

強磁性金属/酸化物ヘテロ構造を用いた スピン軌道トルクデバイスの開発

Spin-orbit torque device using ferromagnetic metal/oxide heterostructure

研究代表者 北海道大学 大学院情報科学研究院 准教授 山ノ内 路彦*

Michihiko Yamanouchi

For realizing high-performance spin-orbit torque device, we investigated current-induced effective magnetic field in stacking structure consisting of $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ with two-dimensional electron system showing large spin-orbit interaction at the interface and a ferromagnetic layer ($\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$ or CoFe). In both structures, applying an in-plane current created an in-plane effective magnetic field orthogonal to the current direction. The direction of effective magnetic field is consistent with that induced by spin-orbit torque originating from the spin-orbit interaction at the interface. For the $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$ structure, the effective magnetic field was enhanced by creation of two-dimensional electron system at the $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ interface. Further enhancement of the effective magnetic field is expected by clarifying mechanism behind the generation of effective magnetic field.

要旨

高性能なスピン軌道トルクデバイスの実現をめざして、界面に強いスピン軌道相互作用を示す2次元電子が形成される $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ と、強磁性層 ($\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$ 及び CoFe) との積層構造において、膜面内方向の電流印加によって誘起される有効磁場を調べた。どちらの構造においても電流方向と直交する面内方向の有効磁場が誘起された。これらの有効磁場の方向は界面起因のスピン軌道トルクによる有効磁場の方向と矛盾しない。 $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$ の場合には、 $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ 界面の2次元電子の形成によって有効磁場が増加したことから、これらの積層構造における有効磁場の発生機構を明らかにすることにより、さらなる有効磁場の増大が期待される。

1. まえがき

次世代の高速かつ低消費電力な磁気ランダムアクセスメモリや脳型コンピュータなどの構成デバイスとして、3端子磁気トンネル接合(MTJ)が注目されている。この3端子MTJへの情報書き込みでは、電気的かつ高効率に強磁性体の磁化方向を操作することが求められる。近年、その磁化方向の操作手法としてスピン軌道相互作用に基づくスピン軌道トルクを利用した磁化反転が注目されており、精力的な研究が進められている。PtやTaなどの強いスピン軌道相互作用を示す重金属層などと強磁性層を積層した強磁性ヘテロ構造に膜面内方向の電流を印加する

と、強磁性層の磁化にスピン軌道トルク⁽¹⁾が作用する。スピン軌道トルクの誘起には、電気的にスピンを生成するスピン源が必要である。スピン軌道トルクを利用した磁化反転についての多くの研究では、重金属へ電流を印加した際に、スピン軌道相互作用に起因したスピンホール効果で生成されるスピスがスピン軌道トルクを誘起するために利用されている。しかし、電流からスピンを生成(電流-スピン変換)する変換効率が低く、磁化反転に必要な電流密度が高いことが課題となっている。そのような中で、酸化物ヘテロ構造 $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ (LAO/STO)の界面に誘起される2次元電子⁽²⁾の強いスピン軌道相互作用を利用すると、重金属やトポロジカル絶縁体よりも高効率に電流-スピン変換⁽³⁾⁽⁴⁾できることが報告され、新たな電流-スピン変換材料として酸化物ヘテロ構造が注目を集めている。この酸化物ヘテロ構造を用いて生成したスピンを利用することにより、高効率なスピン軌道トルクの誘起が期待されるが、酸化物ヘテロ構造の電流-スピン変換を利用したスピン軌道トルクの誘起に関する報告はない。本研究では、応用上重要な強磁性金属とLAO/STOからなる積層構造において、膜面内方向の電流印加によりスピン軌道トルクを誘起することを目的とした。

本研究では、まず作製が比較的容易な全て酸化物で構成される強磁性酸化物/LAO/STOにおいて、スピン軌道トルクによる電流誘起有効磁場を調べた。そして、電流誘起有効磁場を増大するための強磁性

* 北海道大学 電子科学研究所 准教授

層、及びLAOの膜厚を調べ、それをもとに強磁性金属/LAO/STOを作製して、電流誘起有効磁場を調べた。

2. LSMO/LAO/STO デバイス

2.1 有効磁場評価デバイスの作製方法

強磁性酸化物として $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$ (LSMO)に着目した。これまでの研究から、LSMO/LAO/STOにおいては、LAO/STO界面の2次元電子の有無に応じてスピントラッキング相互作用に起因したプレーナーホール効果(PHE)の符号が変化することがわかっている⁽⁵⁾。また、予備実験の結果、膜面内方向に印加した電流によって、LSMOに有効磁場が作用することが分かっている。そこで、LSMO/LAO/STOにおいて誘起される有効磁場と2次元電子の有無、及びPHEとの相関を調べた。

パルスレーザー堆積法を用いて、STO(001)単結晶基板の上に、LSMO(5.2)/LAO(0, 3.2)、及びLSMO(7.2)/LAO(0, 0.8, 2.4)を成膜した。括弧内の数字はnm単位の膜厚である。図1(a)に、作製した試料の層構造の模式図を示す。ここで、原子レベルで平坦、かつ TiO_2 で終端されたSTO基板表面を得るため、成膜前に純水でSTO基板を洗浄してSrOを除去した後、大気中950°Cで30分間熱処理した。LAO薄膜を成膜後、酸素欠損を除去するために大気中300°Cで1時間熱処理した。続いて、成膜装置に試料を再度導入し、LSMO薄膜を成膜した。LAO(LSMO)成膜中の基板温度と酸素圧はそれぞれ、800(700)°C、 5×10^{-4} (25) Paであった。LAO薄膜については、成膜中に反射高速電子回折の強度振動をモニターすることにより膜厚を制御した。LSMO薄膜については、成膜後、X線反射率を測定することにより膜厚を決定した。

