

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14528

研究課題名（和文）軌道運動を利用した半導体中スピンの全光操作

研究課題名（英文）All-optical manipulation of spins in semiconductors using orbital motion

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・講師

研究者番号：50801156

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：化合物半導体量子構造では2つのスピン軌道相互作用のバランスによって光励起スピンはさまざまな空間構造をとる。バンド間吸収の起きないCWレーザー光を制御光としてGaAs/AlGaAs単一量子井戸に照射した結果、ラッシュバースピン軌道相互作用が増加し、スピン空間分布が変調されることが分かった。また、軌道角運動量に起因して方位角依存の偏光周期構造を持つベクトル光渦でスピンを励起すると、円周上にスピン状態が周期的に繰り返される空間構造が生成されることを観測した。スピン空間構造のひねりの数がベクトル光渦のトポロジカル数によって決まる数と同じことから、偏光周期構造がスピン構造として移されることが実証された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非磁性体中では非保存量である電子スピンのみならず、2つの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長寿命状態になる。この時、スピン状態はストライプ状の特異なスピントクスチャを描く。本研究で示したスピントクスチャの光制御やベクトル光渦を用いたスピントクスチャの直接励起は、スピン空間構造の生成、検出、制御の全てを光という共通ツールで実現可能にする。これらは光通信分野で発展した空間分割多重といった技術と同様にスピン空間情報を固体中で用いるために重要な知見となる。

研究成果の概要（英文）：In compound semiconductor quantum structures, the spins exhibit various spatial structures depending on the balance between two types of spin-orbit interactions. We reveal that irradiating CW laser, which does not cause interband absorption, to GaAs/AlGaAs single quantum well enhances the spin-orbit interaction of the Rashba and modulates the spatial distribution of spins. Furthermore, we demonstrate that a vector vortex beam with azimuthal angle dependence of polarization arising from orbital angular momentum, directly excites a spatial spin pattern in which spin states are repeated in a circle. The number of rotations of the periodic spin structure reflects the topological number associated with the vector optical vortex, providing evidence that the helicity structure is imprinted on the spin structure.

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 スピン軌道相互作用 スピントクスチャ ベクトル光渦

1. 研究開始当初の背景

光の偏光とスピン自由度の相関を表す光学遷移選択則を利用すれば半導体中に 100%スピン偏極した電子を生成できる。またスピン状態を磁気光学効果によって検出する手法も確立されている。このように半導体におけるスピン状態は光と相性の良い有用な情報担体であるが、スピンは非磁性半導体中で非保存量であり、スピン状態の利用にはこれら確立された技術に加えて、長いスピン寿命とスピンの精密な操作技術が必要となる。スピンを局所的に操作するには伝導電子スピンと軌道運動間に働くスピン軌道有効磁場を用いる方法が根幹技術として有力である。運動する電子はスピン軌道相互作用によりその波数ベクトルに依存した有効磁場を受けるためスピン状態をコントロールすることができる。しかしながら、波数ベクトルに依存する有効磁場は電子の運動方向の変化によって容易にスピン緩和を引き起こす[1]。近年、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)」状態が実証され[2, 3]、スピンの長寿命化とスピン制御の両立が可能となった。この一軸性となるスピン軌道有効磁場を利用することで、スピン状態は運動方向を変えるような散乱に対してはロバストとなり、空間的に緩和せず、空間スピンパターンを形成する[4]。このようにスピン寿命の長寿命化が可能になったことで非磁性半導体中でのスピン利用の期待が高まっている。一方でスピン操作にスピン軌道有効磁場を使う以上、スピン状態を任意にコントロールするには結局のところ電子スピンの運動経路の精密制御が必要となる。

2. 研究の目的

軌道角運動量を持つラゲールガウス光に着目し、光によるキャリアスピンの経路制御を実現するとともに、光を利用した新しいスピン操作法を実証する。本研究によって、スピン生成、検出、操作のスケールギャップを埋めることができるだけでなく、光と電子の持つスピン状態の相互情報交換に、光によるスピン操作を付加することができ、デバイス要素技術のすべてを「光」という共通ツールで実現できるようになる。

3. 研究の方法

用いた試料は、永久スピン旋回状態が発現する(001)面に成長された GaAs/AlGaAs 単一量子井戸である。片側変調ドープによって量子井戸表面側に大きなポテンシャル勾配が発生する。これにより、ラシュバスピン軌道相互作用を増強し、結晶反転非対称に起因するドレッシェルハウススピン軌道相互作用と釣り合った、永久スピン旋回状態に近づけている。電子スピンダイナミクスの観測はポンプ・プローブ法を利用した時間-空間分解磁気光学カー回転測定によって行った。円偏光のポンプ光で電子スピンを励起し、スピン状態はプローブ光の磁気光学カー効果によって検出した。また、ボルテックス半波長板や、可変の液晶偏光スパイラルプレートを用いることで、軌道角運動量を持つレーザー光(光渦、ベクトル光渦)を生成した。

