

Spin Precession and Transport under Spin-Orbit Fields in Semiconductor Two-Dimensional Electron Gases

著者	SAITO TAKAHITO
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	11301甲第19874号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00135747

氏名	さいとう たかひと 齋藤 隆仁
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 知能デバイス材料学専攻
学位論文題目	半導体 2 次元電子ガスにおけるスピン軌道有効磁場下の スピン歳差運動および輸送に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 新田 淳作 東北大学教授 小山 裕 東北大学教授 佐藤 俊一 東北大学准教授 好田 誠

論文内容要約

電子の持つ電荷としての性質のみを利用するエレクトロニクスに対して、電子のスピン自由度を併用することで次世代情報デバイスの実現を目指す研究領域をスピントロニクスと呼ぶ。特に、III-V族半導体ヘテロ構造等を用いた半導体スピントロニクス分野は Datta-Das 型スピントランジスタ[1]に代表されるような新奇能動デバイスへの応用が期待されている。このときに重要な役割を果たすのがスピン軌道相互作用(Spin-orbit interaction, SOI)と呼ばれる電子スピンとその運動とを結び付ける相対論的な効果である。伝導する電子スピンは SOI を局所的な有効磁場として感じ、それを軸として歳差運動を行う。この SO 有効磁場の大きさをゲート電圧等で変調することで電氣的なスピン制御が可能となる[2]。一方で、SO 有効磁場は電子スピンの運動量に依存するため、散乱によって電子スピンの運動方向を変更するたびにその向きが変化する。そのため、スピン位相が時間経過とともにランダム化され、スピン偏極として保存されていた情報が失われてしまう原因となる(D'yakonov-Perel' スピン緩和機構)。次世代スピントロニクスデバイスの実現のためには、スピン情報を長時間・長距離に渡って保持する技術の確立が必要不可欠である。従って、スピン緩和現象を抑制することで長距離に渡ってスピン輸送を可能にすることが半導体スピントロニクス分野における重要な課題の1つとなる。

(001)方向に成長されたIII-V族半導体ヘテロ構造において、Rashba 項(α)と Dresselhaus 項(β_1, β_3)の2種類のスピン軌道有効磁場の大きさが揃った状態($|\alpha| = \beta_1 - \beta_3$)は永久スピン旋回(Persistent spin helix, PSH)状態[3]と呼ばれ、このとき有効磁場が一軸異方性を持つことによって D'yakonov-Perel' スピン緩和が強く抑制されることが知られている。PSH 状態下では、電子スピンは Helical モード・Homogeneous モードと呼ばれる2つの特殊な空間状態を形成することによって安定化している[4]。PSH 状態を利用した長距離スピン輸送実現を目指す上で、これら2つの PSH モードの観測手法確立は重要なマイルストーンとなる。これまでの先行研究では、極 Kerr 効果を利用した光学的手法を用いて Helical モードの観測[5,6]が為されてきたが、この手法ではスピン面直成分を検出するため面内成分のみを持つ Homogeneous モードの観測は困難であった。そこで本研究では、量子干渉効果を利用した電氣的な手法にて PSH モードの観測を目指す。半導体ヘテロ構造に面直磁場を印加すると、電気伝導度の変化の中に SOI の影響が反映され弱局在(weak localization, WL) / 弱反局在(weak antilocalization, WAL)現象と呼ばれる量子干渉効果が表れる。この電気伝導度曲線から PSH モードの寄与の抽

出を行うことを考える。電気的手法では面直・面内の全てのスピン成分を検出可能であることから、2つのモードの同時観測を期待することが出来る。一方、PSH状態近傍におけるWL/WAL現象は2020年に初めてその理論的表式が導出されたばかりであり[7]、モードの観点から実験的に研究を行った報告はこれまでに全く為されていない。

本論文は、全7章で構成される。第1章は序章であり、半導体スピントロニクス分野における研究背景および本研究の目的を述べている。第2章では、本研究で重要なIII-V族半導体ヘテロ構造中のSO有効磁場について説明し、PSH状態によるスピン緩和の抑制やPSHモードの形成についても述べられる。第3章では、電子スピンの光学的検出手法および電氣的検出手法について、その具体的な方法を記述している。第4章から第6章までが本研究の結果をまとめた部分である。以下に各章の詳細を述べる。

