

トポロジカル絶縁体/磁性絶縁体二層膜における磁気特性の電圧制御

千葉貴裕¹, Alejandro O. Leon², 小峰啓史³

(¹福島高専, ²チリメトロポリタン工科大学, ³茨城大学)

Voltage-control of magnetic properties in topological-insulator/magnetic-insulator bilayers

T. Chiba¹, A. O. Leon², and T. Komine³

(National Inst. of Tech., Fukushima Coll., Metropolitan Tech. Univ., Ibaraki Univ.)

はじめに

近年注目を集めるトポロジカル絶縁体 (TI) は、物質内部は絶縁体であるが、その表面は低散逸で電気を流すことができる特殊な伝導特性をもっている。さらに注目すべき特性として、スピン運動量ロッキングと呼ばれる性質があり、表面に電流を流すことで高効率にスピンを生成できる。そのため、磁性体との界面では、巨大なスピン軌道トルクの発生が期待されている¹。一方でスピン運動量ロッキングの性質は磁気異方性にも影響を及ぼすことが指摘されている。しかしながら、これまでの研究では、TI 表面/界面における「スピン軌道トルク」、「磁気異方性」、さらに「磁化ダンピング」は独立に扱われていて、特にその同時電圧制御に関する知見は得られていなかった。そこで本研究では、TI 表面/界面に由来した上記3つの磁気特性に対する電界効果を理論的に解明することを目指した。

モデル

電子の運動を記述する有効ハミルトニアンに基づき、まず TI/磁性絶縁体二層膜の表面/界面における「スピン軌道トルク」、「磁気異方性エネルギー」、「磁化ダンピング」をフェルミエネルギーの関数として定式化した^{1,2)}。またゲート電圧を想定し、フェルミエネルギーを電圧の関数として求めることで、上記3つの磁気特性に対する電界効果を理論的に扱った。さらに定式化に基づいて、電圧制御磁気異方性による磁化反転のシミュレーション、および電圧制御磁化ダンピングによるマグノン輸送のスイッチングを評価した。これら2つの計算には、磁化の運動を記述するランダウ-リフシッツ-ギルバート (LLG) 方程式を用いた。また具体的な系として、磁化反転のシミュレーションには磁性不純物をドーピングした TI である Cr-doped BiSbTe、マグノン輸送のスイッチングには BiSbTeSe(TI)/Y₃Fe₅O₁₂ を想定した。

計算結果

磁気特性の電圧制御 : Cr-doped BiSbTe において、スピン軌道トルクに対する電界効果が比較的小さい一方で、磁気異方性エネルギーは数ボルトの電圧により 0~数 kJ/m³ の範囲で変調できることがわかった¹⁾。また Y₃Fe₅O₁₂ の垂直磁化膜の場合には、数ボルトの電圧により磁化ダンピングをオーダーで変調できることがわかった²⁾。**磁化反転およびマグノン輸送** : Figure 1 のような Cr-doped BiSbTe 膜の磁化反転をシミュレーションしたところ、20K において従来の強磁性体よりも一桁小さい電力 (~1 fJ/bit) で磁化反転できることがわかった¹⁾。また BiSbTeSe/Y₃Fe₅O₁₂ におけるマグノン輸送の電界効果を評価したところ、室温において On/Off 比 10² にてスイッチングできることがわかった²⁾。これにより TI/磁性絶縁体二層膜という単純な構造を基にした電圧制御磁気デバイスへの応用が期待される。

参考文献

- 1) M. Mogi *et al.*, Nat. Commun. **12**, 1404 (2021).
- 2) T. Chiba and T. Komine, Phys. Rev. Appl. **14**, 034031 (2020).
- 3) T. Chiba, A. O. Leon, and T. Komine, Appl. Phys. Lett. **118**, 252402 (2021).

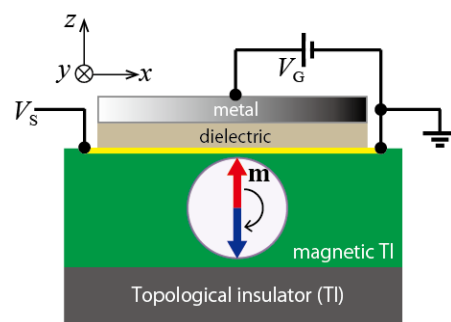


Fig.1 Schematic geometry (side view) of field-effect transistor (FET)-like device. **m** denotes the magnetization vector.

