

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3年 3月 31日現在

機関番号：11301

研究種目：特別推進研究

研究期間：2015～2020

課題番号：15H05699

研究課題名（和文） スピン軌道エンジニアリング

研究課題名（英文） Spin-orbit Engineering

研究代表者

新田 淳作 (NITTA, Junsaku)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：00393778

交付決定額（研究期間全体）（直接経費）：445,800,000円

研究成果の概要（和文）：

電場制御可能な Rashba スピン軌道相互作用を用いてスピン生成・制御・検出機能を一つの半導体ナノトランジスタに統合した。このスピン軌道相互作用に加えて Dresselhaus スピン軌道相互作用を導入することにより永久スピン旋回状態を実現するとともに、スピンドリフト輸送により長距離輸送を達成した。以上より、電場によるスピン機能の統合、回転操作、長距離輸送技術を確立した。エピタキシャル成長した金属薄膜は、多結晶薄膜と異なるスピン伝導・緩和機構に支配されることを発見した。またエピタキシャル金属/磁性体構造では界面スピン軌道相互作用が増大することを見出し、室温でゼロ磁場磁化反転デバイスを実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで「スピン」は主に磁場により制御されてきたため、空間的（局所的）、時間的高速な操作ができず省電力も困難である。このため「スピン」を新たな情報担体とするには電場によるスピン操作が不可欠である。本特別推進研究により、スピン緩和の問題点を解決するとともに電場によるスピン生成・制御・検出機能の統合、スピンの長寿命化、回転操作、および長距離輸送技術を確立し電子スピンをを用いた量子情報やスピントロニクス分野発展に大きく貢献する。またスピン軌道相互作用の概念は様々な学問領域、材料の枠を越えて普遍的な効果として認識されつつあるため、ここで得られた研究成果の学術的な意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：

We have realized a novel spin device that integrates spin generation, control, and detection functions into a single semiconductor nano-transistor. The problem of spin relaxation has been solved by introducing Dresselhaus spin-orbit interaction (SOI) in addition to Rashba SOI, and we have realized persistent spin helix state with long-distance spin transport. Furthermore, more than 10 times longer spin propagation distance is achieved by spin-drift transport. From the above, we have established the integration of spin functions, the extension of spin life, rotation control, and long-distance spin transport technology. It has been discovered that a spin relaxation mechanism in epitaxially grown metal thin films is different from that of polycrystalline thin films. We have also found that the interfacial Rashba SOI is enhanced in the epitaxial metal/magnetic structures, and realized a magnetic-field-free magnetization reversal device at room temperature.

研究分野：理工系（工学）

キーワード：スピントロニクス、スピン軌道相互作用、スピン電場操作、スピン生成・制御・検出機能、永久スピン旋回状態、スピン軌道トルク

## 1. 研究開始当初の背景

スピン軌道相互作用は電場中を電子スピンの運動することにより、電場が磁場に変換される相対論的効果でありかつ普遍的な現象である。固体物理の分野ではトポジカル絶縁体やマヨラナフェルミオン、磁気スカーミオンなどの新奇な準粒子形成にもスピン軌道相互作用が重要であることが認識されている。スピントロニクス分野でもスピン軌道相互作用は電気的なスピン生成・制御・検出を可能にすることから極めて重要な役割をはたし、「スピンオービトロニクス」と呼ばれる分野が形成されつつある。エレクトロニクスにおいては表舞台になかったスピン軌道相互作用がスピントロニクスでは主役の座になろうとしている。スピン軌道相互作用を用いたスピントロニクスと新奇物性開拓の研究は世界中で活発に研究が行われている状況となっている。

## 2. 研究の目的

半導体、金属、磁性体、絶縁体またはこれら異種材料ヘテロ構造界面のスピン軌道相互作用に起因したスピン機能の開拓と電場操作スピントロニクス分野を開拓することにある。具体的には下記の3点を中心に研究を進める。