第4章 GaAs量子井戸における永久スピン旋回近傍状態の達成

永久スピン旋回モードの電氣的観測を目指す上で、まずは測定試料中でSO有効磁場がPSH状態の近傍にあることを確かめる必要がある。本章では、(001)方向GaAs/AlGaAs量子井戸において時間空間分解Kerr回転測定を行い、ドリフト輸送・拡散輸送の共存領域における電子スピンの時間空間ダイナミクスを測定した。 $x//[1\bar{1}0]$ 方向および $y//[110]$ 方向にホールバー構造を形成して面内ドリフト電場を印加することでドリフト誘起SO有効磁場を生み出し、また空間分解測定を行うことによって拡散誘起SO有効磁場の検出を行った。図1に x 方向のドリフト速度 $v_{dr,x} = 10 \text{ km/s}$ において測定された面直電子スピン偏極 S_z の時間空間マップを示す。同様の測定を x, y 両方向で様々なドリフト速度に対して行った。得られた時間空間マップを数式モデルで解析することによって、歳差運動周波数からドリフト誘起SO場および拡散誘起SO場それぞれに起因した成分の抽出に成功した。さらに各周波数成分のドリフト・拡散速度に対する変化率からRashba項(α)、Dresselhaus項(β_1, β_3)のSO係数を評価した。2つの輸送機構から評価されたSO係数は比較的近い値をとっており、ドリフト・拡散輸送の共存領域から正確にSO係数を評価できていると結論付けた。また、求められたSO係数から本試料におけるSO場がPSH状態に近い位置に存在することも確かめることができた。

第5章 永久スピン旋回状態近傍における弱局在/弱反局在現象に関する実空間シミュレーション

本章では、PSHモードの電氣的観測に向け、理論およびシミュレーションの観点から考察を行った。PSH状態近傍のWL/WAL現象に関するWeigeleら[7]による理論において式中にPSHモードの緩和レートに起因した項が現れることを指摘し、磁気輸送測定から

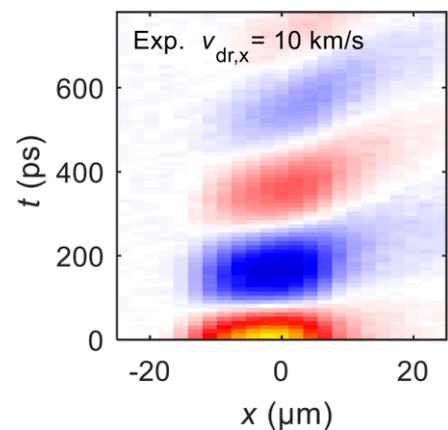


図1. 測定された電子スピン S_z の時間空間マップ [$v_{dr,x} = 10 \text{ km/s}$]

モード緩和レートを評価できる可能性を示した。また、この仮説を実証するために WL/WAL 補正の実空間シミュレーションを行った[8]。本シミュレーションでは疑似乱数発生器によって電子スピンの廻る閉経路を生成し、各閉経路における量子干渉強度を計算する。SO 場による歳差運動は回転行列として実装されており、Rashba 項 (α)、Dresselhaus 項(β_1, β_3)の全ての SO 場が内包されている。シミュレーションによって得られた PSH 状態近傍の WL/WAL 曲線に対して Weigele モデルでフィットすることで Helical および Homogeneous の 2 種類の PSH モードが持つ固有の緩和レートを抽出可能であることを示した。このことから、WL/WAL 曲線において 2 種類の PSH モードの寄与を同時に観測可能であることが明らかになった。続いて、評価されたモード緩和レートの物理的理解を深めるため、時間空間分解 Kerr 回転測定を模した Monte Carlo シミュレーションを実施した。Kerr 回転法シミュレーションの場合にはスピン偏極の初期状態を変えることで Helical, Homogeneous のうち一方の PSH モードのみの選択励起が可能であることから、それぞれのモードの時間空間ダイナミクスの計算を行った。その結果、WL/WAL 曲線から Weigele モデルによって抽出された 2 種類の PSH モード緩和レートはいずれも Kerr 回転法において現れるモード(空間構造)の緩和レートと良く一致することが分かった。これは電気測定 (WL/WAL 現象)と光学測定(Kerr 回転法)の間で電子スピンの観測手法が大きく異なるにもかかわらず、同様のスピン緩和レートで物理描像が記述可能であることを示唆している。

第 6 章 永久スピン旋回モードの電氣的観測手法の確立

第 5 章では理論およびシミュレーションの観点から PSH モードの電氣的観測に向けた考察を行った。本章では、第 5 章で得られた知見を基に(001)方向 GaAs/AlGaAs 量子井戸において実際に電気測定を行い、WL/WAL 現象から PSH モード緩和レートの評価に挑んだ。量子井戸内の SO 場は第 4 章の結果より PSH 状態近傍にあることがすでに確かめられている。ゲート電圧(キャリア密度)を変化させることで SO 係数を変調し、各点における磁気伝導度の変化を測定した。磁気伝導度曲線は全てのキャリア密度において WAL 現象を示し、これに対して Weigele モデルを適用してフィットすることで Helical および Homogeneous モードの緩和レートを実験的に抽出した(図 2)。続いて、求められたモード緩和レートが正確であることを確かめるために SO 係数の電氣的評価を行った。着目したのは、2 次元ホール素子構造と 1 次元細線構造における磁気輸送特性の差異である。2 次元構造では PSH 場の一軸性を破壊する線形

