

令和 3 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15433

研究課題名（和文）無界面スピントランジスタ実現に向けた導電性酸化物のスピン物性研究

研究課題名（英文）Study on spin properties in conductive oxides to realize an interface-less spin transistor

研究代表者

大島 諒 (Ohshima, Ryo)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：10825011

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：チタン酸ストロンチウム（STO）表面を用いたスピントランジスタの実現について研究した。STO表面に強磁性電極を作成することで、STO表面の磁化方向を制御が可能とした。また、強い電界が印加可能であるイオンゲートを用いることで、超薄膜白金中のスピントロニクス効果のゲート電圧変調を示唆する結果が得られた。得られた結果は、STO表面を用いた無接合界面スピントランジスタ構造の実現につながる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピントロニクスでは、電子の電荷情報とスピン情報を共に制御することにより、論理演算素子の高機能化・省電力化を目指す。提案されるデバイスの一つであるスピントランジスタについて、チャネルの候補材料であるチタン酸ストロンチウムを研究した。その結果、チタン酸ストロンチウム表面の磁化方向の制御・ゲート電圧制御についての知見が得られた。本成果により、従来スピントランジスタにおけるデバイス性能向上のボトルネックとなっていた異種材料の接合界面の存在を回避した、新たなスピントランジスタ構造の実現が期待できる。

研究成果の概要（英文）：This study aims to realize a spin transistor with a surface of strontium titanate (STO). Forming ferromagnetic electrodes on the STO surface enables us to control the magnetization direction of the STO surface. By using ionic gating, which applies a high electric field, we obtained results indicating modulation of the spin Hall effect in nanometer-thick platinum by ionic gating. These results lead to the realization of the interface-less spin transistor with the STO surface.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

(1) スピントロニクスは、電子の電荷情報とスピン情報を共に制御することにより、論理演算素子の高機能化・省電力化を目指す。スピントロニクスにおいて提案されるデバイスの一つであるスピントランジスタは、電界効果トランジスタのソース・ドレイン電極を強磁性体に置換した構造を有す。強磁性電極によるスピン情報の輸送・検出が可能かつ磁性体メモリの利用が可能となることから、トランジスタの機能に加え不揮発性メモリ・多値演算などの応用が期待されている。一般的にチャンネルにはスピン情報の散逸の小さい軽元素で構成された非磁性材料が好適であるため、従来のスピントランジスタは強磁性体/非磁性体チャンネルの接合界面が不可欠となるが、界面はスピン情報の散乱要因となるため、デバイス性能向上におけるボトルネックとなっていた。[1]

(2) 酸化物半導体である SrTiO_3 (STO) は、不純物のドーピングや LaAlO_3 (LAO) とのヘテロ構造によりその表面が電気伝導性と強磁性を獲得する。表面伝導層は、キャリア密度により磁性が変化することが報告されている。[2, 3] また、申請者は上記のヘテロ構造において、室温でも 100 nm を超える長さのスピン情報の伝送を達成した。[4] 単一材料において長距離スピン伝送とスピン流(電流のスピン版)の高効率生成機能を有する材料はこれまで未発見であり、これを用いることで新たなスピントランジスタ構造が提案可能であると考えた。

2. 研究の目的

本研究は、STO をチャンネルに用いることによる、異種材料の接合界面が無い無界面スピントランジスタの実現を目的とする。先行研究[2]は不純物のドーピング濃度、つまり STO 中のキャリア密度の変化による磁性の変化の報告であるが、ゲート電圧の印加も同様に広い範囲でのキャリア密度の制御が可能である。例えば、イオンゲルを用いたゲート変調技術では、シートキャリア密度 $n_{2D} \sim 4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ものキャリア誘起が可能[5]であり、これは先行研究[2]の変調範囲を網羅する。よって、ゲート電極を STO チャンネル上に作製すれば、STO チャンネル中に強磁性の領域を形成することができる。ゲート電極を複数作製することで STO チャンネル内に強磁性/非磁性/強磁性のスピントランジスタ構造が実現可能であり、これは正に異種材料接合界面の無いスピントランジスタである。スピン散乱要因であった接合界面を排除することで、現状課題を克服したスピントランジスタが実現する。

3. 研究の方法

本研究の実現に向けた個別のマイルストーンとして、(1) ゲート電圧制御による強磁性 STO の実現と物性理解、(2) 強磁性 STO の磁気異方性制御がある。

(1) ゲート電圧制御による強磁性 STO の実現と物性理解

イオンゲルを用いたゲート電圧印加技術を利用し、チャンネルへの巨大電界印加によるキャリア誘起を行う。先行研究[2]での磁性のキャリア密度依存性測定と同様に、電界誘起のキャリア蓄積による磁性変調を観測する。具体的には、磁場方向と電流方向の相対角度による抵抗の変化である異方性磁気抵抗効果や、磁化の大きさに依存して誘起されるホール起電力である異常ホール効果の観測を行う。

(2) 強磁性 STO の磁気異方性制御

スピントランジスタ実現には、強磁性電極が互いに逆向き(反平行)な状態を作ることが必要である。直方体の強磁性体で磁化は長手方向に向きやすいという性質(形状磁気異方性)を用いることで、二本の強磁性電極で磁化の反転磁界がそれぞれ異なり、反平行状態ができる。本研究では、STO 上に作成した形状磁気異方性の異なる二本の強磁性金属を用いた近接効果と、ゲート電圧印加領域の形状を変えることにより STO 中の磁化制御を試みる。

