



東北大学

平成 26 年 7 月 14 日

報 道 機 関 各 位

国立大学法人 東北大学 大学院 工学研究科

スピン軌道相互作用の直接検出法確立

研究成果のポイント

- ・ 2 つのスピン軌道相互作用評価の比を直接決定
- ・ 永久スピン旋回状態の検出に成功
- ・ スピントロニクス、スピン量子情報のデバイス設計に重要な知見

【概要】

国立大学法人東北大学大学院工学研究科 新田淳作教授、好田誠准教授、佐々木敦也（修士課程大学院生）、国橋要司博士（現 NTT 物性科学基礎研究所）と、ドイツ・レーゲンスブルグ大学 Klaus Richter 教授の共同研究グループは、半導体細線構造に印加する磁場方向を変化させることにより、量子干渉効果が最大となる角度からスピン軌道相互作用を直接決定できる検出法を確立しました。

スピン軌道相互作用（注 1）は電場を磁場に変換する相対論的な効果です。固体中では真空中に比べスピン軌道相互作用の効果が極めて強くなり、固体物理の様々な分野で重要な役割を果たす普遍的な効果です。また、磁場を用いることなく電場で電子スピンを生成・制御・検出することが可能となるためスピントロニクスに重要な役割を果たすことが期待されています。しかしながら、これまでのスピン軌道相互作用の評価には大きなばらつきがありました。半導体二次元電子ガス中の電場に起因した Rashba スピン軌道相互作用（注 2）と半導体構成原子のミクロな電場に起因した Dresselhaus スピン軌道相互作用（注 3）の 2 つが存在するため、2 つ以上の未知なパラメータを用いて実験データを解析する必要があったからです。一方、この 2 つのスピン軌道相互作用の強さを制御し等しくすることができるとスピン緩和（注 4）の抑制された永久スピン旋回状態（注 5）が実現されます。このため、キャリア濃度を決定するホール測定のような、信頼性が高くかつ簡便なスピン軌道相互作用の評価方法の確立が望まれていました。今回、半導体細線構造に面内磁場（半導体二次元電子ガスに平行な磁場）を印加することにより量子干渉効果（注 6）の振幅が最大となる面内磁場方向から、実験データを解析することなく直接 Rashba スピン軌道相互作用と Dresselhaus スピン軌道相互作用の比を求めることができる信頼性の高い計測法の開発に成功しました。

本研究成果は、半導体や磁性体を用いたスピントロニクスだけでなくスピン量子情報やトポロジカル絶縁体、マヨラナフェルミ粒子等スピン軌道相互作用が重要な役割を果たす研究分野に大きなインパクトをもたらすことが期待されます。

本研究の成果は英国科学雑誌 Nature Nanotechnology のオンライン版（ロンドン時間 2014 年 7 月 13 日 18 : 00 発行）に掲載されました。

【背景】

半導体や金属などの電気的特性を計測する手法としてホール測定があります。これは 1879 年に Hall が発見したホール効果に起因しており、電流と面直磁場（半導体に垂直方向の磁場）を印加するとキャリア濃度に依存した横方向電圧が生じることを利用しています（図 1）。最近、電子スピンを電氣的に操作する手法としてスピン軌道相互作用が注目されています。スピン軌道相互作用は相対論的な効果で電場を磁場に変換することから、電場によるスピン生成・制御・検出が可能となります。1997 年我々はゲート電場によって半導体二次元電子ガス中の Rashba スピン軌道相互作用が制御できることを世界で初めて実証しました。一方、III-V 族半導体には、結晶が作るミクロな電場に起因した Dresselhaus スピン軌道相互作用が存在します。この 2 つスピン軌道相互作用の強さが近くなる領域では実験データの詳細な解析が必要であるため、2 つのスピン軌道相互作用の正確な値を求めるのは困難でその値に大きなばらつきがありました。またこの 2 つのスピン軌道相互作用の強さを制御し等しくすることができるとスピン緩和の抑制された永久スピン旋回状態が実現されるため、信頼性の高い簡便なスピン軌道相互作用の評価方法が強く望まれていました。