- (1) 電気的スピン生成・制御・検出機能統合による全電場操作スピンデバイスの確立
- (2) 異種材料ヘテロ構造における巨大 Rashba 効果のスピン伝導と電場操作開拓
- (3) スピン軌道相互作用の空間・時間変調による新規スピン機能の開拓

## 3. 研究の方法

半導体中のスピン軌道相互作用の研究で培ってきた経験を活かし、電気的に制御可能な Rashba 効果や Dresselhaus 効果を顕在化させるため、半導体だけでなく金属、磁性体、トポジカル絶縁体及びそのヘテロ構造に展開する。スピン伝導測定とスピン光学測定を組み合わせた新規光学測定系のセットアップに着手しスピン生成とスピン長距離輸送と検出に適した測定系を構成する。スピン機能化に関してそれぞれ伝導測定と光学測定から相補的な研究を進める。

## 4. 研究成果

### (1) 電気的スピン生成・制御・検出機能統合による全電場操作スピンデバイスの確立

#### ① 半導体量子ポイントコンタクトトランジスタを用いたスピン生成・制御・検出機能統合

スピン軌道相互作用は電子スピンの運動に対して有効磁場を生み出す。この有効磁場を実空間および波数空間において空間制御することでスピン依存力など半導体のみを用いたスピン機能創製を実現することが可能になる。既に研究代表者らは 2012 年に有効磁場の空間制御を用いたシュテルン-ゲルラッハタイプのスピンフィルタを実現しており、それを軸として、スピン生成・スピン検出さらに電子の軌道運動をナノ空間で精密制御することでスピン制御することを可能にし、この全ての機能を一つのナノトランジスタに統合したスピン機能デバイスを実現した[1]。

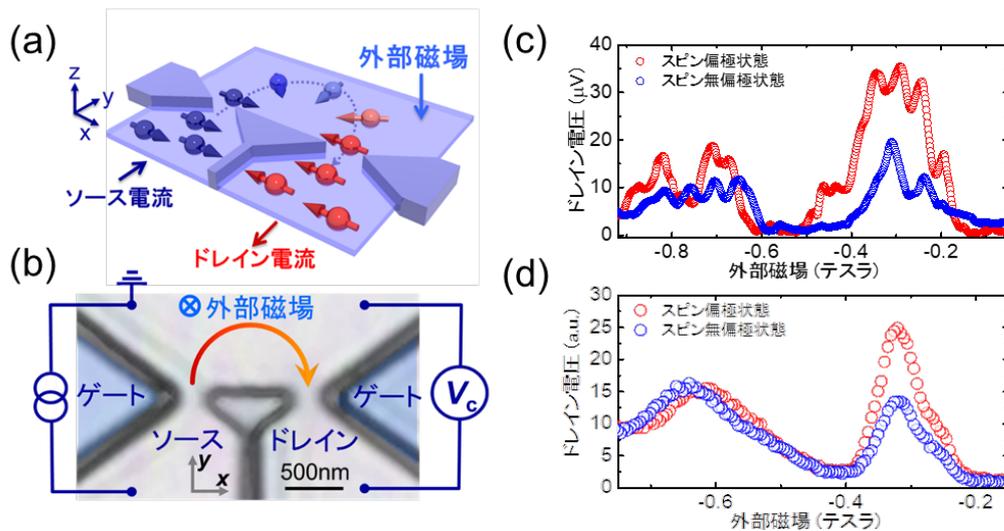


図 1. (a) スピン生成・制御・検出を統合した半導体量子ポイントコンタクトトランジスタの概念図 (b) InGaAs/InAlAs 量子井戸を用いて微細加工により作製したデバイスの顕微鏡写真と測定方法 (c) ドレイン電圧の外部磁場依存性。スピン偏極した電流(赤丸)と無偏極電流(青丸)では、-0.3 テスラ付近のピーク電圧が異なる (d) スピン軌道ロッキングを取り入れてモンテカルロシミュレーションを行ったドレイン電圧の外部磁場依存性