LSMOを成膜していないLAO(2.4, 3.2)/STOはともに電気伝導性を示し、それらの移動度、及びシートキャリア濃度は先行研究の結果と2倍以内で一致した。一方で、LAO(0.8)/STOは絶縁的であった。これらの結果は、先行研究のLAO/STO界面に2次元電子が形成されるLAO膜厚は1.6 nm以上という結果と一致しており⁽²⁾、本研究のLAO/STOにおいても界面に2次元電子が形成されていると考えられる。図1(b)にLSMO(5.2)/LAO(0, 3.2)/STO、及び

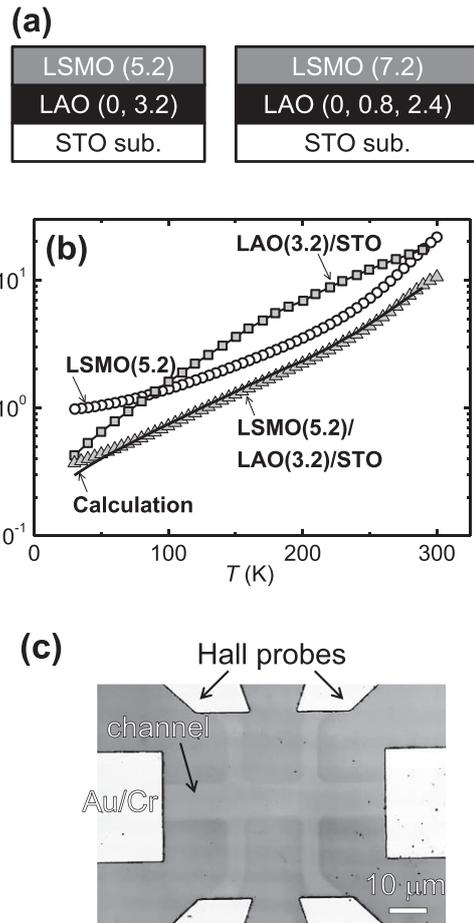


図1 (a) 作製した試料の積層構造。(b) シート抵抗 R_{sheet} の温度依存性。(c) ホールバー形状デバイスの光学顕微鏡写真。

LAO(3.2)/STOにおけるシート抵抗 R_{sheet} の温度 T 依存性を示す。LSMO/LAO/STOの R_{sheet} は、LSMO/STOとLAO/STOの合成シート抵抗と良く一致するため、LSMO/LAO/STOのLAO/STO界面にはLSMO層の成膜後においても2次元電子が形成されていると考えられる。

続いて、電流誘起有効磁場を調べるため、作製した酸化物ヘテロ構造をフォトリソグラフィとArイオンミリングを用いて、図1(c)に示すような2対のホールプローブを備えたチャンネル幅10 μm のホールバー形状デバイスに加工した。

2.2 LSMO/LAO/STOにおける磁気輸送特性

LSMO(7.2)/LAO(0, 0.8, 2.4)/STOについて、図2(a)に示す測定系を用いて、2次元電子の有無とPHEの相関を調べた。[110]方向に外部磁場 $\mu_0 H = 0.5 \text{ T}$ を印加して磁化方向をそろえた後、面内磁場を時計回りまたは反時計回りに回転させながらチャンネルに

100 μA の電流を印加して PHE を反映する横抵抗 R_{yx} を測定した．ここで μ_0 は真空の透磁率である．図 2(b), (c), (d) にそれぞれ LSMO(7.2)/LAO(0, 0.8, 2.4)/STO における規格化 R_{yx} の面内磁場角度 ϕ 依存性を示す．ここで，LAO(0.8, 2.4)/STO は明確な ϕ 依存性を示さないため，観測された R_{yx} の ϕ 依存性は LSMO 層に起因するものである．作製した全ての酸化物ヘテロ構造において，45, 135, 225, 315 度の周囲にヒステリシスが観測されたことから，作製した LSMO/LAO/STO, 及び LSMO/STO は，膜面内で $\langle 110 \rangle$ を磁化容易軸とする二軸の磁気異方性を示すと考えられる．また，それらのヒステリシスの極性は LSMO(7.2)/LAO(0, 0.8)/STO と LSMO(7.2)/LAO(2.4)/STO で反転した．LAO(2.4)/STO の界面には 2 次元電