トポロジカル絶縁体 BiSb を接合した磁性細線における磁区の電流駆動

中谷 真規¹、高橋 真央¹、小倉 溪¹、石井 紀彦¹、Pham Nam Hai^{2,3}、宮本 泰敬^{1,3}(¹NHK 放送技術研究所、²東京工業大学、³JST CREST)

Current-driven magnetic domain motion in magnetic nanowire with topological insulator BiSb

Naoki Nakatani¹, Mao Takahashi¹, Kei Ogura¹, Norihiko Ishii¹, Pham Nam Hai^{2,3}, Yasuyoshi Miyamoto^{1,3}(¹NHK Science & Technology Research Labs. ²Tokyo Institute of Technology, ³JST CREST)

はじめに

将来の立体映像用ストレージの実現を目指して、大容量かつ超高速転送が可能な磁性細線メモリの研究を進めており、[Co/Tb]積層膜からなる磁性細線における電流磁壁駆動現象の検証を進めてきた¹⁾。一方、巨大なスピンホール角 θ_{SH} を示すトポロジカル絶縁体 BiSb を磁性細線に接合することにより、磁区を 7×10^5 A/cm² 程度の低電流で駆動できる可能性がある²⁾。そこで、BiSb を接合した磁性細線メモリ素子を初めて試作し、磁気光学顕微鏡により磁区の電流駆動を評価したので報告する。

実験方法と結果

Fig.1 に示す磁性細線メモリ素子を、イオンビームスパッタ、レーザー描画により表面熱酸化 Si ウェハ上に試作した。磁性細線は表面より BiSb(10)/Pt(0.5)/[Co(0.3)/Tb(0.55)]₃ (単位 nm) の積層構造とし、4 μ m 幅、60 μ m 長に加工した。さらに絶縁層 SiO₂(20)/Si₃N₄(5) を介して、上部に磁区を記録するための金属線(記録素子)を配置し、メモリ動作を検証した。BiSb を接合しない Pt/[Co/Tb]積層膜からなる磁性細線では、磁区駆動に必要な電流密度は 2.5×10^7 A/cm² であったが³⁾、BiSb を接合することによって必要な電流密度は約 1/5 となる 5.0×10^6 A/cm² まで低減でき、BiSb によるスピントルクが一定の磁区駆動の低電流化に寄与している結果が得られた。ただし、想定ほど低電流化を実現できなかったため、その原因について検証を進めた。Fig.2 に BiSb の接合の有無に対する Pt/[Co/Tb]磁性細線の磁気光学カー特性の違いを示す。磁性細線自体の保磁力は BiSb を接合することで若干低くなるものの、カー回転角は 0.24° から 0.007° まで減少し、磁性細線の磁気特性が大幅に劣化していた。Fig.3 に BiSb の接合有無の磁性細線表面の原子間力顕微鏡像の違いを示す。BiSb を接合しない場合、表面粗さ R_a は 0.63 nm であったが、BiSb の接合によって 3.27 nm まで増大し、表面平坦性の劣化は BiSb の粒成長によることが判明した。これらの結果は、磁性細線の微細加工プロセスにおけるレジストベイク時の加温(150℃)で BiSb の粒成長が促進されたほか、BiSb は飽和蒸気密度が小さく Co/Tb 層への層間拡散が起きた可能性を示している。当日は、BiSb の製膜条件や磁性細線構造を調整し、Pt/[Co/Tb]の磁気特性劣化を抑制した場合の磁区の電流駆動についても報告する予定である。

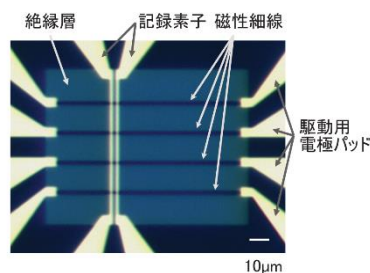


Fig.1 Fabricated magnetic nanowire memory element

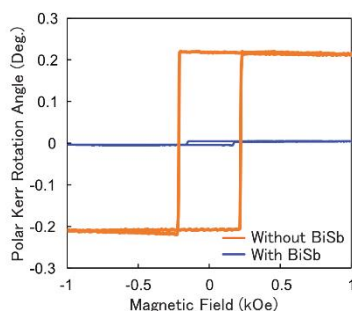


Fig.2 Magneto-optical properties of magnetic nanowires

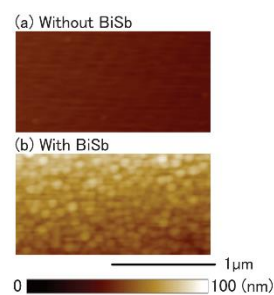


Fig.3 Surface AFM images of nanowire (a) without & (b) with BiSb

参考文献

- 1) Y. Hori *et al.*, MMM, R1-02 (2020)
- 2) N.H.D. Khang *et al.*, Sci Rep **10**, 12185 (2020)
- 3) 堀ほか, 第43回日本磁気学会学術講演会, 26aPS-21(2019)