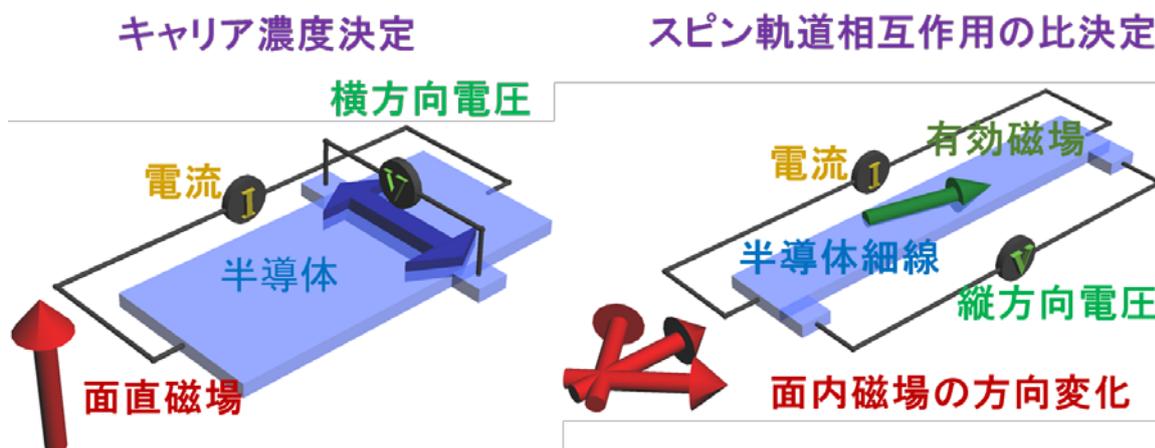


図1 ホール測定

図2 スピン軌道相互作用測定

【研究内容】

東北大学の研究グループはドイツ・レーゲンスブルグ大学の研究グループと共同で、半導体細線に印加する面内磁場（半導体二次元電子ガスに平行な磁場）の方向がスピン軌道相互作用の作る有効磁場と一致する角度から直接 Rashba スピン軌道相互作用の強さ α と Dresselhaus スピン軌道相互作用強さ β の比 α/β を求めることを実証しました。

共同研究グループはスピン緩和長より細い半導体細線構造では電子スピンは準 1 次元的に振る舞い、2 つのスピン軌道相互作用の作る磁場は一軸性となることを理論と実験により確認しました。通常、スピン軌道相互作用の作る磁場は電子の運動する方向に依存し電子が散乱して運動方向を変えると有効磁場の向きは変化します。一方、細線構造により電子の運動方向を制限しスピン軌道相互作用の作る有効磁場が一軸性になると、磁場に対する応答は強い異方性を示すことが期待されます。量子干渉効果は磁場に対する感度が高く、系のもつ対称性はその振幅の大きさを決めます。具体的には図 2 に示すように、面内磁場の方向を変化させながら、半導体細線の縦方向の電圧が最大になる方向は面内磁場と 2 つのスピン軌道相互作用が作る有効磁場が同じ向きとなる場合であることを理論計算により確認しました。また、 $[-110]$ 方向の細線では、永久スピン旋回状態が実現すると異方性が消失することを発見しました。これは $[-110]$ 方向の細線では Rashba スピン軌道相互作用と

Dresselhaus スピン軌道相互作用が完全に打ち消し合い、永久スピン旋回状態の証拠となる重要な知見です。

実際に、InGaAs 半導体二次元電子ガスから細線構造を作製し、量子干渉効果（磁気伝導度）を測定すると面内磁場の角度に強い依存性を示すことを観測しました（図3）。また、この磁気伝導度の振幅を面内磁場の角度に対してプロットすると図4のような異方性を示し、数値解析と理論の結果を良く再現することを確認しました。この振幅が最大になる角度から直接 Rashba スピン軌道相互作用 α と Dresselhaus スピン軌道相互作用 β の比 α/β を求めることができることを実証しました。また、面内磁場の大きさを変化させて測定することにより α と β の絶対も求めることができます。さらに細線にゲート電圧を印加し Rashba スピン軌道相互作用 α を変化させゲート電圧によって永久スピン旋回状態を実現することに成功しました。図5に示すようにこのゲート電圧では[-110]方向の細線では異方性が消失し確かに永久スピン旋回状態が実現されていることを検証しました。

本手法は、半導体ヘテロ構造の設計指針を与え、スピン緩和の抑制された永久スピン旋回状態を容易に実現することが可能になります。またスピン回路の基本となるスピン相補インバータ（注7）の実現に貢献できます。