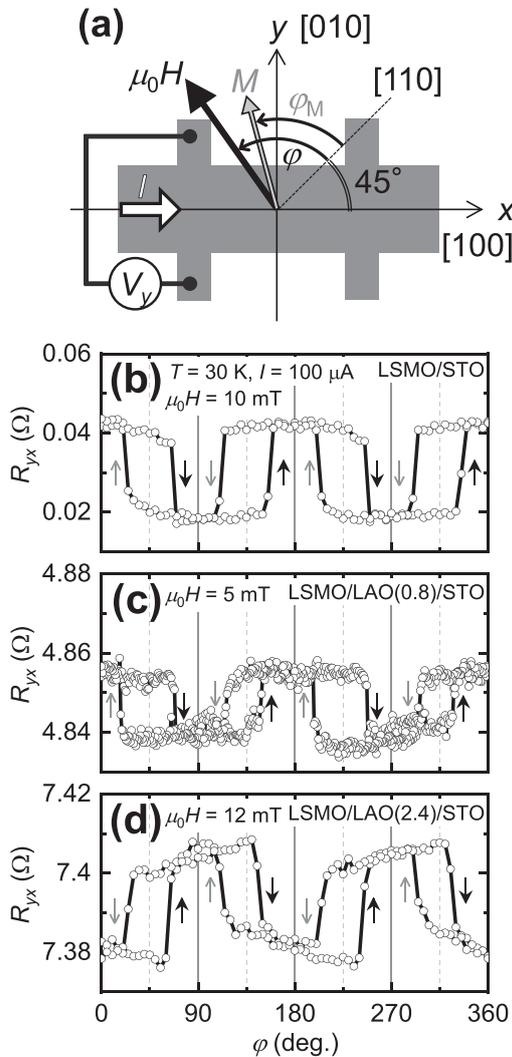


図2 (a) LSMO/LAO/STO デバイスにおける磁気輸送特性，及び電流誘起有効磁場の測定系の模式図．(b), (c), (d) それぞれ LSMO(7.2)/LAO(0, 0.8, 2.4)/STO における横抵抗 R_{yx} の面内磁場角度 ϕ 依存性．

子が形成されているため，これは，LSMO/LAO/STO で観測された LAO/STO 界面の 2 次元電子による PHE 係数の符号変化と一致する⁽⁵⁾．

2.3 LSMO/LAO/STO における電流誘起有効磁場

LSMO(7.2)/LAO(0, 0.8, 2.4)/STO において，面内電流の印加によって誘起される有効磁場を求めた．素子温度 $T_d = 40\text{ K}$ において外部磁場で LSMO の磁化方向を磁化容易軸の一つである $[\bar{1}10]$ 方向に揃えた後， $[0\bar{1}0]$ 方向の外部磁場 $\mu_0 H_y$ を掃引し， $[\bar{1}10]$ から $[\bar{1}\bar{1}0]$ に磁化方向がスイッチングする際の R_{yx} の変化を測定した．ここで，チャンネルに印加した電流は図 2(a) の左(右)から右(左)方向を正(負)とし，縦抵抗を用いて電流印加時の T_d を決めた．図 3(a), (b), (c) にそれぞれ LSMO(7.2)/LAO(0, 0.8, 2.4)/STO における規格化 R_{yx} の $\mu_0 H_y$ 依存性を示す．LSMO(7.2)/LAO(0, 0.8)/STO において，規格化 R_{yx} はある磁場(スイッチング磁場 H_{sw}) で急激に増加した．一方で，LSMO(7.2)/LAO(2.4)/STO においては，規格化 R_{yx} は H_{sw} で急激に減少した．規格化 R_{yx} のスイッチング方向の反転は，前述の 2 次元電子を有する LAO/STO による

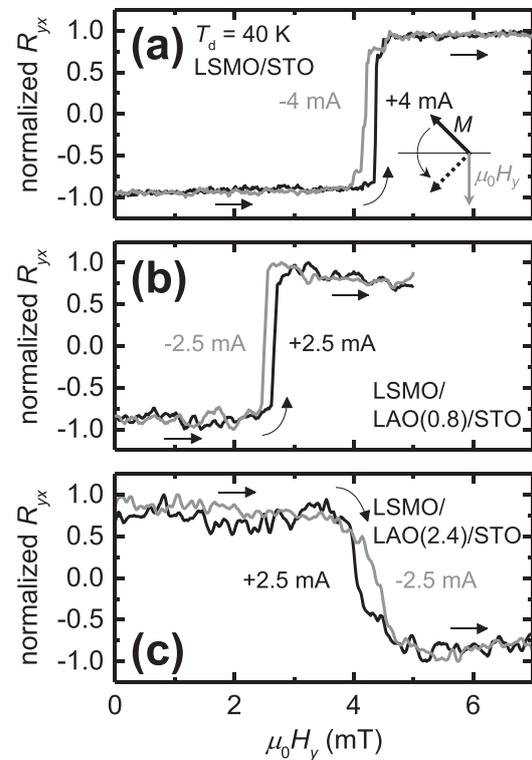


図3 (a), (b), (c) $T_d = 40\text{ K}$ において，LSMO(7.2)/LAO(0, 0.8, 2.4)/STO にそれぞれ $\pm 4\text{ mA}$, $\pm 2.5\text{ mA}$, $\pm 2.5\text{ mA}$ を印加したときの規格化 R_{yx} の $\mu_0 H_y$ 依存性．

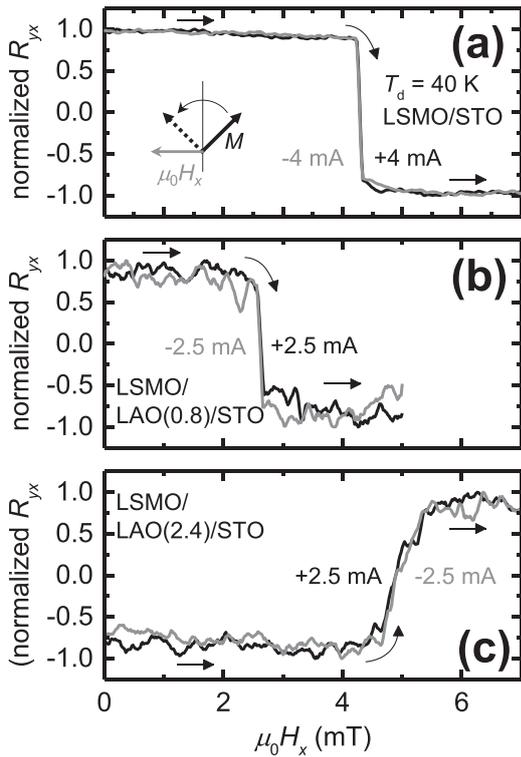


図4 (a), (b), (c) $T_d = 40$ Kにおいて、LSMO(7.2)/LAO(0, 0.8, 2.4)/STOにそれぞれ ± 4 mA, ± 2.5 mA, ± 2.5 mAを印加したときの規格化 R_{yx} の $\mu_0 H_x$ 依存性.

