

令和 2 年 6 月 19 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K14113

研究課題名(和文) トポロジカル光波を利用した半導体中スピンの超解像検出と空間分布制御

研究課題名(英文) Super-resolution detection and spatial control of spins in semiconductor using topological lightwaves

研究代表者

石原 淳 (Ishihara, Jun)

東京理科大学・理学部第一部応用物理学科・助教

研究者番号：50801156

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：スピン軌道相互作用を利用した永久スピン旋回状態ではストライプ状のスピンモードが形成される。本研究では空間暗点を持つドーナツビームを利用してそのスピンモードの超解像検出に取り組んだ。また、光励起電子スピンのスピン軌道有効磁場によってコヒーレントに振動する様子を観測し、その振動周期が光励起キャリアの増大とともに長くなることを示した。これより光励起キャリアがスピンの散乱レートに与える影響を定量的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非保存量であるスピンを長時間利用できることから永久スピン旋回状態は注目されている。この時現れるスピンモードを直接観測できる光学的手法を超解像化することで、より正確に永久スピン旋回状態を評価することができるようになる。また、本研究によって明らかになった二次元電子のスピンダイナミクスと光励起キャリア密度に対するスピン拡散係数の変化は半導体中でのスピンの利用や光制御に関する有意な知見となる。

研究成果の概要(英文)：The spin mode is formed by the spin-orbit effective magnetic field in the case of the persistent spin helix state. We studied the super-resolution detection of the spin mode based on time-resolved Kerr rotation microscopy using the doughnut-shaped beam. We also investigated the coherent oscillation of photoexcited electron spins induced only by the spin-orbit field without an external magnetic field, and quantitatively revealed the influence of photoexcited carriers on the spin scattering rate.

研究分野：半導体スピントロニクス

キーワード：電子スピン 二次元電子ガス 半導体量子構造 トポロジカル光波

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

電子の持つ電荷とスピンの自由度を利用するスピントロニクス分野においては、巨大磁気抵抗効果やトンネル磁気抵抗など、すでに実用化された現象がある一方、依然としてスピンを能動的に活用したデバイスを創生するための基礎的な研究が盛んに行われている。非磁性半導体中で非保存量であるスピンを利用するには、スピン生成や操作、長いスピン緩和時間が要求される。伝導電子スピンと軌道運動間に働くスピン軌道相互作用はスピン操作を可能にするが、その異方的な有効磁場がスピン緩和を引き起こす。この諸刃の剣を克服する特異な状態として「永久スピン旋回(PSH: Persistent Spin Helix)」状態が注目を集めている。この永久スピン旋回状態ではスピン緩和が抑制され、スピンの長寿命化とスピン制御の両立が可能となる。永久スピン旋回状態ではスピン空間分布はアップとダウンがストライプ状に配列したスピンモードを形成する。これまでにこのスピンモードが光学的に直接観測され、スピン軌道相互作用の評価[1]、スピンモードの空間制御[2]、スピン長距離輸送が行われている[3]。光学的な直接観測は永久スピン旋回状態を正確に評価できる非常に強力な手法であるが、その一方で、分解能が光の回折限界に制限されるため、強いスピン軌道相互作用が働く(=空間的なスピンモードの周期が短い)材料にもこの強力な測定ツールを適用していくには超解像検出手法の確立が求められる。また、現状考えられている永久スピン旋回状態の利用法は一次元チャンネル内の始点と終点のスピン状態のみを情報として使うものであるが、永久スピン旋回で形成されるストライプ状の特異なスピントクスチャ自体を活かさない手はないと考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、軸対称偏光ビームや光渦ビームといったトポロジカル光波の空間特異性を利用した超解像スピン生成・検出手法を確立し、2種類のスピン軌道相互作用が働く半導体量子井戸中に光励起した電子スピンの空間緩和ダイナミクスを詳細に明らかにすること、また、トポロジカル光波の偏光特異性と位相特異性を利用してスピン空間パターンを制御することを目的とした。

