

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656003

研究課題名(和文) GaAs/AlGaAs 量子細線構造におけるスピン永久巡回状態の形成とスピン輸送

研究課題名(英文) Formation and transport of persistent spin helix state in GaAs/AlGaAs quantum wires

研究代表者

大野 裕三 (Ohno, Yuzo)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号：00282012

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000 円、(間接経費) 840,000 円

研究成果の概要(和文)：スピン軌道相互作用(SOI)はスピントロニクスにおいて非常に重要な働きをする。なぜなら、SOIによる有効磁界によってスピンを操作したり、またスピン緩和の原因となるからである。本研究では、時間分解カー回転測定法を用いて、Rashba SOIとDresselhaus SOIがきわめて近い変調ドープGaAs/AlGaAs量子井戸を用い、幅1～10ミクロン幅に加工した細線構造におけるスピンアンサンブルのダイナミクスを調べた。また、時空間分解カー回転顕微鏡を構築し、ゲート付きGaAs/AlGaAs量子井戸において永久スピン巡回状態を実証した。

研究成果の概要(英文)：Spin-orbit interaction (SOI) plays important roles in the field of spintronics because the SOI field enables for spin manipulation and causes spin relaxation. In this study, using time-resolved Kerr rotation measurement, we investigate ensemble spin dynamics in wires made from a modulation-doped AlGaAs/GaAs QW in which both Dresselhaus and Rashba SOIs coexist. In addition, we perform the time- and spatially-resolved Kerr rotation measurement to observe the spatiotemporal evolution of photoexcited spins, and demonstrated gate-controlled spin distribution of a two-dimensional electron gas with a top gate electrode.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎

キーワード：スピントロニクス 永久スピン巡回状態 顕微カー回転測定 GaAs スピン緩和

1. 研究開始当初の背景

半導体スピントロニクスは、非磁性の半導体中の電子スピンを情報キャリアとして利用することから、高速・低消費電力デバイスの基盤技術として研究が盛んに進められている。電氣的あるいは光学的に生成されたスピンは、スピン・軌道相互作用の影響を受け、内部有効磁場の回りを歳差運動しながら散乱を繰り返し、初期のスピン情報は失われる。GaAs などのヘテロ構造におけるスピン・軌道相互作用には大きく分けて2つの原因がある。すなわち、バルクの反転非対称性に起因する Dresselhaus 項と、ヘテロ構造の非対称性に起因する Rashba 項である。通常、これらの大きさは等しくないため、散乱により電子の波数が変化すると、有効磁場の大きさ・方向が変化してしまう。一方、これらの大きさが等しい時、有効磁場の方向は電子の波数によらず一方方向になる。さらに、ある経路を考えたとき、一定距離を移動した後は散乱等を受けたとしても有効磁場まわりの歳差運動の位相は経路によらず一定になるので、初期スピン状態を伝送することができる。このような2次元電子系はスピン永久巡回状態(Spin Helix)とよばれ、理論提案されあと近年実験的にその存在が示されつつある。スピン永久巡回状態は半導体中でスピンを輸送する際にスピン状態が保持されることから、スピントランジスタなどさまざまなデバイス応用への観点からも注目されている。

2. 研究の目的

本研究では、まず(1)変調ドーピング高純度 GaAs/AlGaAs 量子井戸構造を作製し、ドーピング濃度やキャリア濃度、井戸幅等を適切に制御することによりスピン永久巡回状態の条件を満たす高移動度2次元電子ガスを形成する。(2)その量子井戸構造を量子細線加工することにより、特定の有効磁場のみを有する擬1次元電子状態を有する量子細線チャンネルを作製する。(3)各方位での有効磁場の大きさを光学的手法で確認するとともに、量子細線ネットワークを作製し長距離のスピン輸送を実証する。

3. 研究の方法

平成24年度は、数値計算によるバンド構造の設計と、分子線エピタキシによる GaAs/AlGaAs 量子井戸構造の成膜、および量子細線構造におけるスピン緩和の異方性を調べ、スピン永久巡回状態を実現する GaAs/AlGaAs 量子井戸構造と高移動度2次元電子ガスを實現する。スピン永久巡回状態は、図1右に示すように、Dresselhaus 項と Rashba 項がちょうど等しくなったときに現れる状態である。GaAs/AlGaAs 系量子井戸の場合、一般に Dresselhaus の方が支配的となるが、ドーピング方法やキャ