PHE 係数の符号反転を反映する. 正負電流を印加した場合の H_{sw} の変化に着目すると, LSMO(7.2)/LAO(2.4)/STO における H_{sw} については, 負電流を印加した場合のスイッチング磁場の方が正電流を印加した場合よりも大きい. 一方, LSMO(7.2)/LAO(0, 0.8)/STO における H_{sw} については, 正電流を印加した場合のスイッチング磁場の方が負電流を印加した場合よりも大きい. これらのことから, LSMO(7.2)/LAO(0, 0.8, 2.4)/STO において y 方向の有効磁場 H_{eff} が誘起されており, LSMO(7.2)/LAO(0, 0.8)/STO と LSMO(7.2)/LAO(2.4)/STO で, 誘起されている H_{eff} の方向が逆方向であると考えられる. 続いて, x 方向の有効磁場を調べた. 素子温度 $T_d = 40$ Kにおいて外部磁場で LSMO の磁化方向を磁化容易軸の一つである $[110]$ 方向に揃えた後, $[\bar{1}00]$ 方向の外部磁場 $\mu_0 H_x$ を掃引し, $[110]$ から $[\bar{1}10]$ に磁化方向がスイッチングする際の R_{yx} の変化を測定した図 4(a), (b), (c) にそれぞれ LSMO(7.2)/LAO(0, 0.8, 2.4)/STO における規格化 R_{yx} の $\mu_0 H_x$ 依存性を示す. H_{sw} が電流方向にほとんど依存しないことから, x 方向の有効磁場は y 方向の有効磁場に比べて無視でき

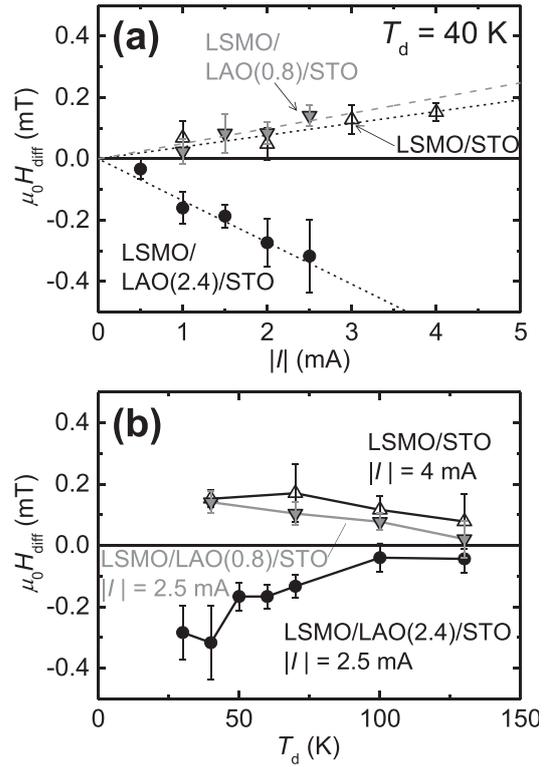


図5 (a) LSMO(7.2)/LAO(0, 0.8, 2.4)/STOにおける $T_d = 40$ K の $\mu_0 H_{diff}$ の電流依存性. (b) LSMO(7.2)/LAO(0, 0.8, 2.4)/STO における $|I| = 2.5$ mA 印加時の $\mu_0 H_{diff}$ の温度依存性.

ると考えられる.

正(負)の電流印加時の H_{sw} をそれぞれ $H_{sw}(+)$, $H_{sw}(-)$ とすると, $H_{diff} = H_{sw}(+) - H_{sw}(-)$ は, H_{eff} の 2 倍に対応する. 図 5(a) に LSMO(7.2)/LAO(0, 0.8, 2.4)/STO における $T_d = 40$ K の $\mu_0 H_{diff}$ の電流依存性を示す. 全ての積層構造において, $\mu_0 H_{diff}$ は電流に対してほぼ線形に変化しており, 電流によって H_{eff} が誘起されていると考えられる. LSMO においては, 2.8 nm 程度の絶縁的な層が形成されること, 及び LSMO と LAO/STO 界面の 2 次元電子の分流比を考慮すると, $T_d = 40$ K において, 全電流の 5/6 の電流が LSMO に流れる. したがって, LSMO(7.2)/STO, 及び LSMO(7.2)/LAO(2.4)/STO における LSMO に流れる電流密度当たりの H_{eff} の発生効率, は $T_d = 40$ K において, それぞれ $1.7 \times 10^{-15} \text{ Tm}^2 \text{ A}^{-1}$, $-7.2 \times 10^{-15} \text{ Tm}^2 \text{ A}^{-1}$ となった. 以上から, 界面に 2 次元電子が形成された LAO/STO 上に LSMO(7.2) を成膜することにより, 単位電流密度当たりの H_{eff} の発生効率は, LSMO(7.2)/LAO(0, 0.8)/STO における H_{eff} の発生効率の約 4 倍に増加したと考えられる. 観測された H_{eff} についてさらに理解を深めるために, $\mu_0 H_{diff}$ の T_d 依存性を調べた(図 5(b) 参照).

