho_{yx}\alpha_{xx} + \rho_{xx}\alpha_{yx}$$

熱電現象を記述する輸送係数としては、熱電テンソル $\underline{\alpha}$ が本質的であると考え、測定した物性値を用いることで、熱電テンソル $\underline{\alpha}$ を算出した。測定値を元に算出した熱電テンソルの対角成分 $|\alpha_{xx}|$ 、非対角成分 $|\alpha_{yx}|$ の Tb 量依存性を調べた結果を Fig.2 に示す。Tb 量の減少に伴い、 $|\alpha_{xx}|$ 、 $|\alpha_{yx}|$ が単調に増加することがわかる。伝導度のべき乗則 $\sigma_{yx} = \lambda\sigma_{xx}^{2-n}$ を仮定して、Mott 公式と比較すると、Tb 量減少に伴い、指数 n が $n = 1$ から $n = 0$ に推移することが明らかとなった。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金 (No. 20H02196, 22H01805, 18KK0132) の支援により行われました。ここに深謝します。

References

- 1) M. Mizuguchi and S. Nakatsuji, *Sci. Tech. Adv. Mater.*, **20**, 262, (2019).
- 2) R. Ando, T. Komine, and Y. Hasegawa, *J. Elec. Mater.* **8**, 3570-3575 (2016).
- 3) R. Ando, T. Komine, *AIP Adv.* **8**, 056326 (2018).

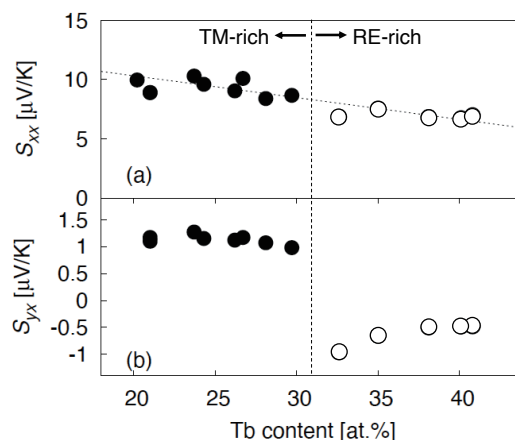


Fig. 1 Composition dependence of (a) Seebeck coefficient, and (b) off-diagonal thermopower (ODT) in Tb-Fe-Co thin films.

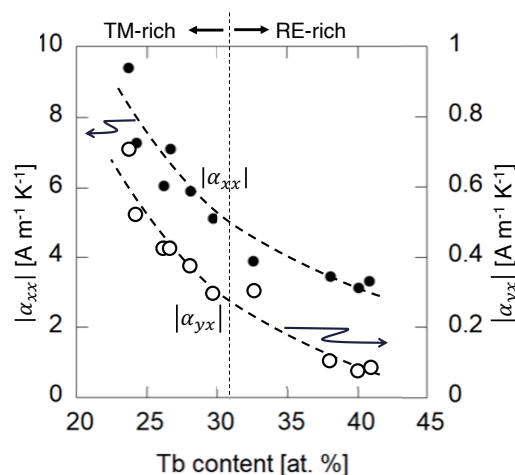


Fig. 2 Composition dependence of thermoelectric tensor in Tb-Fe-Co thin films.

GdFeCo フェリ磁性多層薄膜における異常ネルンスト電圧

小林祐希¹, 北澤楓太¹, 笠谷雄一², 吉川大貴², 塚本新²

(¹ 日本大学大学院理工学研究科, ² 日本大学理工学部)

Anomalous Nernst voltage in GdFeCo ferrimagnetic multilayer thin film

Yuki Kobayashi¹, Fuuta Kitazawa¹, Yuichi Kasatani², Hiroki Yoshikawa², Arata Tsukamoto²

(¹ Graduate school of Science and Technology, Nihon Univ.,

² College of Science and Technology, Nihon Univ.)