リア密度を調整することにより、図1右の状態に近づけることができる。これを確認するために、方位の異なる量子細線を電子線リソグラフィによるパターンニングとドライエッチングによる異方性エッチングにより形成し、既存の時間分解カー回転測定法を用いてスピン緩和時間をしらべその異方性から有効磁場の大きさを見積もる。また、移動度を高くして運動量緩和時間を長くすることにより、ゼロ磁場での有効磁場による際差運動を直接観測し、有効磁場の大きさを計測する。これらの実験を通して好適な GaAs/AlGaAs 量子井戸構造のパラメータを決定する。

25年度以降は、2焦点の顕微鏡回転測定システムを構築し、ポンププローブ法によってスピン輸送を検出する。単焦点の顕微鏡回転測定システムはすでに整備されている(図2)。これを改良することにより、スピンを励起するポンプ光とスピンを検出するプローブ光を図3のように試料に照射し、スピン輸送のダイナミクスを観測する。プローブ光の光路を固定し、カー回転角を測定できるようにした状態で、ポンプ光の位置を走査する。

試料には直線状および枝分けした細線ネットワーク回路を形成し、スピンを輸送したときの位相をポンプ光とプローブ光の距離の関数として測定する。

スピン永久巡回状態が実現されていれば、ポンプ光からの平行移動距離によってスピンの回転角は決定するので一定であるはずである。

本研究ではこれを実証するとともに、チャンネル上にゲート電極を形成してスピン操作の検証も行う。

4. 研究成果

4-1 GaAs/AlGaAs 量子構造の作製とスピンの光学的検出法

試料は分子線エピタキシ法を用いて(001)面に成長した、20 nm 井戸幅の片側変調ドーピング GaAs/AlGaAs 単一量子井戸である。常に働く Dresselhaus SOI に Rashba SOI の大きさを近づけるため、片側の障壁層のみに変調ドーピングを行い、量子構造が非対称になるように設計した。これにより井戸内の電界を大きくすることができ、Rashba SOI を増強することができる。

スピンドイナミクスの測定には時間分解 Kerr 回転(Time-resolved Kerr rotation: TRKR)測定法を用いた。円偏光のポンプ光を用いることで、試料面直方向にスピンを生成し、その時間変化をプローブ光の極 Kerr 効果によって観測した。ここでポンプ光とプローブ光の相関時間 Δt は機械的ディレイラインにより作ることができるため、それを変化させながら測定することでスピンのダイナミクスが観測できる。

4-2 擬一次元細線における電子スピンアンサンプルダイナミクスの制御

PSH 状態では有効磁場が完全にキャンセルされる方向が存在するため細線構造を作製することによってその方向に運動方向を限定することができれば、スピン緩和が大きく抑制されると考えられる。そこで成長した量子井戸を電子ビーム描画及びウェットエッチングにより 1 μm 幅の 4 方向の細線構造([100], [110], [010], [$\bar{1}$ 10])に加工し、細線中におけるスピンアンサンプルダイナミクスをポンプ光とプローブ光のスポット径が 30 μm 程度の TRKR 光学系で測定した。TRKR 信号の細線方向依存性を図 1(a)に示す。図 1(a)より、[110]におけるスピンアンサンプル緩和が他の細線と比べて大きく抑制されていることがわかる。指数減衰関数によってフィッティングを行なった結果、このとき[110]細線におけるスピンアンサンプル緩和時間は 1.2 ns となり、一番短い[$\bar{1}$ 10]細線の 30 ps と比べて 40 倍程度延長された。これは本構造が、PSH 状態に近いことを示唆している。Dresselhaus SOI と Rashba SOI の大きさがほぼ等しいため、[110]細線ではスピン緩和の原因となる SOI 有効磁場がほぼキャンセルされスピン緩和が抑制される。一方、[$\bar{1}$ 10]細線ではその有効磁場が大きくなるため、スピン面直方向のアンサンプル平均は急激にゼロに近づく。

図 1(b)は[110]細線におけるスピン緩和の細線幅依存性である。スピン緩和の様子が細線幅にも大きく依存していることがわかる。特に 7 μm 幅の細線においては、明瞭に 2 つの減衰成分が観測されている。有効磁場がキャンセルされる方向の[110]細線においても、細線幅が広がると、細線の幅方向に電子スピンの運動できるため、強め合った SOI 有効磁場を受けて、