### 3. 研究の方法

試料には、(001)面に成長したGaAs/AlGaAsの単一量子井戸を用いた。本試料は試料表面側に変調ドーピングが施されており、内部電界が増強されるように設計されている。これにより、試料はラシュバとドレッセルハウスの2種類のスピン軌道相互作用が等しい永久スピン旋回状態に近い状態となっている。また、変調ドーピングにより、井戸内の電子移動度は非常に高くなっている。スピンドイナミクスの検出はポンプ・プローブ法を利用した時間分解カー回転測定によって行った。光学遷移選択則を利用して円偏光のポンプ光で電子スピンを励起し、その時間変化はプローブ光のカー回転によって測定した。超解像検出のためのドーナツ光の生成には液晶偏光スパイラルプレートを用いた。

### 4. 研究成果

まずは時間分解カー回転測定系に空間走査機構を追加した。クローズドループの走査ミラーを用いてポンプ光とプローブ光の相対位置を変えることで、スピンの空間分解測定を可能にした。10倍の対物レンズを用いた時のポンプ-プローブのスポットサイズは約2マイクロメートル、走査ミラーによる最小空間走査間隔は約0.4マイクロメートルとなった。この空間分解カー回転測定系を用いて、GaAs量子井戸におけるスピン空間分布を測定した結果を図1に示す。赤色はスピンアップ、青色はスピンダウンに対応しており、永久スピン旋回状態で見られるスピンモードを観測することができた。続いて、軸対称偏光ビームの生成を行った。ポンプ-プローブ測定に用いたパルスレーザーからの光を液晶偏光スパイラルプレートのパターンの中心とスポットの中心が一致するように通した後、集光し、そのビームのプロファイルを計測した。その結果、中心に光強度の暗点を持つドーナツビームを生成できた。直線偏光を偏光スパイラルプレートに入射して変換すると軸対称偏光ビームとなるため、変換したビームに対して偏光子を入れると、光強度の谷を持つビームになる。実際にビームがその形状になることも確認できた。このドーナツビームを第三のパルスとして光学系に導入し、測定対象外の信号源を除去して超解像を得るSTED法を利用してスピン空間分布測定分解能向上を図ったが、結果的に狙ったような高空間分解能は

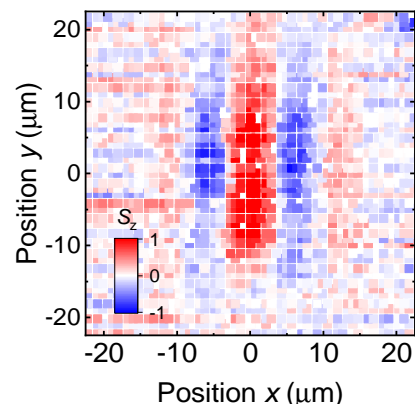


図1 時空間分解カー回転測定によって得られたスピンの空間分布。スピンのアップダウンのストライプ形状を描いている。

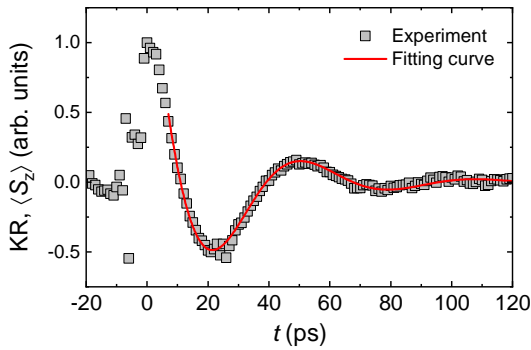


図 2 時間分解カー回転測定によってスピン集団のコヒーレント振動の様子。

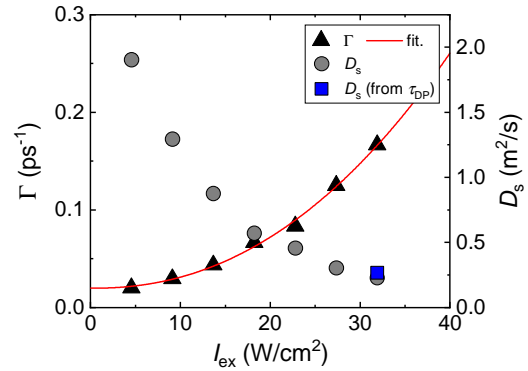


図 3 散乱レートおよびスピン拡散係数の励起密度依存性。

得ることができなかった。その原因として、まず元々の時空間分解測定において十分な SN 比が達成できていないことが挙げられる。測定に用いたバランスレーザの信号ノイズが大きく、これを改善していく必要があることが分かった。もう一つはドーナツビームの光強度が弱かったことが考えられる。今回フェムト秒のパルスレーザ一台からポンプ光、プローブ光とドーナツビームに分けており、また途中に必要なレーザー波長のみを切り出す系を入れている。そのため消光のための十分な光強度を得ることができなかった。今後はドーナツビームに高強度のレーザーを用いて、原理検証を継続していく予定である。