H_{diff} すなわち H_{eff} の大きさは、温度上昇とともに減少し、それらの極性は測定温度の範囲では変化しなかった。この H_{eff} の温度依存性の起源については明らかになっておらず、その起源の解明にはさらなる研究が必要である。

LSMO/LAO/STO で観測された有効磁場の機構として、LAO/STO 界面を流れる電流が発生する電流磁場が考えられる。LAO/STO 界面に流れる電流は 40 K において全電流の 1/6 である。一様電流を仮定してビオ・サバールの法則からその電流が発生する電流磁場(膜面内方向成分)を計算すると、その大きさは $I = 2.5$ mA のとき、 2.4×10^{-2} mT となった。この電流磁場の大きさは観測された $\mu_0 H_{\text{diff}}$ よりも一桁以上小さいため、LAO/STO 界面の電流による電流磁場では観測された $\mu_0 H_{\text{diff}}$ の大きさを説明できない。LSMO/LAO/STO 構造では、LAO/STO 界面に形成された 2 次元電子と LSMO 層間に LAO を介した磁気的な結合が誘起されることが報告されており⁽⁶⁾、本研究においても LAO/STO 界面の 2 次元電子の形成によってスピン軌道相互作用に関係した PHE 係数の符号が反転し、それと対応して H_{eff} にも変化が現れた。また、観測された H_{eff} の方向は界面起因のスピン軌道トルクによる有効磁場の方向と矛盾しない。これらのことから、LSMO(7.2)/LAO(2.4)/STO で観測された H_{eff} の符号反転と発生効率の向上は、LAO/STO 界面の 2 次元電子の形成によって LSMO/LAO 界面近傍のスピン軌道相互作用が変化したことに関係していると考えている。界面に 2 次元電子のない LAO/STO 上に成膜した LSMO、及び LSMO 単層において観測された H_{eff} は、膜厚方向に非対称な層構造であるため、界面のスピン軌道相互作用に関係している可能性があるが、機構の解明には、層構造を対称にした積層構造などで系統的な研究が必要である。

LSMO(7.2)/LAO(2.4)/STO において、PHE 係数の符号反転と H_{eff} の発生効率向上の関係が示唆されたことから、PHE の符号反転が起こる強磁性層、及び LAO 膜厚の条件を調べることにより、 H_{eff} の発生効率向上が期待される。そこで、LSMO/LAO/STO を用いて、PHE の符号反転が起きる強磁性層、及び LAO 膜厚の条件を調べた。まず、LSMO 膜厚を固定して LAO 膜厚の異なる LSMO/LAO/STO を作製し PHE 係数を調べた。図 6 (a) に LSMO(5.2)/LAO(0, 2.4, 5.6)/STO における PHE

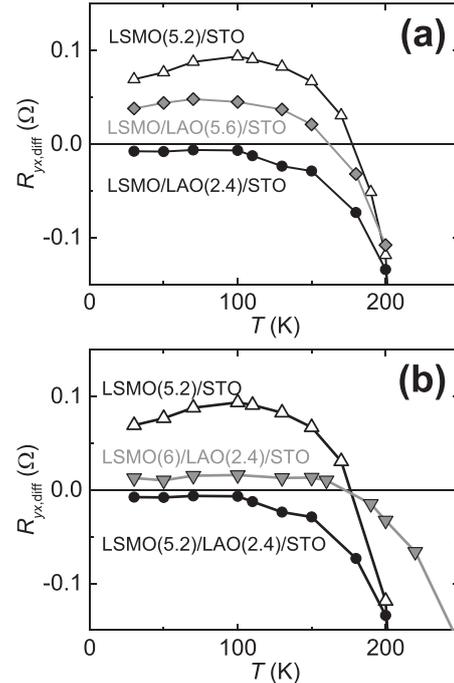


図6 (a) LSMO(5.2)/LAO(0, 2.4, 5.6)/STO における PHE 係数 $R_{yx,diff}$ の温度依存性. (b) LSMO(5.2, 6)/LAO(2.4)/STO における PHE 係数 $R_{yx,diff}$ の温度依存性.

係数 $R_{yx,diff}$ の温度依存性を示す。LAO 膜厚を厚くすると、低温での PHE 係数の符号は、LSMO 単層と同符号になった。ここで、LAO(5.6)/STO は電気伝導性を示すため、界面に 2 次元電子が形成されていると考えられる。このことから、LAO 膜厚は 2 次元電子が形成される範囲で薄い方がよいと考えられる。次に、LAO 膜厚を固定して LSMO 膜厚の異なる積層構造を作製し PHE 係数を調べた。図 6 (b) に LSMO(5.2)/STO、及び LSMO(5.2, 6)/LAO(2.4)/STO における $R_{yx,diff}$ の温度依存性を示す。LSMO 膜厚を厚くすると、低温での PHE 係数の符号は、LSMO 単層と同符号になった。このことから、LSMO 膜厚も薄い方がよいと考えられる。