はじめに

温度勾配と磁化に共に直交する方向に電界が生じる異常ネルンスト効果を示す金属強磁性体(FM)を用いた[FM/FM]_n積層構造では、隣接磁性金属層間の磁気交換結合の有無による異常ネルンスト電圧の変調など単層膜とは異なる電気輸送現象の発現が期待される。金属層の電氣的導通による異常ネルンスト効果に起因する短絡電流の生成も考えられる。我々はこれまでに、GdFe フェリ磁性薄膜における異常ネルンスト係数 S_{ANE} の符号反転を含む組成依存性や電気輸送現象に関する物理定数との相関につき報告してきた¹⁾。本報告では、磁性金属の積層構造において生じる異常ネルンスト電圧の検出を目的として、GdFeCo を積層し横電圧検出端子部で上下層を短絡したフェリ磁性多層薄膜における検討を行った。

実験方法

GdFeCo フェリ磁性単層薄膜と GdFeCo フェリ磁性多層薄膜における異常ネルンスト電圧につき比較検討を行う。多層膜は磁性層(A層とB層)の保磁力が異なり、かつ垂直磁化膜となるように設計した。また磁気交換結合の分断を目的に5 nm厚のSiN中間層を挿入した。単層膜は多層膜の磁性層(A層)の合金組成と等しく、かつ総磁性層膜厚が等しくなるように設計した。このような単層膜: SiN(60 nm) / Gd₂₂Fe₆₈Co₁₀(20 nm) / SiN(5 nm) / Si sub., および二層膜: SiN(60 nm) / A層: Gd₂₂Fe₆₈Co₁₀(10 nm) / SiN(5 nm) / B層: Gd₂₇Fe₆₄Co₉(10 nm) / SiN(5 nm) / Si sub. をマグネトロンスパッタ法で作成した。これらの試料に対して膜面垂直(z)方向に外部磁界 H を印加し、膜面内(x)方向に温度勾配 $\nabla_x T$ を与え、電圧検出端子部で上下層を短絡し膜面内(y)方向の電圧 V_{yx} を測定した。

実験結果と考察

温度勾配が無いとき、および-20 K/cmのときの V_{yx} の外部磁界依存性を Fig. 1 に示す。単層膜・二層膜ともに $\nabla_x T = -20$ K/cm で V_{yx} の外部磁界に対するヒステリシス曲線が測定された。単層膜は2種の値に、二層膜は4種の値(V_a, V_b, V_c, V_d)に V_{yx} が離散化した。温度勾配が無いとき V_{yx} は外部磁界に依らず一定であることから、 V_{yx} は確かに温度勾配に起因する電圧であることを確認した。本試料系と同様の磁性層と SiN 中間層を有する GdFeCo フェリ磁性多層薄膜の磁気光学応答の外部磁界依存性も4値に離散化することが報告されている²⁾。二層膜試料を構成する各層はそれぞれ垂直磁化膜であり、保磁力の異なる上下層の組み合わせから4状態が存在し外部磁界の掃引により状態遷移するが、各磁化状態に対応し V_{yx} が4値を取ることが明らかとなった。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費(21K04184)の支援を受けたものである。

参考文献

- 1) Y. Kobayashi *et al.*, *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, **7**, 34-39 (2023).
- 2) S. Terashita *et al.*, 第39回 日本磁気学会学術講演会概要集, 10pD-11 (2015).

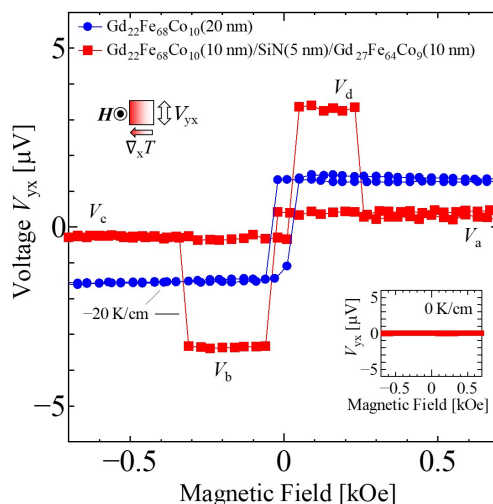


Fig.1 External magnetic field dependence of voltage V_{yx} of GdFeCo single/multi layer thin films.

