

電場による電子スピンのコヒーレント制御

大学院工学研究科 新田 淳作 (nitta@material.tohoku.ac.jp)
大学院工学研究科 好田 誠 (makoto@material.tohoku.ac.jp)

1. はじめに

巨大磁気抵抗効果のインパクトは、磁性体の磁化の向きに依存して電気抵抗が大きく変化することを発見したことにある。この発見を契機としてスピンを情報の担体としてもちいることが可能であることが認識され、スピントロニクス分野の開拓を促した。また、電子スピンはスピン上向き下向きの重ね合わせで記述できることから理想的な二準位系であり量子情報として最小の担体である。これまで電子スピンは、微小な磁気モーメントを有することから主に磁場によって制御されてきた。制御線に流す電流によって生じる磁場は、半導体中でスピン分離を生じさせる磁場と比べて非常に小さいため、スピン偏極したキャリアを生成したり、サブミクロンサイズでスピン歳差運動を制御することは困難である。また、外部磁場によるスピン偏極電子の生成や制御は、局所的な磁場の発生が困難であり、電子スピンの軌道がローレンツ力により変化し、ホール電圧を生じるなどデバイスの正常な動作を妨げることになる。我々は、半導体中二次元電子ガス中のスピン軌道相互作用がゲート電場により制御可能であることを世界に先駆けて実証する [1]とともに、スピン軌道相互作用が作る有効磁場によりスピンの歳差運動を生じさせ、実際にスピン干渉デバイスにおいてスピンの回転角度がゲート電圧により制御可能であることを実験的に示してきた [2]。一方、スピン軌道相互作用の作る有効磁場は電子の運動量ベクトルに依存するためスピン緩和の原因にもなるためスピン緩和を抑制することが重要である。

本研究ノートでは、2つの起源の異なるスピン

軌道相互作用の競合によるスピン緩和時間の増大と、スピン軌道相互作用とゼーマン効果の競合による幾何学的位相の制御について紹介する。

2. ゲート電極付き InGaAs 細線構造におけるスピン緩和時間の増大

スピン軌道相互作用は電場中を電子スピンが高速運動することにより電場が磁場に変換される相対論的な効果である。半導体二次元電子ガスでは、結晶の反転対称性の破れに起因する Dresselhaus スピン軌道相互作用と、量子井戸の構造反転対称性の破れに起因する Rashba スピン軌道相互作用がある。InGaAs/InAlAs ヘテロ構造を用いた二次元電子ガスは、ゲート電圧により量子井戸の対称性を制御することによりスピン軌道相互作用が変調することから Rashba のスピン軌道相互作用が重要であることが知られている。一方、スピン軌道相互作用によって生じる有効磁場は電子スピンの運動する方向に依存するため電子散乱により有効磁場の向きが変化しスピン緩和をもたらす。スピン軌道相互作用の電場制御性を保ちつつスピン緩和を抑制することがスピントロニクスデバイスの実現にとって重要な課題となる。スピン緩和を抑制するための方策としてスピン緩和長より細い細線構造を用いることが、有効であることが理論的に検討されている。そこで、電子の運動方向をそろえるため幅 1 μm 以下の細線構造を作製し、弱反局在の解析によりスピン緩和時間を評価した結果、1桁近く長くなることを確認した。また、細線上に形成したゲート電圧によりスピン緩和時間が1桁以上大幅に増加することがわかった [3]。

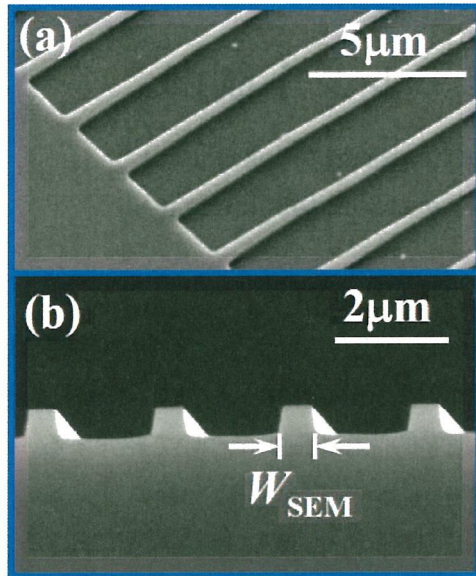


図1 作製した InGaAs 細線構造の SEM 写真。普遍的コンダクタンスの揺らぎ (UCF) を抑えるため 95 本の細線を同時に測定する。細線構造はスピン軌道相互作用を制御するためのゲート電極で覆われている。