3. CoFe/LAO/STO デバイス

3.1 有効磁場評価デバイスの作製方法

LSMO/LAO/STO で得られた知見をもとに、強磁性金属/LAO/STO 構造を作製した。LSMO/LAO/STO 構造と同様の方法で有効磁場を評価するため、強磁性金属として面内に磁気異方性を示すことが予想される CoFe を用い、膜厚は、これまでに強磁性を示すことを確認している 2.5 nm とした。LAO/STO 界面に 2 次元電子が形成される LAO 膜厚は 1.6 nm 以上であることが報告されている⁽²⁾。しかし、LAO/STO 上に金

属を成膜すると、2次元電子が形成されるLAO膜厚が薄くなり、0.4 nm以上のLAO膜厚で2次元電子が形成されることが報告されている⁽⁷⁾。これを利用すると、CoFe/LAO/STO構造にすることにより、LAO膜厚を薄くすることができ、界面の2次元電子の効果を効率良くにCoFeに作用させることができると期待される。そこでLAO膜厚を1.2 nmとした。

LSMO/LAO/STOの作製と同様の方法で基板処理したSTO(001)基板にパルスレーザー堆積法を用いてLAO(1.2)を成膜した後、酸素欠損を除去するために大気中300℃で1時間熱処理した。本構造では、強磁性金属とLAOとの界面が重要となる。そこで、強磁性金属を成膜するチャンバーに移動して真空中300℃で10分間熱処理して表面の吸着物を除去した後、膜厚2.5 nmのCoFe薄膜をRFマグネトロンスパッタリング法で成膜した。最後にキャッピング層として膜厚2 nmのMgOを電子線蒸着法で堆積した。積層構造全体の層構造は、表面側からMgO(2)/CoFe(2.5)/LAO(1.2)/STOである。LAO成膜中の基板温度と酸素圧はそれぞれ、800℃、 5×10^{-4} Paであり、成膜中に反射高速電子回折の強度振動をモニターすることにより膜厚を制御した。CoFeとMgOについては室温で成膜し、成膜レートから膜厚を決定した。本研究と同様の条件でサーマルクリーニングしたSrRuO₃とPtの積層構造においては、Pt中のスピンホール効果に起因すると考えられるスピン軌道ト

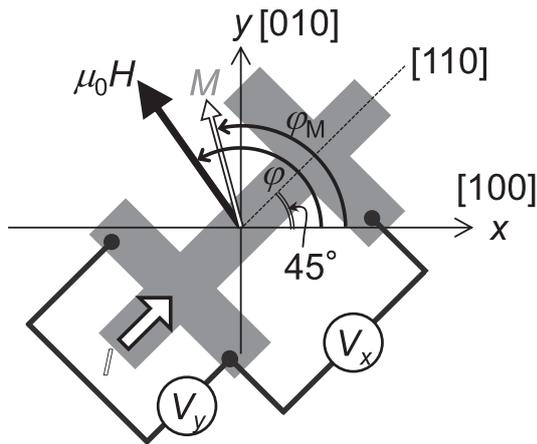


図7 CoFe/LAO/STOデバイスにおける磁気輸送特性、及び電流誘起有効磁場の測定系の模式図。面方位はSrTiO₃基板の面方位を表す。

ルクを観測しているため、良好なCoFe/LaAlO₃界面を形成できていると考えられる。CoFeを成膜していないLAO(1.2)/STOは先行研究と同様に絶縁的であ

り、設計通りのLAOを成膜できていると考えられる。しかし、作製した積層構造におけるLAO/STO界面の2次元電子の有無については、本研究の電気測定から判断できなかった。これについては、今後の詳細な研究が必要である。

続いて、電流誘起有効磁場を調べるため、作製したヘテロ構造をフォトリソグラフィーとArイオンミリングを用いて、2対のホールプローブを備えたチャンネル幅5 μmのホールバー形状デバイスに加工した(図7参照)。

3.2 CoFe/LAO/STOにおける磁気輸送特性

CoFe/LAO/STOの磁気輸送特性を図7に示す測定系を用いて調べた。SrTiO₃基板の[110]方向に外部磁場 $\mu_0 H = 0.05$ Tを印加して磁化方向をそろえた後、面内磁場を時計回りまたは反時計回りに回転させなが

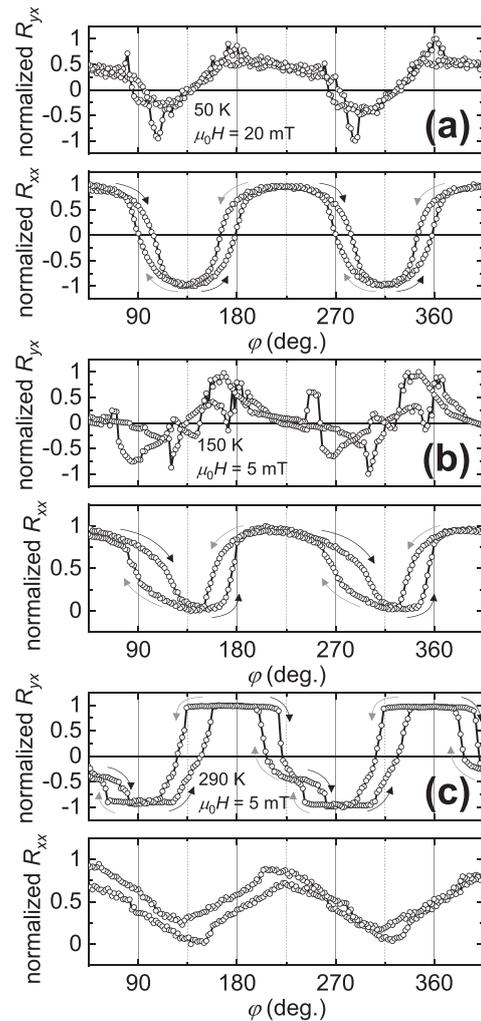


図8 (a), (b), (c) それぞれ50 K, 150 K, 290 KにおけるCoFe/LAO/STOの横抵抗 R_{xx} と縦抵抗 R_{yx} の面内磁場角度 ϕ 依存性。