## ② 電場操作による永久スピン旋回状態とスピン回転長距離伝導の実現

非磁性体中において電子スピンを情報単位として用いるためには、電子スピンの緩和抑制、回転制御、および長距離輸送技術の確立が必須である。さらにこれらのスピン操作技術は、スピンドバイス中に組み込まれるという観点から、電気的手法によって達成されなくてはならない。我々は GaAs/AlGaAs ヘテロ構造量子井戸中の二次元電子ガスを対象として、時間・空間分解能に優れた光学的計測手法を構築することで、電場による電子スピンの長寿命化、回転制御、および長距離輸送技術の確立を実現した[2], [3]。以上の成果に加えて、ゲート電場によるスピンの回転制御や面内 AC 電場を用いた電子スピンの輸送経路制御など実証しており、半導体をベースとしたスピンドバイスの実現に必要なスピン電場操作技術を確立することに成功した。

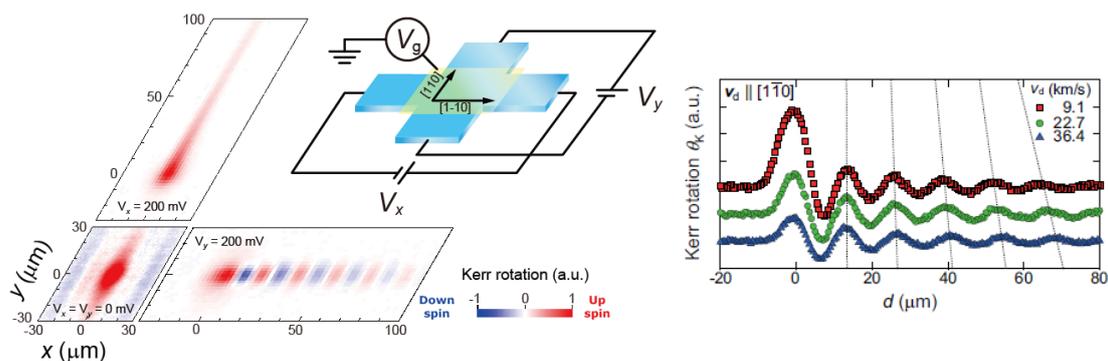


図2 電子スピンマッピングのための十字型デバイス構造と実際に観測された永久スピン旋回状態におけるドリフトスピンの空間分布 (右図)。さらに面内電場によりドリフト速度を一定以上に増すと電子分布の変化により Dresselhaus スピン軌道相互作用が変調されスピン回転周期の制御も可能となる (左図)。

## (2) 異種材料ヘテロ構造における巨大 Rashba 効果のスピン伝導と電場操作開拓

### ① エピタキシャル金属/磁性体界面のスピン軌道相互作用増大

スピン軌道相互作用の強い金属薄膜のエピタキシャル成長を行いそのスピン緩和機構を調べた。スピン伝導特性は、弱反局在解析によって行なった結果、これまでの金属薄膜とは異なりエピタキシャル Pt, Ta 薄膜ではともに Dyakonov-Perel スピン緩和機構が優勢となることを発見した[4]。これは表面もしくは界面 Rashba 効果によりスピン分離が生じスピン歳差運動が起こっていることを示している。また、エピタキシャル  $\alpha$ -Ta/CoFeB ではスピン軌道トルクが増大することを見いだした[5]。サファイヤ基板上にエピタキシャル成長した Pt/Co 構造を用いることにより、これまで困難であったバルクのスピンホール効果と界面 Rashba 効果を分離することに成功した[6]。MgO(110)基板上に作製した Pt/Co 構造ではスピン軌道トルクに異方性が生じることを確認した[7]。