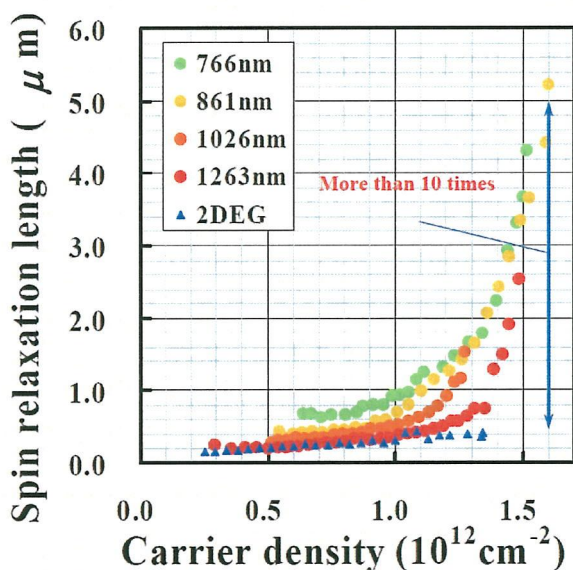


図2 InGaAs 細線のスピン緩和長のキャリア濃度依存性。細線幅が狭くなるにつれスピン緩和が抑制されていることが判る。一方、キャリア濃度を上げるとともに Rashba スピン軌道相互作用を小さくするとスピン緩和長の急激な増大が観測された。

図1に作製した InGaAs をチャンネルとする細線構造の SEM 写真を示す。細線構造はスピン軌道相互作用を制御するためゲート電極で覆われて

いる。細線幅が $1 \mu\text{m}$ 以上では、スピン緩和による明瞭な弱反局在効果 (磁場ゼロでのコンダクタンスピーク) が観測されるが、細線幅が $1 \mu\text{m}$ 以下になるとコンダクタンスのピークが徐々に抑制されスピン緩和が抑制されることを確認した。これらの実験結果は最近の理論を用いて解析することによりスピンの緩和時間を求めることが可能となる。図2にはさまざまな細線幅の磁気コンダクタンスから弱反局在解析により求めたスピン緩和長のキャリア濃度依存性を示す。ゲート電圧を印加しキャリア濃度を増加すると同時に Rashba スピン軌道相互作用を弱めるとスピン緩和時間が大幅に増大することが確認された。二次元電子ガスの場合と比べて、スピン緩和時間が 65 倍にも増大していることがわかった。

このスピン緩和時間の増大は、細線構造による有効磁場が揃う効果に併せて Rashba スピン軌道相互作用の強さ α が Dresselhaus スピン軌道相互作用 β に近づくことにより説明できる。 $\alpha = \beta$ ではスピン軌道相互作用が作る有効磁場の向きが電子の運動量ベクトルに依存せず一軸性となり、散乱後も同じ有効磁場方向で歳差運動を続けるためと解釈される [4]。

3. ゼーマン効果をもちいた幾何学的位相の制御

半導体二次元電子ガスにおけるメゾスコピックリング配列を用いたスピン干渉デバイスは、スピン注入せずとも動作し、ゲート電場によるスピン軌道相互作用の制御によりスピン位相差の制御・検出が可能であるため、近年注目されている [2]。スピン干渉デバイスにおいてスピンの位相変化は、スピン歳差運動による動的な位相と、有効磁界が作る立体角によって決まる幾何学的位相によって決定される。そのため、スピン軌道相互作用をゲート電場制御することによって、スピンの位相制御が可能であり、スピン干渉に伴う Aharonov - Casher (AC) 振動が観測され、スピンの位相変化の検出が可能となる。本研究では、幾何学的位相が面内磁界により変調されることを考慮し、面内磁場によるゼーマン効果とスピン軌道相互作用の競