4. 研究成果

(1) イオンゲートによる巨大キャリア変調および金属超薄膜でのスピン流物性の変調

イオンゲルを用いた巨大ゲート電圧印加について、微細加工後のチャンネルに印加する技術を習得した。STO チャンネルへの予備実験として、既にイオンゲートによるキャリア密度変調が確認できている白金超薄膜を用いた抵抗率変調およびスピン流物性変調を試みた。その結果、チャンネル加工後の白金超薄膜における抵抗率の変調および電流からスピン流への変換現象(スピンホール効果)の変調の観測に成功した。この結果は、先行研究[5]の逆効果の実証、ならびにナノスピントロニクスデバイスのゲート電圧変調を示唆する結果であり、現在論文投稿準備中である。

(2) 強磁性 STO の磁気異方性制御

強磁性体である $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (Py) を用いた磁化方向制御を行った。二本の幅の異なる Py 電極を酸化物ヘテロ構造である $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ (LAO/STO) 上に作成 (図 1) し、外部磁場を掃引した際の磁気抵抗を測定した。結果、強磁性電極の異なる反転磁場に対応した異方性磁気抵抗効果が観測できた。図 2 に異方性磁気抵抗効果のゲート電圧の依存性を示す。異方性磁気抵抗効果はゲート電圧印加により単調増加する振る舞いを示した。電流の伝導パスは STO 表面ならびに強磁性電極となるが、Py 中の AMR であれば、観測された異方性磁気抵抗効果のゲート電圧依存性が説明できない。そこで有限要素法を用いた解析より電流分布を計算した結果、電流の大部分は STO 表面を伝導し、磁気抵抗の起源が STO 表面であることが分かった。磁気抵抗の大きさは Py の 100 分の 1 程度であったが、これは先行研究で報告されている STO 表面に誘起される強磁性層の磁気モーメントも Fe の 100 分の 1 程度である [6] ことから妥当な結果と言える。よって、Py 電極を用いることで LAO/STO 中の磁化を誘起し、その磁化方向を制御できることが分かった。

(3) 上記 2 項目より STO 表面を用いたスピントランジスタの実現について研究した。STO 表面に強磁性電極を作成することで、STO 表面の磁化方向を制御が可能とした。また、強い電界が印加可能であるイオンゲートを用いることで、超薄膜白金中のスピンホール効果のゲート電圧変調を示唆する結果が得られた。得られた結果は、STO 表面を用いた無接合界面スピントランジスタ構造の実現につながる。

< 引用文献 >

[1] T. Tahara *et al.*, Phys. Rev. B **93**, 214406 (2016). [2] Z. Q. Liu *et al.*, Phys. Rev. B **87**, 220405(R) (2013). [3] Ariando *et al.*, Nat. Commun. **2**, 188 (2011). [4] R. Ohshima *et al.*, Nat. Mater. **16**, 609 (2017). [5] S. Dushenko *et al.*, Nat. Commun. **9**, 3118 (2018). [6] R. Arras *et al.*, Phys. Rev. B **85**, 125404 (2012).

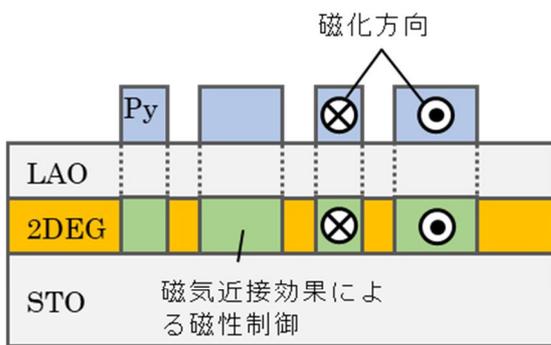


図1: デバイスの側面図。幅を異なるPy電極により磁化方向の平行・反平行状態が実現する。近接効果によりPyと2DEGが結合し、磁化方向が引き継がれる。

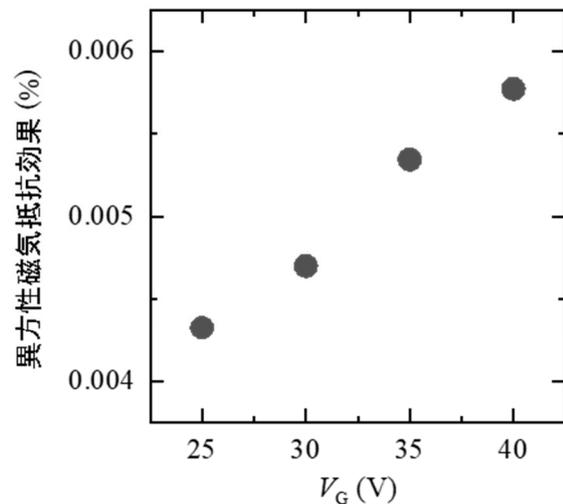


図2: 異方性磁気抵抗効果のゲート電圧依存性。ゲート電圧印加に伴い、異方性磁気抵抗効果は増加した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 R. Ohshima, Y. Kohsaka, Y. Ando, T. Shinjo, and M. Shiraishi
2. 発表標題 Ionic-gate tuning of spin-torque ferromagnetic resonance in nanometer-thick platinum
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------