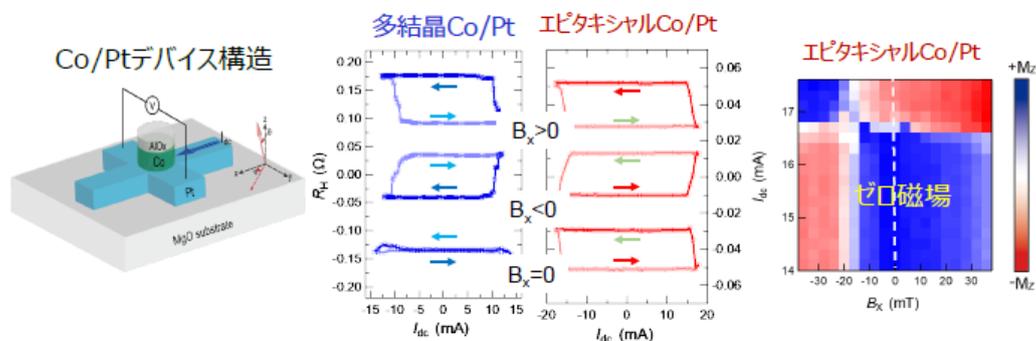


図3. 面直磁化を持つ Co/Pt 構造のスピン軌道磁化反転素子。多結晶 Co/Pt 素子では面内磁場のアシストが必要であるがエピタキシャル成長により、面直磁化をもつ Co のゼロ磁場磁化反転が可能となる。

さらに MgO(111)基板上にエピタキシャル成長した Pt/Co (面直磁化) においては、反強磁性

体による交換バイアスや外部磁場を印加する事なく Pt に流れる電流の作るスピントルクのみで、磁化反転が生じることを見だし、室温でのゼロ磁場磁化反転デバイスを実現した(図 3)。これらの成果はスピントルクを用いた不揮発性磁気メモリーデバイスに重要な知見を提供する。

## ② トポジカルディラック半金属材料の創製とスピントルク相互作用の増大効果

トポジカル物質群は電子スピン状態が保護されておりスピントルク効果など優れたスピン機能が期待される。半金属ペロブスカイト型酸化物 BaPbO<sub>3</sub> と半導体的な電子構造を有する BaSnO<sub>3</sub> (バンドギャップ 3.2 eV) との高品質エピタキシャル薄膜の合成とスピン伝導特性を調べた。その結果、ゼロギャップを示す組成 BaSn<sub>0.1</sub>Pb<sub>0.9</sub>O<sub>3</sub> ではトポジカルディラック半金属状態が実現していることを確認するとともに、このバンド反転を伴う特異な電子状態がスピントルク相互作用の増大に寄与していることを見出しゲート電場により制御することにも成功した[8]。

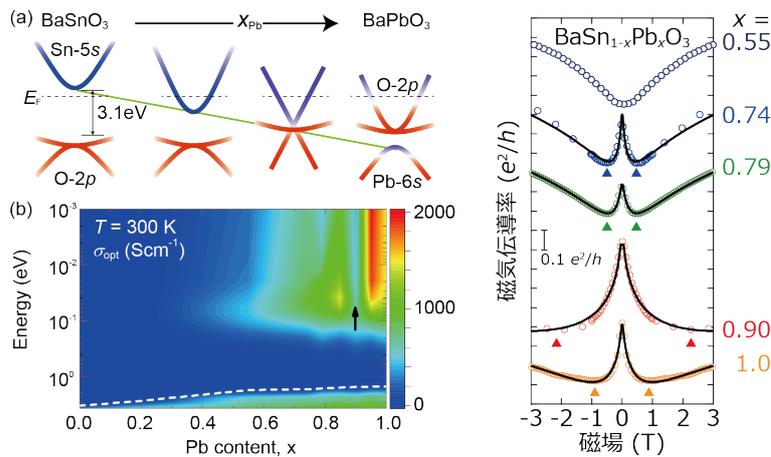


図 4 左: (a) BaSn<sub>1-x</sub>Pb<sub>x</sub>O<sub>3</sub> 薄膜の期待される電子構造。(b) 光学伝導度スペクトルの Pb 組成 x 依存性。