合によりスピン干渉効果がどのように変調されるかを調べた。

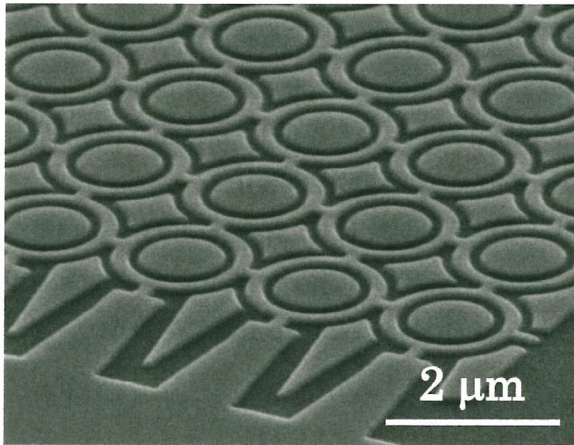


図3 作製した InGaAs リング構造の SEM 写真。AB 振動を抑えるため 1600 個のリング列からなる。リング列はスピン軌道相互作用を制御するためのゲート電極で覆われている。

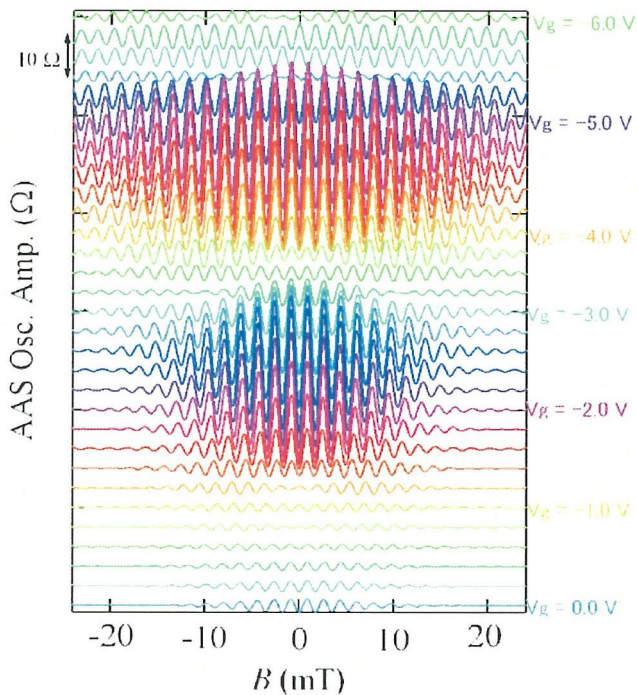


図4 InGaAs リング列で観測された AAS 振動のゲート電圧依存性。ゲート電圧により $h/2e$ の周期を持った振動 (AAS 振動) が変調されている。これは、電場によるスピンの位相が変調される AC 効果に起因する。このデータは、面内磁場はゼロで測定された。

InGaAs を二次元電子ガスとする逆 HEMT 構

造を用いて、外径 $1.7 \mu\text{m}$ 、内径 $1.2 \mu\text{m}$ のメゾスコピックリング配列を有し、 Al_2O_3 をゲート絶縁膜として用いた素子を作製した。図3 に作製したリング構造の SEM 像を示す。リング配列構造は 40×40 の 1600 個のリングからなり、Aharonov-Bohm (AB) 振動を抑制し、Altshuler-Aronov-Spivak (AAS) 振動の抽出を図った。AB 振動は試料固有の干渉効果であり、ゲート電圧を印加することにより電子波長が変化すると干渉パターンも変化する。一方、AAS 振動は時間反転対称な干渉効果であるため、電子波長が変化しても影響されず、スピンの位相にのみ依存して干渉パターンは変調される。このため、スピンの位相を反映した AC 振動を検出するのに適している。測定は、 $T = 1.7 \text{ K}$ において面内磁場を印加した状態における AC 振動を評価した。