らチャンネルに1.5 mAの電流を印加して R_{yx} と R_{xx} を測定した. 図8(a), (b), (c)にそれぞれ, 50 K, 150 K, 290 Kにおける R_{yx} と R_{xx} の ϕ 依存性を示す. 290 Kにおいて, R_{yx} は45, 135, 225, 315度の周囲でヒステリシスを示したが, R_{xx} は明確なヒステリシスを示さなかった. また, 180, 360度で R_{yx} は, ほぼ一定の値をとったことから, 180, 360度付近に磁化容易軸をもつと考えられる. 一方, 50 K, 150 Kにおいて, R_{yx} は明確なヒステリシスを示さなかったが, R_{xx} は110, 160, 290, 340度の周囲でヒステリシスを示した. また, R_{xx} は, 45, 135, 225, 215度付近で極大値, または極小値をとったことから, 45, 135, 225, 215度付近に磁化容易軸をもつと考えられる. 以上のことから, CoFe/LAO/STOにおいては, 温度によって磁化容易軸方向が変化すると考えられる.

3.3 CoFe/LAO/STOにおける電流誘起有効磁場

LSMO/LAO/STOにおける電流誘起有効磁場の評価方法と同様の方法で, CoFe/LAO/STOにおいて面内電流によって誘起される有効磁場を求めた. 200 K以下において, 外部磁場でCoFeの磁化方向を磁化容易軸の一つであるSTO基板の[110]方向に揃えた後, [110]

方向の外部磁場 $\mu_0 H$ を掃引して[110]から $\bar{[110]}$ へ磁化方向がスイッチングする際の R_{xx} の変化を測定した. 290 Kにおいては, 外部磁場でCoFeの磁化方向を磁化容易軸の一つである[100]方向に揃えた後, $\bar{[110]}$ 方向の外部磁場 $\mu_0 H$ を掃引し, [100]から[001]に磁化方向がスイッチングする際の R_{xx} の変化を測定した. 図9(a) (b)にそれぞれ150 K, 290 Kにおける規格化 R_{xx} , または規格化 R_{yx} の $\bar{[110]}$ 方向磁場 $\mu_0 H$ 依存性を示す. 規格化 R_{xx} , 規格化 R_{yx} がそれぞれ0.5, 0を横切る磁場を H_{sw} とすると, 150 K, 290 Kで, ともに負電流を印加した場合の H_{sw} の方が正電流を印加した場合よりも大きくなった. このことから, $\bar{[110]}$ すなわち電流と直交する方向で膜面内方向の有効磁場が誘起されたと考えられる.

LSMO/LAO/STOと同様に, $\mu_0 H_{diff}$ の電流依存性を調べた. 図10(a)に150 Kにおける $\mu_0 H_{diff}$ の電流依存性を示す. $\mu_0 H_{diff}$ は電流に対してほぼ線形に変化したことから, 電流によって H_{diff} が誘起されたと考えられる. CoFeに流れる電流密度当たりの H_{diff} の発生効率を求めると, 150 Kにおいて $1.4 \times 10^{-15} \text{ Tm}^2 \text{ A}^{-1}$ となった. この大きさは, LAO/STO界面に2次元電子が形成

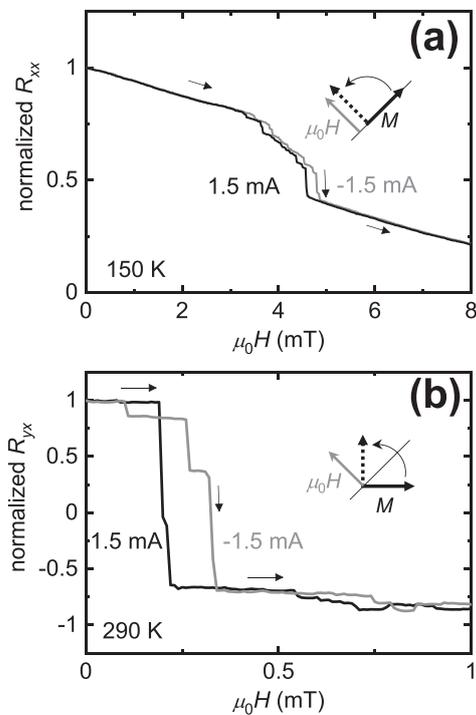


図9 (a) (b) それぞれ150 K, 290 Kにおいて, CoFe/LAO/STOに ± 1.5 mAを印加したときの規格化 R_{xx} , 規格化 R_{yx} の $\bar{[110]}$ 方向磁場依存性.