図 4 右: Pb 組成増加によるバンド反転近傍で観測されたスピントルク相互作用の増大効果。

## (3) スピントルク相互作用の空間・時間変調による新規スピン機能の開拓

### ① ポテンシャルの空間変調を用いた新奇スピン輸送法の確立

GaAs/AlGaAs 量子井戸構造において、光励起により任意の空間に電子を閉じ込めるお椀型のポテンシャルを形成することにより、スピン偏極状態を長時間保持できる新たな原理を生み出した。空間的に電子を閉じ込めることで、スピントルク相互作用に起因するスピン緩和を抑制することができる。この様な次元性を利用したスピン状態の長時間保持は、これまで微細加工により形成された量子ドットが用いられてきた。我々は、光励起のみで量子ドットと同様の電子を閉じ込めるポテンシャルを形成し、12nsec を超える極めて長いスピン緩和時間を生み出すことに成功した[9]。本手法により、任意の空間にスピン状態の長時間保持が可能となるだけでなく、光照射により任意の長距離スピン空間輸送チャンネル形成も可能となる。

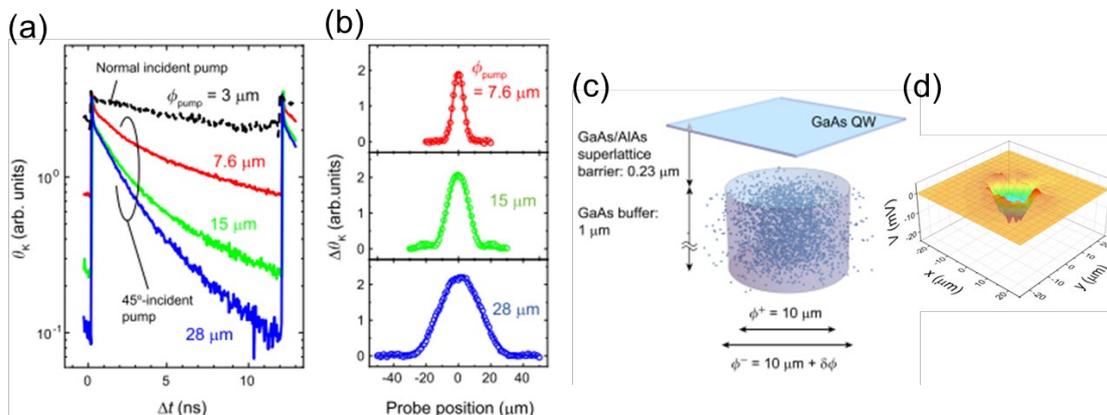


図 5. GaAs/AlGaAs 量子井戸における長時間スピン寿命 (a)異なるレーザースポットサイズにおける TRKR 信号の時間変化 (b)異なる励起レーザースポットサイズ (c)AlGaAs バリア層でトラップされる電子 (d)トラップ電子が形成するポテンシャル構造

### ② スピン軌道相互作用の時間変化を用いたスピン幾何学位相のトポロジカル転移

スピン軌道相互作用はスピンに依存したベクトルポテンシャルとして作用するためスピンの位相を変調する。我々は、スピン干渉デバイスを提案することによりスピン歳差運動に伴うスピン動的位相がゲート電場(スピン軌道相互作用)により、スピン幾何学位相が主に面内磁場(ゼーマン効果)により制御可能であることを理論と実験により検証してきた。スピン幾何学位相はスピン歳差運動の速さとスピン軌道相互作用の作る有効磁場方向の時間変化(非断熱性)に依存する。このため正方形干渉チャンネルの頂点部分では電子の運動量方向が急速に変化するためスピンの感じる有効磁場は面内からずれ面直方向に傾くことになる。スピン干渉のトポロジカル数はブロッホ球上の北極点周りでのスピンの回転数で決まるため面内磁場によりトポロジカル数を「1」から「0」に容易に操作できる。このため正方形スピン干渉デバイスではスピン干渉が不連続で格子模様のパターンとなる。そこで、半導体 InGaAs/InAlAs 系ヘテロ構造を用いた正方形スピン干渉デバイスを作製し、不連続格子パターンに対応したスピン干渉効果の反転を観測し、スピンのトポロジカル転移を操作することに成功した[10]。

