

科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料  
〔平成30年度研究進捗評価用〕

平成27年度採択分

平成30年5月31日現在

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

課題番号：15H05699

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



研究の概要：電氣的スピン生成・制御・検出機能の統合を半導体中のスピン軌道相互作用のみで実現した。永久スピンらせん状態とその逆状態の電場制御に成功するとともに、面内電場によりスピン高速・長距離輸送を達成した。エピタキシャル成長した金属薄膜は多結晶薄膜と全く異なるスピン伝導・緩和機構に支配されることを示すとともに、エピタキシャル金属/磁性体構造では界面 Rashba スピン軌道相互作用が増大することを見いだした。

研究分野：総合理工

キーワード：スピントロニクス

### 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普遍的な現象である。スピン軌道相互作用を用いることにより磁場を一切用いることなく電氣的にスピンを生成・制御・検出することが可能になってきた。異種材料のヘテロ界面や表面には強い電場とバンド構造の変調によりスピン軌道相互作用が増強・変調され優れたスピン機能と新奇物性が創製される可能性がある。

### 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の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) 電氣的スピン生成・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・時間変調によるスピン依存電磁場力と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、より巨大なスピン軌道相互作用が期待できる金属、磁性体、絶縁体及びそのヘテロ構造に展開を図る。半導体のバンドエンジニアリング的指導原理を、種々

ヘテロ構造への展開するため、エピタキシャル薄膜界面や超格子構造のスピン軌道相互作用に着目する。

### 4. これまでの成果

(1) スピン軌道相互作用の作る有効磁場の空間勾配 (Stern-Gerlach 効果) を利用した2つの半導体量子ポイントコンタクトを作製し、スピン軌道ロッキングによるスピン方向制御と組み合わせる事により、電氣的スピン生成・制御・検出機能の統合を実現した。また、面直・面内電場による高速スピンドリフト輸送に関する実験を行った。その結果 Rashba  $\alpha$  と Dresselhaus スピン軌道相互作用  $\beta$  がバランスする面直ゲート電場下では  $100\mu\text{m}$  以上の長距離をスピンが輸送可能なことを実験的に示した [1]。ドリフト輸送を高速化させた際に、電子分布の変化が Dresselhaus スピン軌道相互作用を変調出来ることを見

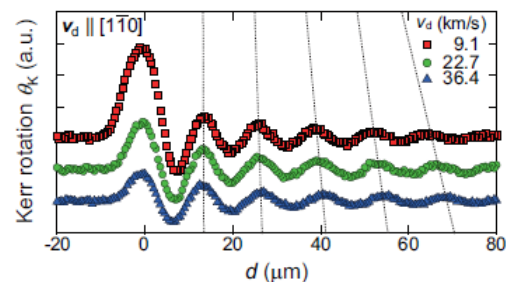


図1. 電子スピンの空間分布。面内電場によるドリフト速度変化にともない、スピン歳差運動周期が変調されることを見いだした。

いだした(図1)[2]。  
 また、量子井戸構造を最適化する事により永久スピンらせん状態( $\alpha=\beta$ )とその逆状態( $-\alpha=\beta$ )をゲート電圧により2状態間制御する事に成功した(図2)[3]。

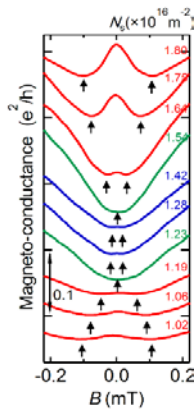


図2. 永久スピンらせん状態 ( $\alpha=\beta$ ) とその逆状態 ( $-\alpha=\beta$ ) の電場制御実現。スピン緩和が生じている場合は弱反局在効果(赤色の磁気コンダクタンス)を示すがスピン緩和が抑制されると弱局在に転移する(緑色)。中間状態も弱反局在(青色)となる。

(2) 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、エピタキシャル Pt, Ta とともに Dyakonov-Perel スピン緩和機構が優勢となることを発見した[4]。また、エピタキシャル金属/磁性体構造では界面の Rashba スピン軌道相互作用が増大することを見いだした。MgO(111) 基板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軌道トルクのみで、磁化反転が生じることを見いだした(図3)。