光励起された電子スピンの時空間ダイナミクスを明らかにするという点では、スピン歳差運動長より十分大きな検出光スポットサイズの光学系を用いてゼロ磁場におけるスピン歳差運動を図2のとおり観測した。電子の散乱頻度が小さければ、スピン軌道相互作用による空間的な歳差運動を時間的な歳差運動として考えることができる。この方法ではプローブ光のスポットサイズが大きくてもよいので、超解像とは違った意味で測定分解能の制限を緩くできる。このゼロ磁場歳差運動に永久スピン旋回状態を仮定してフィッティングすることで、スピン軌道相互作用の大きさを評価することができた。また、モンテカルロ法を用いたスピンダイナミクスシミュレーション結果と比較することで、ラシュバとドレッセルハウスのスピン軌道相互作用の大きさを個別に求めることができた。さらに、このゼロ磁場におけるスピンダイナミクスの励起光強度依存性を測定した結果、コヒーレント振動の周期が励起光強度の増加とともに増大することがわかった。つまり、励起光強度によるスピン拡散速度の変調によってスピンアンサンブル状態の変化の速さがコントロールできることを示した。これは光励起キャリアの増大とともにスピンの拡散速度が低下したことが原因と考えられる。実験結果をシミュレーションで再現し、散乱レートとスピン拡散係数の励起密度依存性を求めた結果が図3である。ここで、最も励起密度が小さいときは、スピンの拡散係数と移動度から求まる電子の拡散係数が一致している。この時の励起光強度に対応する光励起キャリア密度は、量子井戸内の二次元電子ガスのキャリア密度の2.5%であった。そこから励起密度を増加させると、散乱レートは励起密度のおよそ二乗に比例して大きくなることが分かった。これまで、光励起スピンの拡散は励起されたキャリアの電子-電子散乱によって移動度から求まる電子の拡散係数から低下するため、正確にスピン軌道相互作用を評価するためにはスピンの拡散係数を個別に求める必要があったが、今回の結果によって励起キャリア密度によるスピン拡散係数の変化を定量的に明らかにできた。

#### 参考文献

- [1] M. P. Walser, C. Reichl, W. Wegscheider, and G. Salis, Nat. Phys. 8, 757 (2012).
- [2] J. Ishihara, Y. Ohno, and H. Ohno, Appl. Phys. Express 7, 013001 (2014).
- [3] Y. Kunihashi, H. Sanada, H. Gotoh, K. Onomitsu, M. Kohda, J. Nitta, and T. Sogawa, Nat. Commun. 7, 10722 (2016).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ishihara Jun, Kitazawa Go, Furusho Yuya, Ohno Yuzo, Ohno Hideo, Miyajima Kensuke	4. 巻 101
2. 論文標題 Zero-field spin precession dynamics of high-mobility two-dimensional electron gas in persistent spin helix regime	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 94438
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevB.101.094438">https://doi.org/10.1103/PhysRevB.101.094438</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 北澤豪, 石原淳, 宮島顕祐, 大野裕三, 大野英男
2. 発表標題 GaAs/AlGaAs量子井戸における高移動度二次元電子スピンのゼロ磁場歳差運動ダイナミクスの空間依存性
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Ishihara, G. Kitazawa, Y. Ohno, H. Ohno, and K. Miyajima
2. 発表標題 Excitation density dependence of spin precession in zero external magnetic field in (001) GaAs/AlGaAs two-dimensional electron gas
3. 学会等名 10th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology (SPINTECH10) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 G. Kitazawa, K. Miyajima, and J. Ishihara
2. 発表標題 Excitation density dependence of zero-field spin precession of high mobility two-dimensional electrons in (001) GaAs/AlGaAs quantum well
3. 学会等名 第23回半導体スピン工学の基礎と応用(PASPS-23)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 北澤豪, 古庄裕也, 宮島顕祐, 大野裕三, 大野英男, 石原淳
2. 発表標題 GaAs/AlGaAs量子井戸における高移動度二次元電子スピンのゼロ磁場歳差運動の励起密度依存性
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----