(a) リング型スピン干渉デバイス (理論) (b) 正方形スピン干渉デバイス (理論) (c) 正方形スピン干渉デバイスの実験

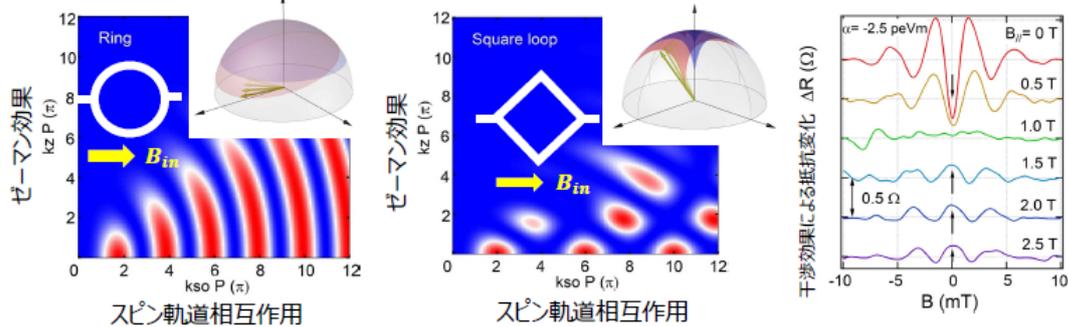


図 6. (a) リング型スピン干渉デバイスで期待されるスピン干渉模様。ゼーマン効果によりスピン幾何学位相が連続的に変化。(b) 正方形デバイスでは、格子模様の不連続な干渉模様が現れる。(c) 正方形デバイスを用いた実験結果。スピン干渉効果の反転を観測し、スピン幾何学位相のトポロジカル転移に対応 (矢印)。

### ③ 非局所 Rashba 効果によるスピン軌道トルクとその符号反転

従来、金属/磁性体界面の Rashba 効果と金属バルクのスピンホール効果に起因するスピン軌道トルク磁場が調べられてきた。我々は磁性体から離れた非局所的な界面に生じる Rashba 効果もスピン軌道トルク磁場として重要な役割をはたすとともに、トルク磁場の符号も反転できることを発見した[11]。

Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> 合金(Py)を用いた強磁性共鳴から、界面から生じるスピン軌道トルク磁場  $H_{DL}$  の検出を行った。図はバルク W, Pt 及び W/Pt 界面からの寄与を分離した結果であり、界面の効果にも関わらず、バルクと同等のトルク磁場が生成出来ている事が分かる。更に W/Pt 間に Cu を挿入すると、界面の寄与が消失するので、W/Pt 界面から生じたトルク磁場である事が分かる。この界面由来のトルク磁場は、Rashba 効果によるものと考えられるため、W と Pt の積層順を逆にし、Rashba スピン偏極方向を反転させると、生成されるトルク磁場の符号が反転する事も観測した。この結果は磁化反転に必要なスピン軌道トルクを生み出す新しい可能性を示したものであり、界面材料の組み合わせの最適化によりさらに大きなトルク生成が期待できる。