4. 研究成果

まず、構築した時間-空間分解磁気光学カー回転測定系に制御用のレーザー光路を追加し、制御光を照射したときのスピンの時空間ダイナミクスを調べた。制御光にはバンド間吸収の起きない 980 nm の CW レーザー光を用いた。図 1(a)は制御光非照射時のスピン空間分布であり、図 1(b)は制御光照射時のスピン分布である。図 1(a)の永久スピン旋回状態におけるスピンパターンはストライプ状にスピンが並んだ状態になる。これは、空間原点に励起されたスピンが拡散とともに SU(2)対称性を持つ一軸性のスピン軌道相互作用による有効磁場を受け、 x 方向には歳差運動し、 y 方向には状態が保持されたためである。一方で、図 1(b)の制御光照射時のスピンパターンは楕円状にスピンが配列した分布となっている。これはスピン分布を決めるスピン軌道有効磁場が変調されたことを直接的に示す結果である。外部磁場を印加しながらスピン空間分布の時間発展を測定することで、スピン軌道相互作用パラメータの変調量を定量すると、光照射によりラシュバパラメータが 28%増加することが分かった。また、発光励起スペクトルと発光スペクトルのエネルギーシフト量が光強度の増大に伴い

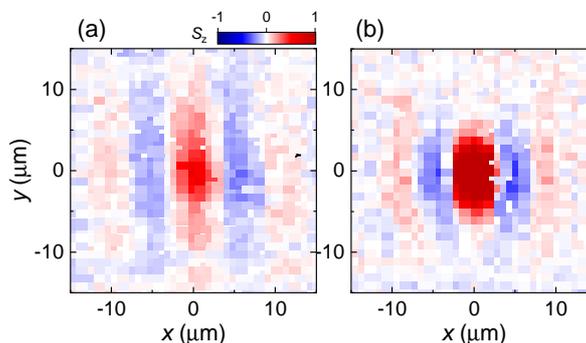


図 1 (a)制御光非照射時のスピン分布, (b)制御光照射時のスピン分布. 赤色はスピンアップ、青色はスピンダウンを示す。

大きくなることも判明しており、光照射によって量子井戸内のキャリアが増加している。今回用いた制御光はバンド間遷移によってキャリアを光励起することはないため、これはドープ層に残存するキャリアが井戸内に流入したことが原因と考えられる。つまり、今回観測されたスピン空間分布の変化は、制御光照射に伴い量子井戸の非対称性が増大したことでラシュバスピン軌道相互作用が変調されたことに起因すると考えられる。光強度によってこの変調量を制御できれば光によるスピン状態の操作が可能になる。

また、光によるスピントクスチャの生成を目的にラゲールガウシアンビームの一種であるベクトル光渦を使ってスピン空間構造の直接励起を行った。ベクトル光渦は軌道角運動量に起因した方位角依存の偏光空間分布を持つため、それを励起光に用いることで、固体中に空間周期構造を持ったスピン状態を生成できると考えられる。均一な偏光分布を持つ基本のガウシアンビームを光学軸が方位角に依存して 180 度変化するポルテックス半波長板に通すことで、アジマス偏光を生成し、その後 1/4 波長板を通すことで、ベクトル光渦を生成した。通常円偏光ガウシアンビームを用いて偏光-スピン変換を行うと図 2(a)に示すように一方向に揃ったスピン状態が光励起された一方、偏光が円周上で繰り返されるベクトル光渦を用いてスピン光励起を行うと、図 2(b)と(c)のように円周上にスピン状態が周期的に繰り返されるスピンの空間構造が観測された。スピン空間構造の回転レートはベクトル光渦のトポロジカル数 l に比例し、実際に $l=1$ と $l=2$ のベクトル光渦によって励起されたスピン空間構造はそれぞれ 2 回対称と 4 回対称となった。これはベクトル光渦の偏光周期構造がスピン分布に移されたことを意味している。ベクトル光渦のトポロジカル数は任意の整数を取ることができ、トポロジカル数を増やすことによってスピン情報を高密度化することが可能になると期待される。ここで、用いた試料の永久スピン旋回状態のスピン軌道相互作用有効磁場は、固体中のスピン空間構造のフィルタリング効果を示す。永久スピン旋回状態では図 2(a)のように一方向にそろって励起されたスピンが一軸性の有効磁場によって、図 1(a)のようなストライプパターンに時空間発展する。ベクトル光渦で励起した場合においても、この有効磁場を受けるため、スピンパターンは時間発展する。図 3(a)は面内で 45 度回転させた $l=1$ のベクトル光渦を用いて励起したスピンパターンである。ここで、 x 方向に沿ったスピン状態の空間周期を永久スピン旋回状態において形成されるストライプ周期に合わせている。この場合、 y が正の領域では元々のスピンドアウンからスピニアップへのパターンに揃ってスピンストライプが生成され、 y が負の領域ではスピニアップからスピンドアウンのパターンに揃ってスピンストライプが生成される。そのため時間発展により、位相の反転したスピン波空間構造を同時に形成することができた。このように励起スピンパターンの直接生成と固体中のスピン軌道有効磁場を組み合わせることで、任意のスピン空間構造の制御が実現できる可能性があり、光を用いてスピン空間構造を情報担体として活用する上で基盤要素になり得ると期待される。