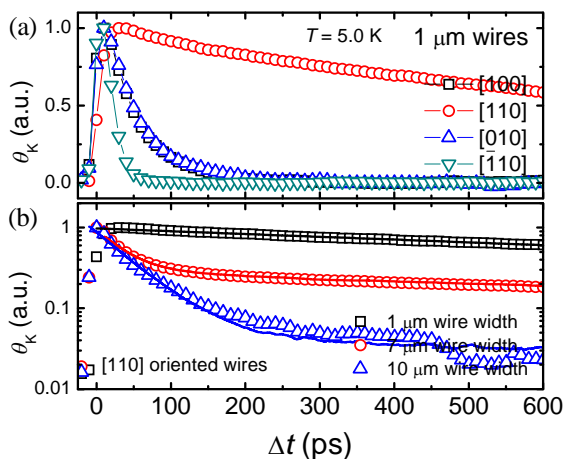


図 1 (a)各方向の細線における TRKR 信号の測定結果。(b)[110]細線における TRKR 信号の細線幅依存性。シンボルは測定結果、実線はモンテカルロ計算結果。

細線幅方向に歳差運動する。その細線幅がスピンの一回転する距離、歳差運動長、よりわずかに短い場合は拡散とともにスピンの幅方向に歳差運動するため、スピン面直成分のアンサンプル平均は急激に減少するが、その後は空間的なスピン状態を保つため、信号の減衰が抑制される。

続いて、SOI 有効磁場と運動量散乱を考慮したモンテカルロ(MC)シミュレーションを行なうことで、電子スピンアンサンプルダイナミクスを計算し、擬一次元細線におけるスピンダイナミクス測定結果を解析した。ここでは時間 0 で面直方向に生成されたスピンの運動を、

$$\frac{d\mathbf{S}}{dt} = \frac{g\mu_B}{\hbar} (\mathbf{B}_{\text{DSO}} + \mathbf{B}_{\text{RSO}}) \times \mathbf{S} \quad (3)$$

の運動方程式に従うとして計算した。このとき、ある時間 τ で散乱が起き、また、細線壁面では鏡面反射をずとして計算した。Rashba パラメータはバンドプロファイルと電子の波動関数から計算した結果である $\alpha = 2.2 \times 10^{-11}$ eVcm を用い、Dresselhaus パラメータを変化させながら実験と同様に面直成分のスピンアンサンプル平均の時間変化を計算した結果、図 3(b)の実線のように細線中のスピンアンサンプルの実験結果をある SOI パラメータで再現することができた。そのときの Dresselhaus パラメータは $\beta_1 = 1.7$, $\beta_3 = 0.45 \times 10^{-11}$ eVcm と求めることができた。歳差運動長は $\lambda_{\text{SO}} = \pi \hbar^2 m^{-1} (\alpha + \beta_1 - \beta_3)^{-1} \sim 10 \mu\text{m}$ となり、10 μm 幅の細線において、電子スピンアンサンプルが急激に 0 に近づく実験結果の傾向と一致した。

4-3 スピンの時空間ダイナミクスの光検出と制御

前章ではスポット径が 30 μm 程度と、歳差運動長より十分に大きい状態で電子スピンのアンサンプル平均のダイナミクスを観測した。ここでは、スポット径が歳差運動長より十分小さい走

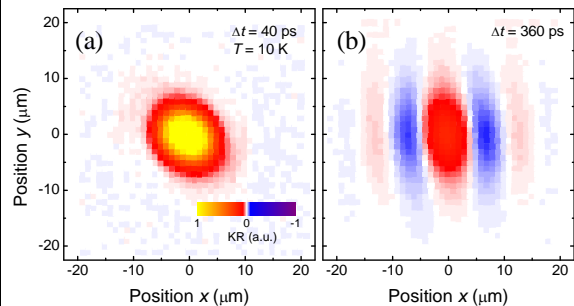


図 2 走査型 TRKR 測定系を利用した、スピンの時空間ダイナミクスの測定結果。(a)スピン励起後 40 ps, (b)スピン励起後 360 ps.