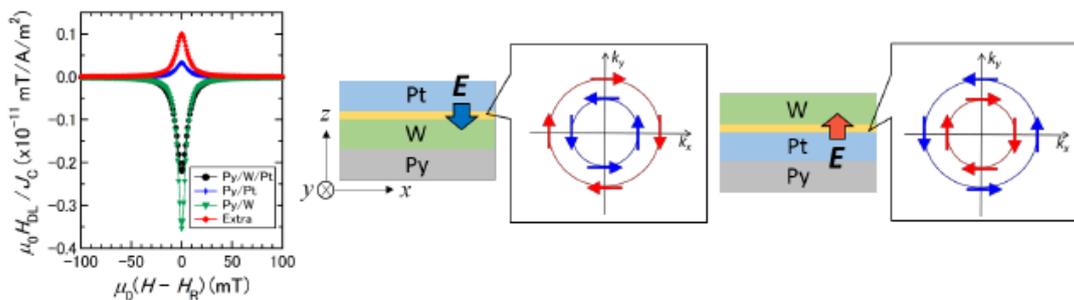


図 7. Py/W/Pt 構造における W, Pt, Extra(W/Pt 界面)のスピン軌道トルク磁場の比較。右図: 磁性体 Py から離れた W/Pt 及び Pt/W 界面で生じる Rashba 有効磁場ベクトル図。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 68 件)

- [1] M. Kohda, T. Okayasu, J. Nitta, “Spin-momentum locked spin manipulation in a two-dimensional Rashba system”, *Scientific Reports* **9**, 1909 - 1909 (2019) 査読有  
DOI:10.1038/s41598-018-37967-9
- [2] Y. Kunihashi, H. Sanada, H. Gotoh, K. Onomitsu, M. Kohda, J. Nitta, T. Sogawa, “Drift transport of helical spin coherence with tailored spin-orbit interactions”, *Nature Commun.* **7**, 1 - 6 (2016) 査読有  
DOI:10.1038/ncomms10722
- [3] Y. Kunihashi, H. Sanada, Y. Tanaka, H. Gotoh, K. Onomitsu, K. Nakagawara, M. Kohda, J. Nitta, T. Sogawa, “Drift-Induced Enhancement of Cubic Dresselhaus Spin-Orbit Interaction in a Two-Dimensional Electron Gas”, *Phys. Rev. Lett.* **119**, 187703-1 - 5 (2017) 査読有  
DOI:10.1103/PhysRevLett.119.187703
- [4] J. Ryu, M. Kohda, J. Nitta, “Observation of the D’yakonov-Perel’ Spin Relaxation in Single-Crystalline Pt Thin Films”, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 256802-1 - 6 (2016) 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.256802
- [5] H. Gamou, Y. Du, M. Kohda, J. Nitta, “Enhancement of spin current generation in epitaxial  $\alpha$ -Ta/CoFeB bilayer”, *Phys. Rev.* **B 99**, 184408-1 - 9 (2019) 査読有  
DOI:10.1103/physrevb.99.184408
- [6] Y. Du, H. Gamou, S. Takahashi, S. Karube, M. Kohda, J. Nitta, “Disentanglement of Spin-Orbit Torques in Pt / Co Bilayers with the Presence of Spin Hall Effect and Rashba-Edelstein Effect”, *Phys. Rev. Appl.* **13**, 054014-1 - 11 (2020) 査読有  
DOI:10.1103/physrevapplied.13.054014
- [7] R. Thompson, J. Ryu, Y. Du, S. Karube, M. Kohda, J. Nitta, “Current direction dependent spin Hall magnetoresistance in epitaxial Pt/Co bilayers on MgO(110)”, *Phys. Rev. B* **101**, 214415-1 -9 (2020) 査読有  
DOI: 10.1103/physrevb.101.214415
- [8] J. Shioyai, T. Chida, K. Hashimoto, K. Fujiwara, T. Sasaki, and A. Tsukazaki, “Signature of band inversion in the perovskite thin-film alloys  $\text{BaSn}_{1-x}\text{Pb}_x\text{O}_3$ ”, *Phys. Rev. B* **101**, 125125-1 -5 (2020) 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevB.101.125125
- [9] H. Sanada, A. M. Stramma, Y. Kunihashi, Y. Tanaka, H. Gotoh, K. Onomitsu, F. Tagarelli, M. Kohda, J. Nitta, T. Sogawa, “Spin accumulation in photo-induced potential dimples generated in semiconductors”, *Communications Physics* **3**, (2020) 査読有  
DOI:10.1038/s42005-020-0280-z
- [10] M. Wang, H. Saarikoski, A. A. Reynoso, J. P. Baltanás, D. Frustaglia, J. Nitta, “Geometry-assisted topological transitions in spin interferometry”, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 266804-1 - 6 (2019) 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.266804
- [11] S. Karube, N. Tezuka, M. Kohda, J. Nitta, “Anomalous Spin-Orbit Field via the Rashba-Edelstein Effect at the W/Pt Interface”, *Phys. Rev. Appl.* **13**, 024009-1 -8 (2020) 査読有  
DOI:10.1103/PhysRevApplied.13.024009