Co₂MnSi/Pt におけるレーザー励起磁化歳差ダイナミクスと スピンミキシングコンダクタンス

佐々木悠太¹, 高橋有紀子¹, 葛西伸哉^{1,2}

(¹ 物材機構, ² JST さきがけ)

Laser pulse induced spin precessional dynamics and spin mixing conductance in Co₂MnSi/Pt

Y. Sasaki¹, Y. K. Takahashi¹, and S. Kasai^{1,2}

(¹ NIMS, ² JST-PRESTO)

はじめに

強磁性金属層(FM層)と非磁性重金属層(NHM層)を積層させたヘテロ構造は、スピン流を利用することで熱電材料やテラヘルツ波エミッタなどへの応用が検討されている.[1] FM層からNHM層へのスピン流注入の効率を調べる手法として spin-pumping 法がある. spin-pumping 法では、強磁性共鳴下における磁化歳差ダイナミクスによってスピン流をNHM層へと注入し、NHM層における逆スピンホール効果によってスピン流を面内方向の電流へと変換する. 注入されるスピン流の大きさはFM/NHM界面のスピンミキシングコンダクタンス $g_{\text{eff}}^{\uparrow\downarrow}$ に比例するため、大きな $g_{\text{eff}}^{\uparrow\downarrow}$ を有する積層構造や強磁性材料を探索する必要がある. 一方で、最近 Co₂MnSi/Pt において spin-pumping 法によって大きな逆スピンホール電圧が観測された.[2] この大きな逆スピンホール電圧から、Fe, CoFe/Pt と比較して3倍大きな $g_{\text{eff}}^{\uparrow\downarrow}$ が示唆されたが、 $g_{\text{eff}}^{\uparrow\downarrow}$ の測定は未だ行われていない.

本発表では、異なるキャップ層を有する単結晶 Co₂MnSi/Pt, MgO における磁化歳差ダイナミクスを全光学的手法によって調べ、その緩和過程からダンピング定数 α を求めた. 得られた α から $g_{\text{eff}}^{\uparrow\downarrow}$ を見積もり、その規則度依存性を調べた.

実験方法および実験結果

MgO(001)基板上に超高真空マグネトロンスパッタ法を用いて試料を作製した. 薄膜構成は基板側から、MgO(20)/Co₂MnSi (7)/Pt(2) (膜厚単位 nm)である. また、参照試料として Pt キャップ層を MgO(5)/Ta(2)に置換した試料についても作製した. 試料の規則度を変化させるために熱処理温度を $T_a=300\sim600^\circ\text{C}$ と様々に変化した. 磁化歳差ダイナミクスの測定には全光学的ポンプ・プローブ法による 時間分解分光法(TRMOKE)を用いた. 光源には中心波長 1030 nm, 繰り返し周波数 10 kHz, パルス幅 230 fs の Yb:KGW レーザーを用いた. ポンプ光を 365 Hz に変調し、ウォラストンプリズムを用いた差動方式でプローブ光のカー回転角 $\Delta\phi_K$ を測定した. 測定時には膜面垂直方向から 35° の角度で外部磁場 $\mu_0 H$ を印加した.

キャップ層の異なる $T_a=500^\circ\text{C}$ の Co₂MnSi 薄膜に対して様々な $\mu_0 H$ で測定した歳差シグナルを Fig.1(a), (b)にそれぞれ示す. 歳差周波数はキャップ層によらず同じであった. 一方で、歳差シグナルの緩和時間は Co₂MnSi/MgO よりも Co₂MnSi/Pt の方が短いことが分かった. α の値は MgO, Pt キャップ層を有する試料に対してそれぞれ 0.002, 0.008 であった. これらの値から見積もられた $g_{\text{eff}}^{\uparrow\downarrow}$ の値は $7.3\times10^{19} \text{ m}^2$ であった. この結果から、Co₂MnSi/Pt の $g_{\text{eff}}^{\uparrow\downarrow}$ が CoFe や Fe と比較して3倍程度大きいことが分かった. 発表では実験の詳細や規則度依存性について議論する.

