量子干渉で観る永久スピン旋回状態

山本壮太*

Persistent Spin Helix Observed in Quantum Interference

Sota YAMAMOTO*

For realizing spintronics applications driven by the spin-orbit interaction requires to evaluate and control the spin-orbit parameters precisely. Although InSb is one of the most prominent candidates for the device applications, the Rashba and the Dresselhaus spin-orbit interactions in this material have not been evaluated simultaneously in an appropriate way. Weak anti-localization, a quantum interference effect in a 2-dimensional electron gas system, was employed to explore an InSb/AlInSb quantum well in this study. A wide range of gate modulation of carrier density combined with a Monte-Carlo-based simulations revealed the strong Rashba and Dresselhaus parameters simultaneously. The results suggest that InSb can contribute miniaturization of spin-orbit-interaction-based spintronics devices.

1. 研究背景

電子が持つ磁気的な自由度であるスピンを利用した情報デバイス は、既存の電荷型デバイスでは実現できない新奇の機能を実現でき ると期待されている.このようなスピン応用デバイスを実現するた めには、有効磁場としてスピン状態に大きな影響を与えるスピン軌 道相互作用の理解と制御が不可欠である.

半導体量子井戸中では Rashba 型と Dresselhaus 型の2種類のスピン軌道相互作用が働く.これらが作る有効磁場は、図1(a)と1(b) に示したように異なる運動量依存性を持つため、強度比を調整する ことで図1(c)に示した1軸の磁場を生成することができる.このような1軸磁場中では電子スピンの歳差軸が一方向に揃うため、スピンの向きは図1(d)のように空間的な周期構造を描く.この状態は永 久スピン旋回状態と呼ばれ、理論上スピンの状態を無限に維持する ことができる.永久スピン旋回状態で実現するスピンの空間構造は 波に似た性質を示すため、既存の電荷型デバイスでは実現できない、 波動性を持ったスピン情報担体への応用が提案されている[1].

本研究では、スピン軌道相互作用が強いとされる InSb の量子井戸 で Rashba および Dresselhaus スピン軌道相互作用の評価を行った. 既にデバイス作製や測定の技術が成熟している GaAs 量子井戸とは 異なり、InSb におけるスピン軌道相互作用の評価は十分に進んでい



図1 (a) Rashba型および (b) Dresselhaus型のスピン軌道相 互作用がそれぞれ作る有効磁場の運動量k依存性. (c) 永久スピン旋回状態における合成の有効磁場の運動量 依存性. (d) 永久スピン旋回状態において電子スピン 偏極が描く空間構造の概念図.

ない. さらに, Rashba 型と Dresselhaus 型のスピン軌道相互作用の係数を独立に評価することは難しく, 重要な課題として残されていた[2-4].

2. 実験

散乱体との衝突を繰り返しながら半導体中を移動する電子の経路には、ある散乱因子を出発して元の位置に戻る経路が存在する.この閉経路が位相コヒーレンス長より短いとき、閉経路を逆回りに進む時間反転対称な経路を辿った電子同士が干渉を起こすため電気伝導度が変化する.極低温の二次元電子系においては、このような量子干渉現象はスピン軌道相互作用によって変調される.そのため、電気伝導度の変化からスピン軌道相互作用のパラメータを評価することができる.

2025年2月23日 受理 *豊田理研スカラー

東北大学大学院工学研究科知能デバイス材料学専攻

本研究では、InSb/AlInSb 量子井戸のホールバーを作成し、ゲー ト電圧を制御しながら上述の量子干渉効果による磁気伝導度の変化 を測定した. 図 2(a) に Shubnikov-de Haas 振動測定から得た電荷密 度 nsのゲート電圧 Va依存性を示す.本研究ではゲート電極の堆積時 に、トリメチルアルミニウムガスによる還元作用 (self-cleaning effect)を利用して表面酸化膜を除去した後に Al₂O₃絶縁膜を成膜し た.これにより量子井戸の空乏化を回避し、図に示したように、ゲ ート電圧の制御による電荷密度の変調を実現することができた.図 2(b)はゲート電圧を変化させながら測定した電気伝導度の磁場依存 性である. 印加したゲート電圧の範囲においては、零磁場から磁場 の強度を増大させることで伝導度が一度減少し、さらに磁場を増加 させ続けると伝導度が増加に転じるという振る舞いが確認された. 零磁場における高い電気伝導度はスピン軌道相互作用に起因したス ピン状態の変化によって局在化が弱められることで生じる.これは 弱反局在と呼ばれる現象で、スピン軌道相互作用が強い材料系にお いて表れる.弱反局在は磁場の印加によって解かれるため、零磁場 から磁場を増大させると電子波動関数の局在化が強まり、伝導度は 低下する.一方で磁場が強い領域においては、磁場による電子波動