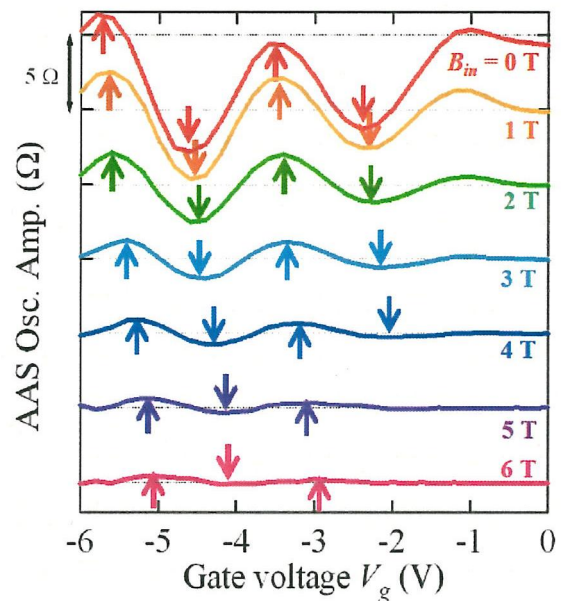


図5 AC 振動の面内磁場依存性。面内磁場を印加するにつれ AC 振動の位相が正のゲート電圧方向にシフトする様子が観測された。

図4には、面内磁場ゼロで測定された AAS 振動のゲート電圧依存性を示す。磁場に対し $h/2e$ の周期を持った AAS 振動がゲート電圧によって変調されていることがわかる。これは、スピン軌道相互作用の変化に伴い、スピンの位相が変調されていることを示している。

図5に面内磁場 B_{in} 0~6 T 印加において、垂直磁場が0 T におけるAAS 振動のゲート電圧依存性を示す。これより、スピン干渉 (AC 振動) がゲート電場によって制御されていることが分かる。面内磁場 $B_{in} = 0$ におけるAC 振動に含まれていた負の抵抗成分は、面内磁場増大に伴い抑制され、さらにAC 振動の振幅値が抑制された。これは、面内磁場印加に伴う位相コヒーレンス長の抑制により、負の抵抗成分である弱反局在減少の抑制、及びスピン干渉の減少に起因するものである。また、面内磁場印加に伴い、AC 振動に位相シフトが生じていることが観測された。面内磁場印加に伴うAC 振動の位相変化を図5 の矢印で示す。これは面内磁場によるゼーマン効果とスピン軌道相互作用の競合状態において、スピン位相変化を決定する幾何学的位相が、面内磁場により変調されたことに起因するためと考えられる。

本実験では、面内磁場印加により、コヒーレンス長の抑制に伴うスピン干渉の抑制、及びベリー位相の変調に伴うAC 振動の位相変化が観測された。これにより、スピン位相の制御手法として電場に加えてゼーマン効果も有効であることを実験的に示した。

4. まとめ

電子スピンは、これまで主に磁場によって生成・操作されてきた。スピン軌道相互作用は相対論的な効果であり、電場を磁場に変換する効果である。このスピン軌道相互作用に起因する磁場をゲート電圧で制御し、電気的な手法で電子スピンを生成・操作・検出することが可能となってきた。本研究の成果は今後のスピントロニクスや量子情報の研究に新たな知見を提供するものと期待される。

謝辞

本研究で紹介した実験結果は、博士課程後期学生国橋要司君と博士課程前期学生高木淳君によって測定・解析されたものである。

参考文献

- [1] J. Nitta, T. Akazaki, H. Takayanagi, and T. Enoki, *Phys. Rev. Lett.* **78** (1997) 1335.
- [2] T. Bergsten, T. Kobayashi, Y. Sekine, and J. Nitta, *Phys. Rev. Lett.* **97** (2006) 196803.
- [3] Y. Kunihashi, M. Kohda, and J. Nitta, *Phys. Rev. Lett.* **102** (2009) 226601.
- [4] J. D. Koralek, C. P. Weber, J. Orenstein, B. A. Bernevig, Shou-Cheng Zhang, S. Mack, and D. D. Awschalom, *Nature* **458** (2009) 610.