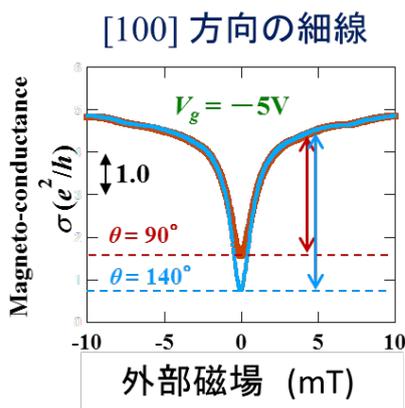


図3 細線の磁気伝導度

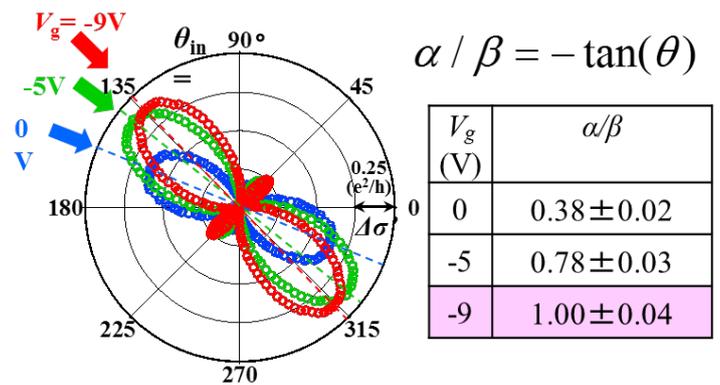


図4 磁気伝導度の面内磁場角度依存性

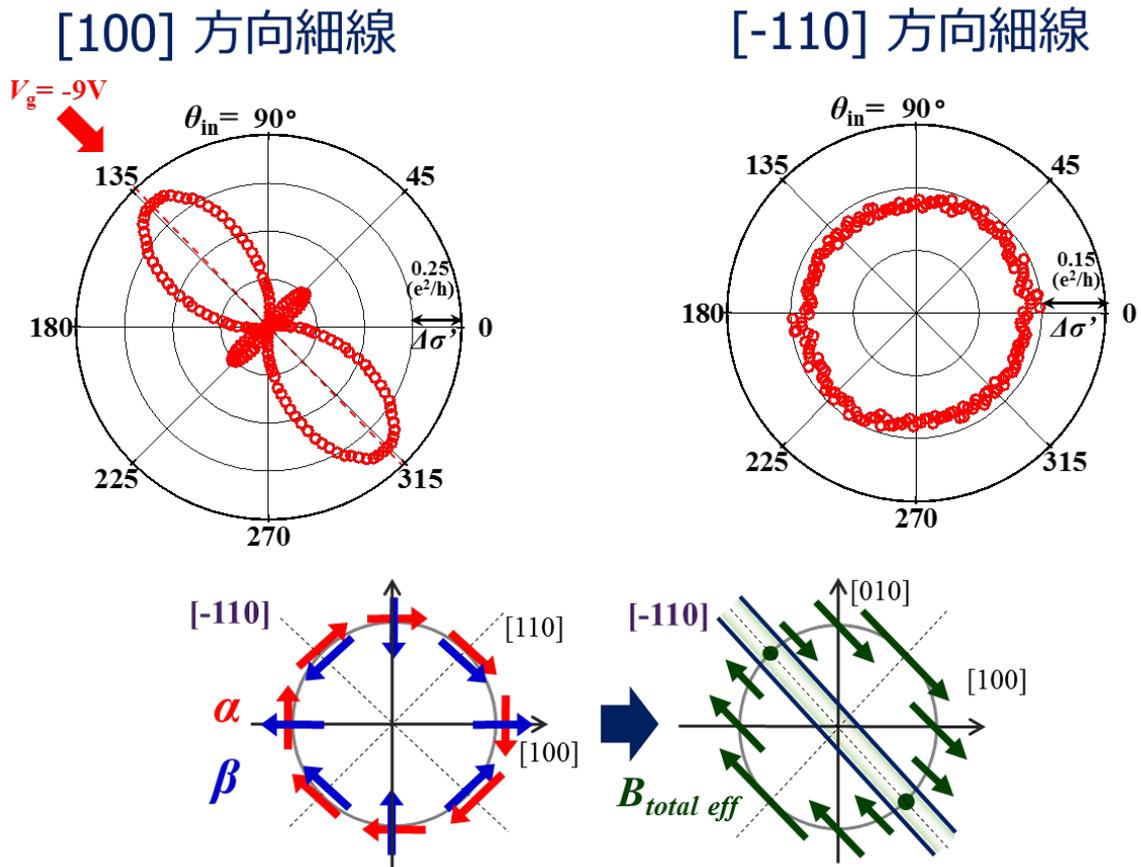


図5 永久スピン巡回状態の証拠:異方性の消失

【将来の展望】

ホール測定は、キャリアの電気的な特性を計測する確立された手法です。スピン軌道相互作用は固体物理の様々な分野の登場する普遍的な現象です。スピントロニクス研究の進展にともない、スピン特性を信頼性が高くかつ簡便に計測する手法の確立が望まれていました。半導体細線構造と面内磁場を組み合わせることにより2つのスピン軌道相互作用を直接求めることができる本手法は、半導体のスピン特性を正確に評価する手法としてスピントロニクスだけでなくスピン量子情報やトポロジカル絶縁体、マヨラナフェルミ粒子等スピン軌道相互作用が重要な役割を果たす研究分野に大きなインパクトをもたらすことが期待されます。

■発表論文の詳細

●タイトル：

Direct determination of spin-orbit interaction coefficients and realization of the persistent spin helix symmetry

●著者名：

A. Sasaki, S. Nonaka, Y. Kunihashi, M. Kohda, T. Bauernfeind, T. Dollinger, K. Richter and J. Nitta

●論文名：

Nature Nanotechnology, published online 13 July (2014) London Time 18:00,
DOI: 10.1038/NNANO.2014.128

【お問い合わせ先】

東北大学大学院工学研究科

教授 新田 淳作

TEL : 022 - 795 - 7315

Email : nitta@material.tohoku.ac.jp

■用語の説明

(注1) スピン軌道相互作用

電子が電場中を高速に運動する際、磁場を感じる相対論的な効果。Diracによって導かれた。真空中では、Diracギャップと呼ばれる電子と陽電子のエネルギーギャップ(約1 MeV)がエネルギー分母に関与するためその効果は小さい。一方、固体中では、電子と正孔のエネルギーギャップ(約1 eV)に置き換わるためスピン軌道相互作用の効果は大きくなり固体物理の様々な分野で重要な役割を果たす。