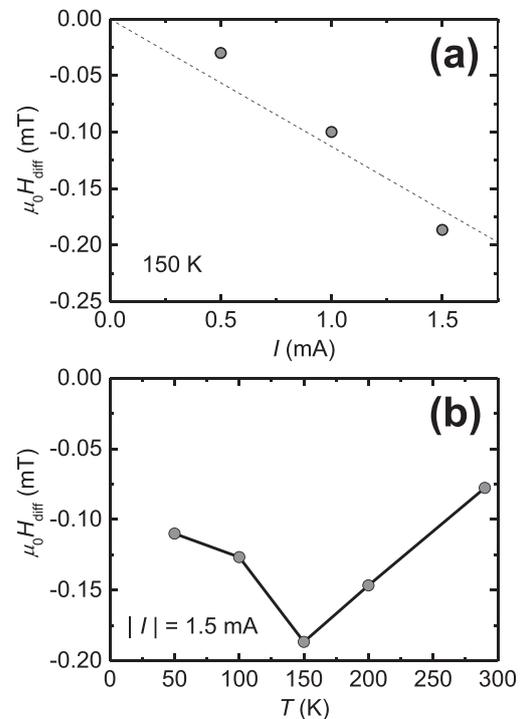


図10 (a) CoFe/LAO/STOにおける150 Kの $\mu_0 H_{diff}$ の電流依存性. (b) CoFe/LAO/STOにおける $|I| = 1.5$ mA印加時の $\mu_0 H_{diff}$ の温度依存性.

されていない LSMO/LAO/STO における H_{eff} と同程度である。また、 H_{eff} の方向については、CoFe/LAO/STO と LSMO/LAO/STO における H_{diff} の評価方法の違いを考慮すると、印加電流の方向に対する H_{eff} の方向は、CoFe/LAO/STO の場合と 2 次元電子が形成されていない LSMO/LAO/STO の場合では同方向であり、界面起因のスピントラックによる有効磁場の方向と矛盾しない CoFe/LAO/STO は LSMO/LAO /STO と同様に膜厚方向に非対称な層構造であるため、観測された H_{eff} は界面のスピントラック相互作用に関係している可能性がある。CoFe/LAO/STO において観測された H_{eff} の機構についての手がかりを得るため $\mu_0 H_{\text{diff}}$ の温度依存性を調べた(図 10(b)参照)。 $\mu_0 H_{\text{diff}}$ すなわち H_{eff} の大きさは、温度上昇とともに増加し、150 K 付近で最大となった。そして、さらに温度を上昇させると H_{eff} は減少した。この H_{eff} の温度依存性は LSMO/LAO/STO、及び LSMO/STO と異なっているため、CoFe/LAO/STO では LSMO/LAO/STO で観測された H_{eff} の起源が異なることや構造の非対称性以外の機構で生じている H_{eff} が影響していることが考えられる。特に、CoFe/LAO/STO においては、 H_{eff} と LAO/STO 界面に形成されている 2 次元電子との関係が明らかでないことや、200 K 以上においてスピントラック相互作用に起因した磁気異方性が増加したことから、それらが H_{eff} に影響している可能性がある。LSMO/LAO/STO においては、LAO/STO 界面の 2 次元電子の形成によって H_{eff} が増加したことから、LSMO/LAO/STO、及び CoFe/LAO/STO における H_{eff} の発生機構を明らかにすることにより、さらなる H_{eff} の増大が期待される。

4. まとめ

高性能なスピントラックデバイスの実現をめざして、界面に強いスピントラック相互作用を示す 2 次元電子が形成される LAO/STO と、LSMO 及び CoFe との積層構造を作製し、膜面内方向の電流印加により誘起される有効磁場を調べた。どちらの構造においても膜面内方向の電流によって電流方向と直交する面内方向の有効磁場が誘起され、LSMO と CoFe の場合で有効磁場の方向が逆方向になった。これらの有効磁場の方向は界面起因のスピントラックによる有効磁場の方向と矛盾しない。LSMO の場合には、LAO/STO 界面の 2 次元電子の形成によって有効磁場

が増加したことから、これらの積層構造における有効磁場の発生機構を明らかにすることにより、さらなる有効磁場の増大が期待される。

発表論文

- [1] M. Yamanouchi, T. Oyamada, H. Ohta, "Current-induced effective magnetic field in $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3/\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ structures," *AIP Adv.* **10**, 015129 (2020).

参考文献

- (1) L. Liu, C. Pai, Y. Li, H. M. Tseng, D. C. Ralph, and R. A. Buhrman, *Science* **336**, 555.
- (2) A. Ohtomo and H. Y. Hwang, *Nature* **427**, 423 (2004).
- (3) E. Lesne, Y. Fu, S. Oyarzun, J. C. Rojas-Sánchez, D. C. Vaz, H. Naganuma, G. Sicoli, J.-P. Attané, M. Jamet, E. Jacquet, J.-M. George, A. Barthélémy, H. Jaffrès, A. Fert, M. Bibes, and L. Vila, *Nature Mater.* **15**, 1261 (2016).
- (4) Y. Wang, R. Ramaswamy, M. Motapohtula, K. Narayanapillai, D. Zhu, J. Yu, T. Venkatesan, H. Yang, *Nano Lett.* **17**, 7659 (2017).
- (5) M. Yamanouchi, T. Oyamada, H. Ohta, *AIP Adv.* **9**, 035129 (2019).
- (6) W. M. Lü, S. Saha, X. R. Wang, Z. Q. Liu, K. Gopinadhan, A. Annadi, S. W. Zeng, Z. Huang, B. C. Bao, C. X. Cong, M. Venkatesan, T. Yu, J. M. D. Coey, A. Venkatesan, and T. Venkatesan, *Nature, Commun.* **7**, 11015 (2016).
- (7) E. Lesne, N. Reyren, D. Doennig, R. Mattana, H. Jaffrès, V. Cros, F. Petroff, F. Choueikani, P. Ohresser, R. Pentcheva, A. Barthélemy, and M. Bibes, *Nature Commun.* **5**, 4291 (2014).