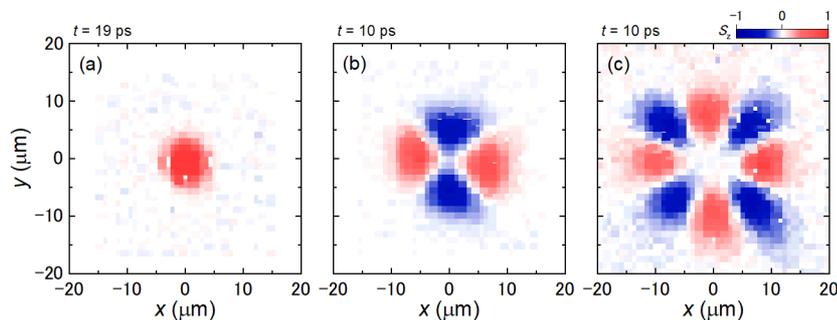


図 2 (a)ガウシアンビームによる円偏光スピン励起, (b) $l=1$ のベクトル光渦によるスピン励起, (c) $l=2$ のベクトル光渦によるスピン励起. [5]

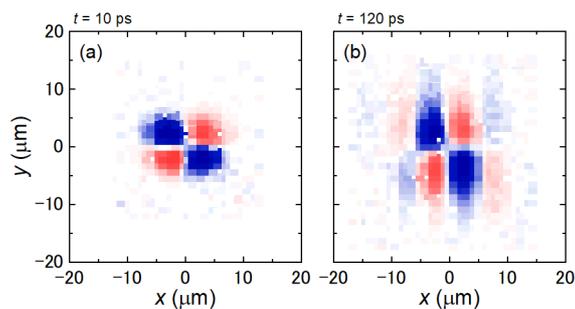


図 3 (a) 45 度回転させた励起スピンパターン, (b)PSH 場の存在下での時間発展後のスピンパターン. [5]

- [1] M. I. D'yakonov and V. I. Perel, Sov. Phys. JETP **33**, 1053 (1971).
- [2] J. Schliemann and D. Loss, Phys. Rev. B **68**, 165311 (2003).
- [3] B. A. Bernevig, J. Orenstein, and S.-C. Zhang, Phys. Rev. Lett. **97**, 236601 (2006).
- [4] M. P. Walser, C. Reichl, W. Wegscheider, and G. Salis, Nat. Phys. **8**, 757 (2012).
- [5] J. Ishihara, T. Mori, T. Suzuki, S. Sato, K. Morita, M. Kohda, Y. Ohno, and K. Miyajima, Phys. Rev. Lett **130**, 126701 (2023).

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, Mori Takachika, Suzuki Takuya, Sato Sota, Morita Ken, Kohda Makoto, Ohno Yuzo, Miyajima Kensuke	4. 巻 130
2. 論文標題 Imprinting Spatial Helicity Structure of Vector Vortex Beam on Spin Texture in Semiconductors	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 126701
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.130.126701	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5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 T. Mori, J. Ishihara, R. Tokimitsu, Y. Ohno, and K. Miyajima
2. 発表標題 Spin diffusion coefficient dependence of time evolution of persistent spin helix modes in (001) GaAs/AlGaAs quantum well
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Tokimitsu, J. Ishihara, J. Kitagawa, M. Prager, D. Iizasa, T. Mori, K. Miyajima, S. Karube, C. Zhang, M. Kammermeier, D. Schuh, D. Bougeard, J. Nitta, and M. Kohda
2. 発表標題 Persistent spin helix state in a (113) quantum well: Direct imaging of spatiotemporal spin evolution in (113) GaAs/AlGaAs quantum well
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森貴親, 石原淳, 時光遼, 大野裕三, 宮島顕祐
2. 発表標題 (001)GaAs/AlGaAs量子井戸におけるスピン拡散係数とヘリカルスピン寿命の光励起スピン密度依存性
3. 学会等名 第33回光物性研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 時光遼, 鈴木拓也, 森貴親, 石原淳, 大野 裕三, 宮島 顕祐
2. 発表標題 (001)GaAs/AlGaAs量子井戸における電子スピン空間分布の光制御
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 森貴親, 鈴木拓也, 石原淳, 好田誠, 大野裕三, 大野英男, 宮島顕祐,
2. 発表標題 軸対称偏光を利用したスピン偏極の円状パターン励起とスピン分布の時間発展の観測
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関