巨大異常ネルンスト効果を示す Fe₃Ga 薄膜のスピンド分極バンド構造の観測

大和田清貴、中西楓恋、黒田健太、宮本幸治、奥田太一、
周偉男*、磯上慎二*、増田啓介*、桜庭裕弥*、木村昭夫
(広島大、*物材機構)

Unraveling spin-polarized band dispersions of Fe₃Ga thin films exhibiting a giant anomalous Nernst effect

K. Ohwada, K. Nakanishi, K. Kuroda, K. Miyamoto, T. Okuda,
W. Zhou*, S. Isogami*, K. Masuda*, Y. Sakuraba* and A. Kimura
(Hiroshima Univ., *NIMS)

はじめに

熱電変換材料は、排熱エネルギーから直接電気エネルギーへ変換が可能であることから、環境問題を解決するキーマテリアルの一つである。なかでも磁性体で発現する異常ネルンスト効果(ANE)は、熱勾配に対し垂直に起電力を発生するため、柔軟なデバイス応用が可能であるとして大きな注目を浴びている[1]。一方で、ANEで発生できる起電力は1Kあたり0.1μVオーダーであったが、最近Fe_{0.68}Ga_{0.32}薄膜において起電力が純Feに比べ2桁大きな2.4μV/Kに達することが報告された[2]。更に規則化したD0₃相Fe₃Gaでは起電力が4μV/Kに達し、これはバンド構造内に発生する仮想磁場(ベリー曲率)に起因する内因性効果が原因であると示唆されている[3]。この巨大ANEが内因性効果によって引き起こされているかどうかを確かめるためには、まずFe₃Gaのバンド構造にアプローチする必要があるが、これまでは第一原理計算を主体とした議論が行われてきた。一方、ベリー曲率をもとにした横熱電伝導度 α_{xy} はフェルミ準位(E_F)の位置に敏感に変化し、数十meV程度のエネルギーシフトで符号まで変わってしまうことがある。このことから、内因性機構の有無を判定するには、バンド構造を実験的に可視化し実際の E_F の位置を把握した上で、 α_{xy} との対応関係を明らかにする必要がある。角度分解光電子分光(ARPES)は物質のバンド構造を直接可視化できる実験手法としてよく知られるが、その高い表面感性から、へき開が可能な二次元系に適用が限定されていた。一方、Fe₃Gaはその高い3次元性のためへき開が困難で、これまでARPESを用いた実験は皆無であった。さらに、バルク試料の場合残留磁化が残らない場合が多く、スピンド分解ARPES(Spin-ARPES)実験には適さない。

実験手法と結果

そこで本研究では、物質・材料研究機構にて超高真空マグネトロンスパッタリング法を用いてD0₃相Fe₃Ga薄膜を成膜し、超高真空スーツケースを用いて広島大学HiSORに移送することにより、試料を大気にさらすことなく(Spin-)ARPES実験を行った。入射光のエネルギー($h\nu$)を60-100eVの範囲で変化させARPES測定を行うことにより、面直波数と $h\nu$ との関係を見出した。Fig.1は $h\nu=60$ eV(p 偏光)でのARPESイメージである。 E_F を横切る特徴的なバンド α と、 E_F から測って約1.2eV下から E_F に向かって分散する構造 β などいくつかのバンド分散が観測された。いくつかの面内波数(k_{\parallel})についてスピンド分解エネルギー分布曲線を観測したところ、 α と β は少数スピンドバンドと帰属された。さらに第一原理計算との比較から、実際の E_F は計算値に比べ+30meVのずれがあることもわかった。計算で得られたベリー曲率をもとに久保公式から得られた α_{xy} が、ちょうど実験で得られた E_F で増大することがわかった。その α_{xy} の増大はブリルアンゾーンのL点を囲む領域に現れる大きなベリー曲率に起因することが明らかとなった。

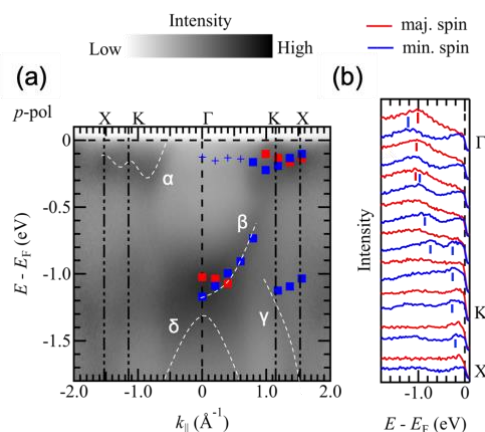


Fig.1: (a) ARPES image and (b) spin-resolved energy distribution curves at $h\nu=60$ eV along Γ KX line measured with p -polarized light.