本研究は JSPS 科研費 21K14218 および 18H03787 の助成を受けて行われた.

参考文献

- [1] T. Seifert, *et al.*, Nature Photon. **10**, 483 (2016).
- [2] Y. Sasaki, *et al.*, AIP Advances **10**, 085311 (2020).

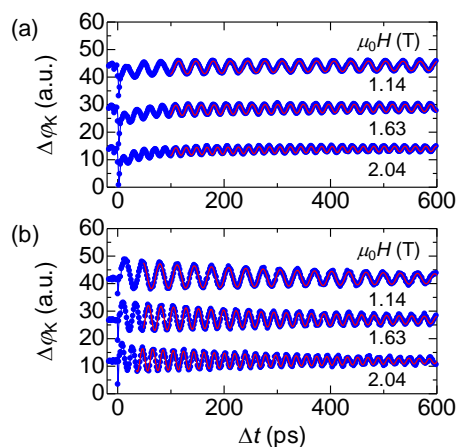


Fig.1 TRMOKE signal $\Delta\phi_K$ in (a) Co₂MnSi / MgO and (b) Co₂MnSi/Pt films with annealing temperature of 500°C . Solid lines are fitting results.

Magnetization switching driven by spin-orbit torque from a Co₂MnGa magnetic Weyl semimetal thin film

K. Tang^{1,2}, Z.C. Wen¹, Y.-C. Lau^{3,4}, H. Sukegawa¹, T. Seki^{3,4}, and S. Mitani^{1,2}

¹National Institute for Materials Science, Tsukuba 305-0047, Japan

²Graduate School of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba 305-8577, Japan

³Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai 980-8577, Japan

⁴Center for Spintronics Research Network, Tohoku University, Sendai 980-8577, Japan

Magnetization switching driven by spin-orbit torques (SOTs) is crucial to realize ultrafast and energy-efficient spintronic memory devices. SOTs generated from ferromagnetic materials (FMs) are of great scientific and technological interest because the spin polarization orientations of spin currents in FMs can be controlled by their magnetization directions, and some of them, such as *L1₀-FePt*,¹⁾ exhibit large charge-to-spin conversion efficiency. Recently, a remarkable anomalous Hall effect was observed in the ferromagnetic semimetal Co₂MnGa owing to the topological Weyl state in its band structure,^{2,3)} which may contribute to the SOT. For example, the efficient SOT magnetization switching has been reported using nonmagnetic Weyl semimetal WTe₂.⁴⁾ Thus, studying the spin transport properties of magnetic Weyl semimetal (MWS) combining FM and Weyl state is a promising step towards novel spintronic devices. In this work, we investigated the spin current generation and SOT-driven magnetization switching in Co₂MnGa-based MWS thin films.⁵⁾

Co₂MnGa-based heterostructures were deposited by magnetron sputtering. The films were characterized by reflection high-energy electron diffraction, atomic force microscopy, X-ray fluorescence and X-ray diffractometry. The magnetic properties were measured by a vibrating sample magnetometer. Furthermore, the samples were microfabricated into Hall bar structures by UV lithography. The transport properties of the films were characterized by harmonic Hall measurements in a physical property measurement system.

Epitaxial Co₂MnGa (001) films with flat surface morphology and highly *B2*-ordered structures were grown on MgO (001) substrates. The spin Hall efficiency ζ_{SH} was evaluated to be -7.8% in a 1.3-nm-thick Co₂MnGa film. The SOT-induced magnetization switching of a perpendicularly magnetized CoFeB layer was demonstrated in a SOT device with the core structure of Co₂MnGa/Ti/CoFeB. The Hall resistance change after electric current application suggests almost all the magnetic moments of the CoFeB film were reversed by the applied electrical current. Then we studied the mechanisms of spin current generation in this trilayer structure. The second harmonic Hall signal shows a non-zero value when the magnetization of Co₂MnGa is parallel to the electrical field. The Co₂MnGa thickness (t_{CMG}) dependence of $|\zeta_{\text{SH}}|$ shows the amplitude of ζ_{SH} slightly decreases with increasing t_{CMG} . The shift of anomalous Hall effect loops with applied current is nearly negligible. Those results suggest that the spin-orbit filtering effect at the Co₂MnGa/Ti interface and/or magnetization-independent spin Hall effect in Co₂MnGa may account for the spin current generation in the Co₂MnGa/Ti/CoFeB heterostructure. This work not only provides contributions to the understanding of the mechanisms of spin-current generation from MWS-based heterostructures but also open a way for the applications of MWS in spintronics.