〔学会発表〕 (計 234 件)

- [1] J. Nitta, “Spin interference controlled by geometric effect”, (招待講演) 2020 Joint Conference of the Condensed Matter Divisions of European Physical Society

〔図書〕 (計 2 件)

- [1] Editors: Yongbing Xu, David Awschalom, Junsaku Nitta  
“Handbook of Spintronics”, Springer p1-p1609 (2015) ISBN: 978-94-007-6891-5

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 8 件)

名称：スピン材料およびスピン軌道トルク生成効率の制御方法

発明者：国橋、田中、眞田、後藤、寒川、軽部、菅原、好田、新田

権利者：日本電信電話（株）、東北大学

種類：特許出願

番号：特願 2019-141973

出願年：2019 年

国内外の別： 国内

○取得状況 (計 1 件)

名称：スピン軌道相互作用の制御方法  
発明者：国橋、眞田、後藤、寒川、好田、新田  
権利者：日本電信電話（株）、東北大学  
種類：特許登録  
番号：特許 6667827 号  
出願年：2016 年  
国内外の別：国内

〔その他〕

研究室ホームページ：<http://nitalab-material-tohoku.jp/>  
研究代表者の業績等：<https://researchmap.jp/read0121293>

## 6. 研究組織

(1)研究分担者氏名：好田 誠

ローマ字氏名：(KOHDA, Makoto)

所属研究機関名：東北大学

部局名：工学研究科

職名：准教授

研究者番号（8桁）：00420000

(2)研究分担者氏名：手束 展規

ローマ字氏名：(TEZUKA, Nobuki)

所属研究機関名：東北大学

部局名：工学研究科

職名：准教授

研究者番号（8桁）：40323076

(3)研究分担者氏名：塩貝 純一

ローマ字氏名：(SHIOGAI, Junichi)

所属研究機関名：東北大学

部局名：金属材料研究所

職名：助教

研究者番号（8桁）：30734066

(4)研究分担者氏名：眞田 治樹

ローマ字氏名：(SANADA, Haruki)

所属研究機関名：NTT 物性科学基礎研究所

部局名：量子光物性研究部

職名：特別研究員

研究者番号（8桁）：50417094

(5)研究分担者氏名：国橋 要司

ローマ字氏名：(KUNIHASHI, Yoji)

所属研究機関名：NTT 物性科学基礎研究所

部局名：量子光物性研究部

職名：研究主任

研究者番号（8桁）：40728193

(6)研究分担者氏名：後藤 秀樹

ローマ字氏名：(GOTOH, Hideki)

所属研究機関名：NTT 物性科学基礎研究所

部局名：その他

職名：所長

研究者番号（8桁）：10393795

(7)研究分担者氏名：寒川 哲臣（令和元年6月30日まで）

ローマ字氏名：(SOGAWA, Tetsuomi)

所属研究機関名：NTT 物性科学基礎研究所

部局名：その他

職名：所長

研究者番号（8桁）：70211993

(8)研究分担者氏名：田中 祐輔（令和元年7月1日より）

ローマ字氏名：(TANAKA, Yusuke)

所属研究機関名：NTT 物性科学基礎研究所

部局名：量子光物性研究部

職名：所員

研究者番号（8桁）：40787339