査型 TRKR 測定系を構築することで、スピンの時空間発展を観測した。

対物レンズを使用し、プローブ光のスポット径を $\phi_{\text{FWHM}} \sim 1.5 \mu\text{m}$ 程度まで絞り、さらにプローブ光の光学系を2軸のピエゾスキャナ上に構築することで、試料面内のプローブ光走査を可能にした。また、ポンプ光は試料に対して45度の角度で入射しており、スポット径は $6 \mu\text{m}$ 程度である。

前節と同一構造の試料において、二次元電子のspin空間分布の時間変化を測定した結果を図2に示す。 $x//[1\bar{1}0]$, $y//[110]$ であり、その位置におけるKR信号をカラーマップで示している。図2(a)はspinを励起してから40 ps後、図2(b)は360 ps後のspin空間分布測定結果である。 $(x, y) = (0, 0)$ を中心にポンプ光のスポット径の広がりを持って励起された電子spinは、直後にはそのspin状態を同一方向(アップ)に保っている($\Delta t = 40$ ps)。その後、時間とともに電子spinは拡散するが、運動方向に依存してspinの状態が変化しており、励起後十分に拡散した場合のspin空間分布の測定結果($\Delta t = 360$ ps)からもはっきりとわかるように、励起された電子spinは x 方向に運動するときには空間的に歳差運動するが、 y 方向には励起spin状態を保っている。すなわち、 x 方向に運動する電子spinが受ける有効磁場はDresselhausとRashba SOIの足し合わせになるため大きくなり、一方で、 y 方向に運動する電子spinが受ける有効磁場は2つのSOIがキャンセルされるためほぼゼロになっている、ということである。つまり、図2(b)に見られるこのspinアップダウンの空間的なストライプパターンは本試料が

DresselhausとRashba SOIの強さが等しいspin永久旋回(PSH)に近い状態であることを直接的に観測できたことを意味している。また、磁場印加時のspin空間分布の時間変化から、SOIパラメータを実験的に求めることができ、本構造では $\alpha = 1.7 \times 10^{-11}$, $\beta_1 - \beta_3 = 1.2 \times 10^{-11}$ eVcmとなることがわかった。

Rashba SOIは量子井戸内の有効電場によって大きさが変わるため、ゲート電極を設けることで、電圧によって外部制御が可能となる。SOIの大きさが変化すればspinの空間分布も変化するはずであるが、上記実験ではspin空間分布の変化は観測できない。そこで次に、ゲート電極を設けたGaAs/AlGaAs量子井戸を用い、二次元電子spinの時空間ダイナミクスを測定することで、ゲート電圧によるspin空間分布の制御を直接観測した。ここで用いた試料はGaAs/AlGaAs量子井戸上に半透明ショットキー電極としてAuを8 nm蒸着したものである。異なるゲート電圧においてspin空間分布 $S_z(x, y)$ を測定した結果を図3に示す。全てのゲート電圧において空間的なspinのアップダウンのストライプパターンが観測されており、そのパターンはゲート電圧 V_g の大きさによって変化している。特にspinのアップダウンの周期はSOIの大きさによって決まるが、 V_g によってその周期が変化しており、SOIの制御とspin空間分布の制御を直接的に観測することができた。また、図5下段は x 方向のspin空間分布の時間発展 $S_z(x, \Delta t)$ の測定結果であり、各ゲート電圧において、spinが時間的にどのように拡散と歳差運動を行なうかを示している。図よりゲート電圧によって歳差運動長 λ_{SO} が変化しているだけでな