This work was partially supported by the KAKENHI (Nos. JP20K04569, JP20H00299, JP16H06332, and JP20K15156) from the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS), the Inter University Cooperative Research Program of the Institute for Materials Research, Tohoku University (No. 20K0058).

References

- 1) T. Seki *et al.*, Phys. Rev. B, **100**, 144427 (2019).
- 2) A. Sakai *et al.*, Nat. Phys., **14**, 1119 (2018).
- 3) Q. Wang *et al.*, Appl. Phys. Lett., **115**, 252401 (2019).
- 4) S. Shi *et al.*, Nat. Nanotechnol., **14**, 945–949 (2019).
- 5) K. Tang *et al.*, Appl. Phys. Lett., **118**, 062402 (2021).

Fe_{100-x}Rh_x合金における異常ネルンスト効果の組成依存性

山内友喜¹、濱田勇樹¹、黒川雄一郎¹、湯浅裕美¹

(¹九州大学)

Anomalous Nernst effect dependence on composition in Fe_{100-x}Rh_x alloys

T. Yamauchi¹, Y. Hamada¹, Y. Kurokawa¹, H. Yuasa¹

(¹ Kyushu Univ.)

はじめに

異常ネルンスト効果は磁性体に熱流が流れるときに、磁化と熱流の外積方向に起電力を生じる。起電力を向上して活用すべく研究され、従来から知られていた強磁性に加えて、ノンコリニア反強磁性でも発現すること、局所的な有効磁場が重要であることが報告されている^[1-3]。本報告では、反強磁性から強磁性に一次磁気相転移する FeRh 合金において、相転移点の磁気フラストレーションが異常ネルンスト効果に与える影響を調べるべく、FeRh 合金の組成を変化させて異常ネルンスト効果を測定することで、磁性状態と異常ネルンスト効果の関係を調べた。

実験方法

Fe_{100-x}Rh_x (50nm) / SiN (5nm) を Fe と Rh のコスツパタリングで熱酸化シリコン基板上に成膜し、等原子組成付近で $X=45, 48, 50, 52, 54, 60$ のように変化させた。成膜された Fe_{100-x}Rh_x 合金を規則化させるために、真空中で 1 時間、750℃ でアニールした。その後、X-Ray Diffraction : XRD (θ -2 θ) で Fe_{100-x}Rh_x 膜の結晶構造を同定し、出来た膜について磁化測定、異常ネルンスト効果の測定を行った。

実験結果

Fig. 1 に XRD の結果を示す。全ての組成において CsCl 型規則相 FeRh (100) (110) の回折ピークを得ることができた。しかし、 $X=50\sim60$ では、規則相と共に不規則 fcc 相も検出された。

次に、異常ネルンスト起電力を測定し、異常ネルンスト係数 $N: N = (\Delta V / \Delta T) \cdot (t / l)$ を算出し、飽和磁化と共に Fig. 2 に示す。CsCl 相かつ強磁性 FeRh である組成 $X=45, 48$ では、Fe 単体に比べ約 10 倍の異常ネルンスト係数が得られた。しかしながら、異常ネルンスト係数と磁化の大きさは Fe を除いて同じ組成依存性を示し、これは従来から知られている磁化と異常ネルンスト係数の関係であることから、磁気相転移に特有の増大では無いと推測される。一方、Fe に対して約 10 倍の N を示した理由については、異常ネルンスト角の測定などを踏まえて議論する予定である。

参考文献

- [1] A. Sakai *et al.*, Nature **581**, 53-57 (2020).
- [2] M. Mizuguchi *et al.*, Sci, Technol. Adv. Mater. **20**, 264 (2019).
- [3] M. Ikhlas *et al.*, Nature Physics **13**, 1085 (2017).

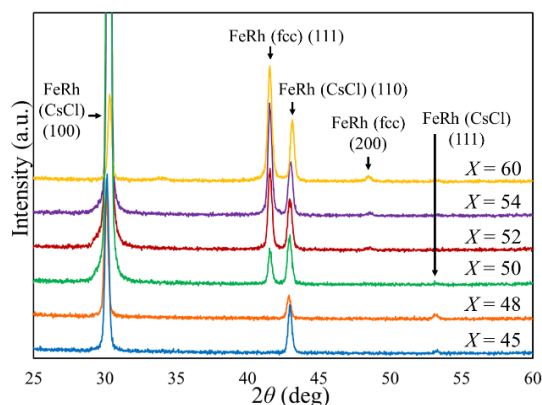


Fig. 1 XRD profiles for Fe_{100-x}Rh_x ($X=45, 48, 50, 52, 54$ and 60)