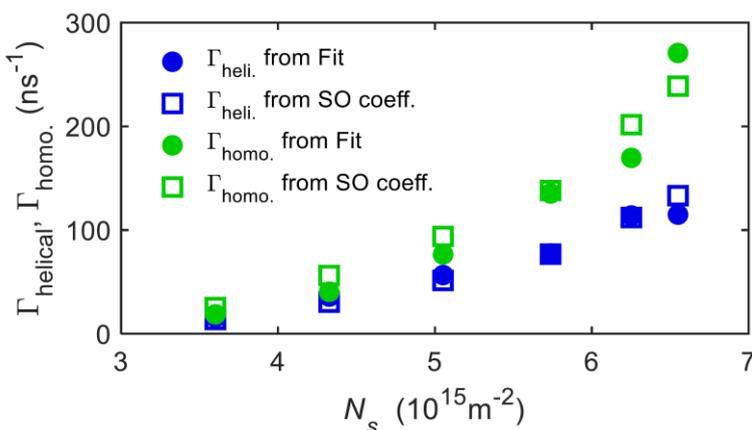


図 2. WAL 曲線から抽出された Helical モード($\Gamma_{\text{heli.}}$) および Homogeneous モード($\Gamma_{\text{homo.}}$)緩和レートのキャリア密度 N_s 依存性。

項の小さな差分($|\alpha| - (\beta_1 - \beta_3)$)および Dresselhaus の 3 回対称項(β_3)が求められる[7]。一方、1 次元構造の場合には細線の閉じ込め効果によって電子スピンの感じる有効磁場が変調され、WAL が抑制されて WL へと遷移する。このとき、WL 振幅の面内磁場角度依存性を測定することによって α/β_1 比が推定される[9]。これら次元性の異なる 2 つの磁気伝導度特性の結果を組み合わせることで全ての SO 係数(α, β_1, β_3)の分離・評価が可能となる。SO 係数から算出した PSH モード緩和レートは Weigele フィットから抽出したものと良く一致したことから(図 2)、WAL 現象から正確に PSH モード緩和レートの実験的評価を行うことができた結論付けた。

第 7 章は結論であり、本研究で得られた知見をまとめている。

以上、本論文では量子干渉効果である弱局在/弱反局在現象に着目し、III-V 族半導体ヘテロ構造の永久スピン巡回モードを電氣的に観測している。電氣的手法を採用することによって、Helical モードに加えて従来の光学的手法では観測困難であった Homogeneous モードの検出に成功している。また、本手法は光学的手法では測定の難しかった InAs, InSb 量子井戸等の他の材料系にも適用できる可能性を持つため、半導体スピントロニクス分野の発展に繋がる重要な成果である。

- [1] S. Datta, and B. Das, Appl. Phys. Lett. **56**, 665 (1990).
- [2] J. Nitta, T. Akazaki, H. Takayanagi, and T. Enoki, Phys. Rev. Lett. **78**, 1335 (1997).
- [3] B. A. Bernevig, J. Orenstein, and S. C. Zhang, Phys. Rev. Lett. **97**, 236601 (2006).
- [4] G. Salis, M. P. Walser, P. Altmann, C. Reichl, and W. Wegscheider, Phys. Rev. B **89**, 045304 (2014).
- [5] J. D. Koralek, C. P. Weber, J. Orenstein, B. A. Bernevig, S. C. Zhang, S. Mack, and D. D. Awschalom, Nature (London) **458**, 610 (2009).
- [6] M. P. Walser, C. Reichl, W. Wegscheider, and G. Salis, Nat. Phys. **8**, 757 (2012).
- [7] P. J. Weigele, D. C. Marinescu, F. Dettwiler, J. Fu, S. Mack, J. C. Egues, D. D. Awschalom, and D. M. Zumbühl, Phys. Rev. B **101**, 035414 (2020).
- [8] A. Sawada, T. Koga, Phys. Rev. E **95**, 023309 (2017).
- [9] A. Sasaki, S. Nonaka, Y. Kunihashi, M. Kohda, T. Bauernfeind, T. Dollinger, K. Richter, and J. Nitta, Nat. Nanotech. **9**, 703–709 (2014).