参考文献

- 1) K. Uchida, W. Zhou, and Y. Sakuraba, *Appl. Phys. Lett.* **118**, 140504 (2021).
- 2) H. Nakayama *et al.*, *Phys. Rev. Mater.* **3**, 114412 (2019).
- 3) A. Sakai *et al.*, *Nature* **581**, 53 (2020).

Ge をドーブした Co 薄膜における異常ネルンスト効果

辻本卓哉¹, 藤田武志², 宮町俊生¹, 上田茂典³, 水口将輝¹

(名古屋大学¹, 高知工科大学², 物質・材料研究機構³)

Anomalous Nernst effect in Ge-doped Co thin films

Tsujimoto Takuya¹, Takeshi Fujita², Toshio Miyamachi¹, Shigenori Ueda³,

Masaki Mizuguchi¹

(Nagoya Univ.¹, Kochi Univ. Tech², NIMS³)

はじめに 新規熱電変換デバイスへの応用として異常ネルンスト効果 (anomalous Nernst effect: ANE) に注目が集まっている^[1]。一般的に ANE は温度勾配と磁化の外積方向に電圧が生じるため、従来のゼーベック効果よりも自由度の高いデバイス設計が可能となる。一方で、ANE はその変換効率の低さが問題となっており、一般的な強磁性体である Fe や Co でのネルンスト係数 (S_{xy}) は $0.3 \mu\text{V/K}$ 程度である。熱電変換などのデバイス化に向けてはおよそ $20 \mu\text{V/K}$ 以上の変換効率が必要とされており、近年では S_{xy} の大きな材料の探索や、ナノ構造の導入による ANE の増大などの研究が盛んに行われている。これまでに Co に MgO をドーブした薄膜において、ANE の増大を報告した^[2]。そこで本研究では、ドーブする材料を絶縁体から半導体に変えた薄膜における熱磁気特性の調査を目的とし、Co に Ge をドーブした薄膜を作製してその ANE を調べた。

実験方法 MgO(001) 基板上にマグネトロンスパッタにより組成の異なる $\text{Co}_{1-x}\text{Ge}_x$ 薄膜を室温で 5 種類作製した ($x = 0, 0.13, 0.17, 0.24, 0.35$)。ANE を含む磁気輸送特性を物理特性測定システム (PPMS) を用いて測定した。また、試料の電子状態を SPring-8 に設置された硬 X 線光電子分光測定装置により測定した。

実験結果 図 1 に示すように、Ge の添加量の増加に伴い ANE は増大し、Ge 濃度 $x = 0.24$ で最大値を示した。続いて、成膜後のアニール効果も調べた。 $x = 0.24$ の試料を 200°C および 400°C でアニールしたところ、ANE は増大し、 400°C でアニールした試料において $1.1 \mu\text{V/K}$ のネルンスト係数を確認した。硬 X 線光電子分光測定の結果より、試料のアニールにより、フェルミレベル近傍の電子状態が変調されたことがわかった。この電子状態の変化がネルンスト係数の増大に寄与している可能性が示唆された。

参考文献

- [1] H. Sharma, M. Mizuguchi *et al.*, *Sci. Rep.*, **13**, 4425 (2023).
 [2] P. Sheng, M. Mizuguchi *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **116**, 142403 (2020).

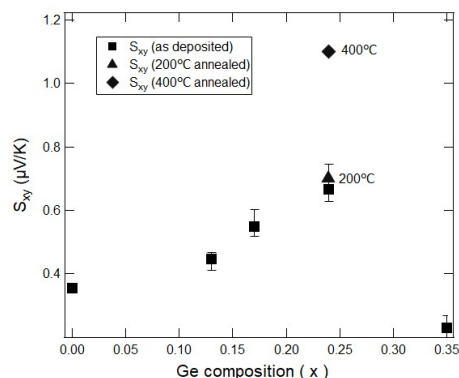


Fig.1. Ge composition and annealing temperature dependence of S_{xy} for Ge-doped Co thin films.