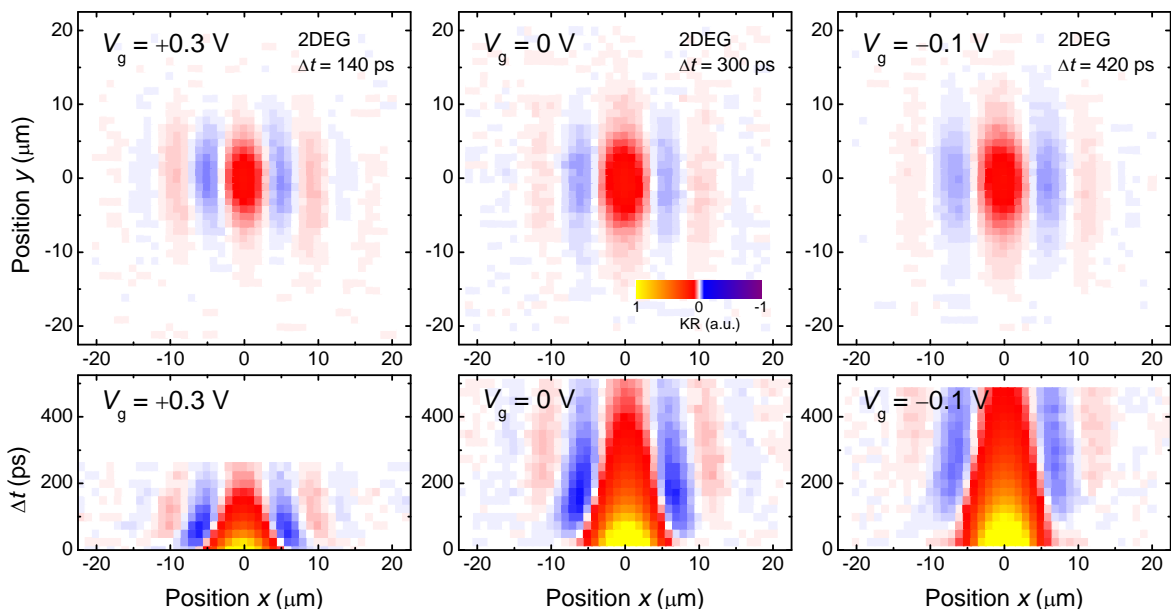


図3 ゲート電圧 $V_g = 0.3, 0, -0.1$ Vにおける拡散後のspin空間分布(上段)と x 方向($//[1\bar{1}0]$)のspin空間分布の時間変化(下段)。

く、スピンスライブパターン形成までの時間も変化していることがわかる。これは負バイアスによるキャリア密度の減少により、移動度、拡散の速度が低下するためであると考えられる。また、磁場印加時のスピン空間分布の時間変化から、 $V_g = -0.2$ V において $\alpha = \beta_1 - \beta_3$ となる条件を見出し、PSH 状態を得ると同時に、SOI パラメータ α と $\beta_1 - \beta_3$ のゲート電圧依存性を得ることに成功した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 10 件)

Jun Ishihara, Yuzo Ohno, and Hideo Ohno, "Direct mapping of photoexcited local spins in a modulation-doped GaAs/AlGaAs wires", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 53, 04EM04 (3 pages), March 2014. doi:10.7567/JJAP.53.04EM04 (査読あり)

Jun Ishihara, Yuzo Ohno, and Hideo Ohno, "Direct imaging of gate-controlled persistent spin helix state in a modulation-doped GaAs/AlGaAs quantum well", Applied Physics Express, Vol. 7, 013001 (4 pages), January 2014. doi:10.7567/JJAP.53.04EM04 (査読あり)

J. Ishihara, M. Ono, Y. Ohno, and H. Ohno, "A strong anisotropy of spin dephasing time of quasi-one dimensional electron gas in modulation-doped GaAs/AlGaAs wires", Applied Physics Letters, Vol. 102, 212402 (4 pages), May 2013. doi: 10.1063/1.4807171 (査読あり)

[学会発表](計 12 件)

J. Ishihara, Y. Ohno, and H. Ohno, "Mapping of photoexcited local spins in a modulation-doped GaAs/AlGaAs wires", 2013 International Conference on the Solid State Devices and Materials (SSDM2013), M-4-2, Hilton Fukuoka Sea Hawk, Fukuoka, Japan, September 24-27, 2013.

J. Ishihara, Y. Ohno, and H. Ohno, "Wire width dependence of suppressed spin dephasing in modulation-doped GaAs/AlGaAs wires", 7th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology

(SPINTECH7), C-07, Chicago, USA, July 29-August 2, 2013.

石原 淳, 大野 裕三, 大野 英男, "変調ドーブ(001)GaAs/AlGaAs 細線における電子スピンダイナミクスの細線幅依存性", 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 28p-A8-1, 神奈川工科大学, 2013 年 3 月 27-30 日.

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.bk.tsukuba.ac.jp/~oono/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

大野 裕三 (OHNO, Yuzo)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号: 00282012

(2)研究分担者

山ノ内 路彦 (YAMANOUCHI, Michihiko)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号: 40590899