(注2) Rashba スピン軌道相互作用

バンドギャップの異なった半導体材料を組み合わせることにより電子を量子井戸に閉じ込め二次元電子ガスを形成することができるが、異なった半導体材料界面にできる電場が原因となって生じるスピン軌道相互作用。この電場の強さはゲート電圧で変調できるため Rashba スピン軌道相互作用の強さを外部から制御できることが1997年実証された。

(注3) Dresselhaus スピン軌道相互作用

III-V族半導体ではIII族原子とV族原子間に電場が生じる。このようなマイクロな電場が原因となって生じるスピン軌道相互作用。材料固有の強さとなるが半導体量子井戸の厚さによって変化するため半導体ヘテロ構造の設計によって制御できる。

(注4) スピン緩和

スピン軌道相互作用の無視できない系では、電子の電荷と異なりスピンは保存されない。軌道運動による角運動量とスピン角運動量が結合しているため、電子の運動状態によってスピンの状態が変化する。散乱により電子運動量が変わると有効磁場の方向も変化するそれに伴いスピンの状態が変化する。このように揃っていたスピンの状態が乱雑になりスピン情報が失われること。

(注5) 永久スピン旋回状態

Rashba スピン軌道相互作用 α と Dresselhaus スピン軌道相互作用 β が等しくなるように制御すると、有効磁場の向きが揃い散乱により電子が運動方向を変えてもスピン緩和が抑制された状態が実現する。具体的には、[110]方向にはスピンのコヒーレントな回転が持続し、垂直な[-110]方向にはスピンの向きが回転せず伝搬するスピン緩和が抑制された状態となる。

(注6) 量子干渉効果

量子力学によると電子は粒子でありかつ波の性質をもつ。このため伝導体中で散乱を受けながら自己干渉し伝導に寄与しなくなる定在波状態(局在状態)を形成する。この電子の局在状態は磁場により電子の位相が変化すると量子干渉が破れ電気伝導度が増加する。この磁気伝導度はスピン軌道相互作用により強く依存する。

(注7) スピン相補インバータ

論理反転回路はデジタル論理の基本回路となるが電子と正孔チャネルを持つ2つのCMOS(相補型電界効果トランジスタ)を組み合わせる構成される。スピン相補インバータはスピンを用いた論理反転回路。電子と正孔の2つのキャリアの代わりに上向き下向きスピンを用いるのが特徴であり、永久スピン旋回状態($\alpha = \beta$)と逆スピン旋回状態($-\alpha = \beta$)を電界制御することにより動作する。