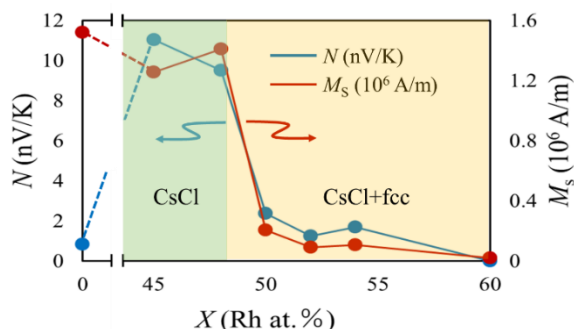


Fig. 2 Composition dependence of anomalous Nernst coefficient and magnetization.

半導体/強磁性体積層構造による横ゼーベック係数の増大

北浦 怜旺奈¹, 石部 貴史¹, Sharma Himanshu², 水口 将輝^{2,3}, 中村 芳明¹

(阪大院基礎工¹, 東北大金研², 名大未来研³)

Enhancement of transverse Seebeck coefficient using semiconductor/ ferromagnetic metal multilayer

Reona Kitaura, Takafumi Ishibe, Himanshu Sharma, Masaki Mizuguchi, Yoshiaki Nakamura

(Osaka Univ.¹, Tohoku Univ.², Nagoya Univ.³)

はじめに

熱から電気へ直接変換可能な熱電変換は、異常ネルンスト効果を利用したものとゼーベック効果を利用したものが多く研究されている。同じ無次元性能指数 ZT が得られた場合、異常ネルンスト効果を用いた熱電変換デバイスは、ゼーベック効果を用いたデバイスよりも熱電変換効率の最大値が高いことが理論的に提唱され、注目を集めている[1]。近年、強磁性金属/常磁性金属積層構造において、界面効果により異常ネルンスト効果の大きさの指標の一つである横ゼーベック係数が増大することが報告された[2]。しかし、一般に金属材料の熱伝導率は高いため、 ZT は低い値に留まる。このため、横ゼーベック係数の増大と同時に熱伝導率の低減が可能な材料が求められる。一方で、ゼーベック効果を用いた熱電変換では、半導体ナノ構造の導入による熱伝導率の低減[3,4,5]、アモルファス半導体を用いることで劇的に低い熱伝導率をもつ材料が多く報告されている[6]。そこで我々は、熱伝導率低減と横ゼーベック係数増大の同時実現を目指して、低熱伝導率なアモルファス半導体層と強磁性金属層からなる積層構造を提案する。本研究では、特に横ゼーベック係数増大に注目して、半導体 Si/強磁性金属 Co 積層構造を作製し、界面効果による横ゼーベック係数増大の観測を目的とした。

実験方法

電子線蒸着装置を用いて、Si (001)基板上に Co, Si をそれぞれ同じ膜厚(20 nm)で交互に積層した (基板温度: 室温)。比較用試料として、室温で Co 単層膜を作製した。構造評価には、走査型電子顕微鏡法 (SEM)、X 線回析法、ラマン分光法を用いた。横ゼーベック係数評価には、物理特性測定装置 (PPMS) を、熱伝導率測定には 2ω 法を用いた。

実験結果

Si/Co 積層構造の SEM 像を確認したところ、各層 20 nm で均一に積層されていることが分かった。横ゼーベック係数を測定したところ、この Si/Co 積層構造は、参照用の Co 単層膜よりも 2.4 倍程度高い横ゼーベック係数を示した。これより、従来、強磁性金属/常磁性金属積層構造においてのみ観測されてきた横ゼーベック係数増大効果が、半導体 Si/強磁性金属 Co 積層構造においても発現することが明らかとなった。本講演で詳細を報告する。

参考文献

[1] M. Mizuguchi, et al, *Sci. Technol. Adv. Mater.* **20**, 262 (2019). [2] K. Uchida, et al., *Appl. Phys. Lett.* **114**, 113902 (2019). [3] Y. Nakamura, et al, *Nano Energy* **12**, 845 (2015). [4] T. Taniguchi, et al, *ACS Appl. Mater. Interface* **12**, 25428 (2020). [5] Y. Nakamura *Sci. Technol. Adv. Mater. Interface* **19**, 31 (2018). [6] S. Kwon, et al, *ACS Nano* **11**, 2470 (2017).