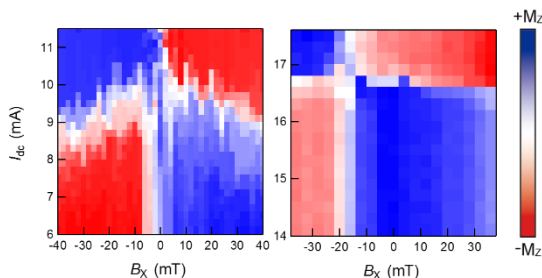


図3. 多結晶 Pt/Co の磁化反転における電流-面内磁場の相図(左図)とエピタキシャル Pt/Co の場合(右図)。エピタキシャル成長により、面直磁化をもつ Co の無磁場磁化反転が可能となる。

(3) 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しスピンの位相を変調する。これは AB 効果と電磁共役な Aharonov-Casher 効果と見なすことができる。スピン干渉デバイスを用いることにより、Rashba と Dresselhaus スピン軌道相互作用が共存する場合、面内磁場の方向はスピンの動的位相を制御し、面内磁場の強さによ

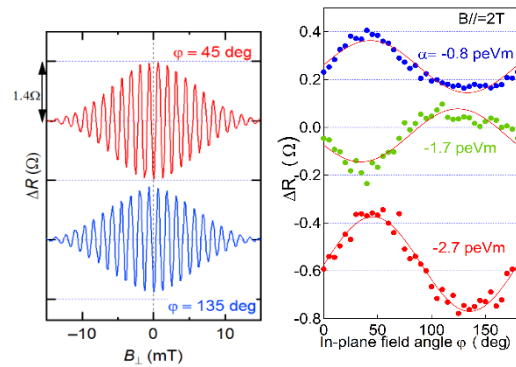


図4. Aharonov-Casher 効果を反映したスピン干渉は面内磁場方向により異方性を示す事を見いだした。面内磁場方向はスピンの動的位相を変調し、面内磁場の強さはスピンの幾何学的位相を変調する事を実証した。

りスピンの幾何学的位相を制御できることを解明した(図4)[5]。

## 5. 今後の計画

スピン軌道相互作用が十分に大きく室温動作が可能な材料系やスピン軌道超格子を中心に新規スピン機能と電場制御に関する研究を進め、電場制御スピン機能素子の基本動作を目指す。

## 6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

- (1) [Y. Kunihashi](#), [H. Sanada](#), [H. Gotoh](#), [K. Onomitsu](#), [M. Kohda](#), [J. Nitta](#), and [T. Sogawa](#), "Drift transport of helical spin coherence with tailored spin-orbit interactions", *Nature Comm.*, **7**, 1-6 (2016).
- (2) [Y. Kunihashi](#), [H. Sanada](#), [Y. Tanaka](#), [H. Gotoh](#), [K. Onomitsu](#), [K. Nakagawara](#), [M. Kohda](#), [J. Nitta](#), and [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).
- (3) [K. Yoshizumi](#), [A. Sasaki](#), [M. Kohda](#), and [J. Nitta](#), "Gate-controlled switching between persistent and inverse persistent spin helix states", *Appl. Phys. Lett.*, **108**, 132402-1-4 (2016).
- (4) [J. Ryu](#), [M. Kohda](#), and [J. Nitta](#), "Observation of the D'yakonov-Perel' Spin Relaxation in Single-Crystalline Pt Thin Films", *Phys. Rev. Lett.*, **115**, 256802-1-6 (2016).
- (5) [H. Saarikoski](#), [A. Reynoso](#), [J. P. Baltanas](#), [D. Frustaglia](#), and [J. Nitta](#), "Spin interferometry in anisotropic spin-orbit fields", *Phys. Rev. B* **97**, 125423-1-10 (2018).

ホームページ等

<http://nittalab-material-tohoku.jp/>