図2 (a) 電荷密度のゲート電圧依存性. (b) 各ゲート電圧における電気伝導度の磁場依存性.赤の曲線はモンテカルロ法に基づくモデルによるフィッティング.
(c) フィッティングから得られたスピン軌道相互作用の係数. α, β₁, β₃はそれぞれ Rashba, 1次および3次のDresselhaus スピン軌道相互作用の係数.

関数の位相変化の影響で局在化が解かれるため高い電気伝導度が実現する.そのため,零磁場近傍では印加磁場の増大に 伴い減少した電気伝導度が高磁場では増加するという振る舞いが観測されたと考えられる.

得られた観測結果からスピン軌道相互作用のパラメータを評価するため、本研究ではモンテカルロシミュレーションに 基づくモデル[5]を用いて解析を行った.採用したモデルでは、実験で用いた InSb 量子井戸中の主たる緩和機構である D' yakonov Perel 機構を適切に扱うことができる.図2(c)に解析から得られたパラメータのゲート電圧依存性を示す.ここで、*a* は Rashba スピン軌道相互作用の係数であり、 β_1 と β_3 はそれぞれ1次と3次の Dresselhaus スピン軌道相互 作用の係数である.図から分かるように*a* の値は9.5×10⁻¹² から11×10⁻¹² eVm の範囲でゲート電圧に対して増加した. この傾向は、*a*が量子井戸に印加された電場に線形比例することから説明可能である.また、 β_3 の値もゲート電圧に対 して線形に増加する傾向が見られた.これは β_3 が電荷密度に対して線形に比例するためであり、ゲート電圧の増加に伴う電荷密度の増加[図2(a)]を反映した結果であると考えられる.一方で、閉じ込め波数の2乗に比例する β_1 の変化は僅 かであった.この結果は、バンド計算から得られる閉じ込め波数の変化と比較して整合した結果である.

3. 結論

本研究では、InSb/AlInSb 量子井戸の電気伝導度に観られる量子干渉効果を実験的に検出し、モンテカルロシミュレーションに基づく解析から Rashba と Dresselhaus スピン軌道相互作用の係数を同時に評価した.得られた相互作用の係数 は GaAs 量子井戸で報告されている値[6]の約40倍であった.永久スピン旋回状態を応用したデバイスの動作に必要な距離はスピン軌道相互作用の強度に逆比例するため、デバイスのサイズで比較すると、InSb のデバイスでは GaAs のデバイ スに比べて 80%程度サイズを縮小可能であると試算でき、既往の材料系に対する InSb の優位性を示すことができた.一方で本研究において用いた量子井戸構造では、ゲート制御のみによってスピン軌道相互作用を変調し、永久スピン旋回状態を実現することはできなかった.永久スピン旋回状態を実現するためには αと βの値が等しくなる必要があるため、図 2(c) から分かるように、αをより小さく設計すればよい.このような小さな αは、閉じ込め方向のポテンシャル勾配が小さな量子井戸において実現できる。今後は、本研究で得られた基礎物性に関する知見とデバイス作製やシミュレーションの技術を活用することで、より優れたスピン制御デバイスが実現可能になると期待される.

REFERENCES

- 1) M. Kohda, et al., Applied Physics Letters, 123 (2023) 190502.
- 2) B. Grbić, et al., Phys. Rev. B, 77 (2008) 125312.
- 3) R. L. Kallaher, et al., Phys. Rev. B, 81 (2010) 075303.
- 4) Z. Lei, et al., Phys. Rev. Res., 4 (2022) 013039.
- 5) A. Sawada and T. Koga, Phys. Rev. E, 95 (2017) 023309.
- 6) F. Dettwiler, et al., Phys. Rev. X, 7 (2017) 031010.