

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24684019

研究課題名(和文)半導体ナノ構造における電気的スピン流生成とその制御

研究課題名(英文)Electrical spin generation and its manipulation in semiconductor nanostructures

研究代表者

好田 誠 (Kohda, Makoto)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00420000

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 22,000,000円

研究成果の概要(和文)：スピン軌道相互作用の強いInGaAs半導体量子井戸を用いて、量子ポイントコンタクトと呼ばれる1次元チャネル構造を作製し、スピン偏極電流の生成を試みた。サイドゲートによる横方向閉じ込め効果を用いることで、電子に対し1次元的な閉じ込め効果に加え有効磁場の空間変調を与えることが可能となる。これにより、電子スピンに対しスピン依存力が加わり上向きスピンと下向きスピンを空間的に分離することが可能となることを実験及び理論により示した。伝導度 $0.5(2e/h)$ にプラトーが観測され、また外部磁場との競合によりスピン偏極方向およびショットノイズ測定からスピン偏極率を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We demonstrated electrical spin injection with InGaAs based quantum point contact which holds strong spin orbit interaction. By applying side gates in the quantum point contact, we can induce not only one dimensional channel for electrons but also spatial change of effective magnetic fields induced by spin orbit interaction. This acts to spin dependent force for electron spin resulting in the spatial separation of up spin and down spin. We observed  $0.5(2e/h)$  conductance plateau and, by applying external magnetic fields, we confirmed the spin polarized direction and spin polarization.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：半導体スピントロニクス スピン軌道相互作用 InGaAs 量子ポイントコンタクト スピン生成

### 1. 研究開始当初の背景

半導体ナノ構造では、電子数の精密制御が可能となるため、電子の電荷のみならずスピンの電気伝導に大きな寄与を示す。この電子スピンの精密制御により、スピン機能素子や量子コンピューティングの実現が期待されていることから、半導体ナノ構造においてスピン偏極生成を行うことは、スピン物性理解のみならずデバイス応用上も重要な基盤技術となる。このような背景から、ナノ構造を用いたスピン偏極生成に関する研究は盛んに行われている。

半導体2次元電子ガスの一部を、ゲート電界により空乏させたり、エッチングすることで、伝導する電子を1次元的に閉じ込めた、細線構造を作り出すことができる。この構造は、量子ポイントコンタクトと呼ばれ、閉じ込め効果に起因し、伝導度が $(2e^2/h)$ の整数倍に離散化される。離散化した伝導チャンネルでは、上向きスピンと下向きスピンのエネルギーは等しく、通常流れる電流にスピン偏極は生じない。ところが、1996年に最低伝導度である $1 \times (2e^2/h)$ 以下の $0.7 \times (2e^2/h)$ にも量子化準位が観測された。これは、縮退しているはずのスピンサブバンドが分裂している可能性を示し、実験・理論両面から精力的に研究されている。スピン偏極の起源についても様々な理論および実験結果が示されているのが現状である。

### 2. 研究の目的

これまで研究代表者は、InGaAsP/InGaAsヘテロ構造におけるラシュバスピン軌道相互作用を精密設計を行い、極めて大きな値のスピン軌道相互作用を実現してきた(M. Kohda *et al.*, Phys. Rev. B **81**, 115118 (2010))。スピン軌道相互作用は電子スピンに対し有効磁場として作用するため、スピンを揃える効果が期待できる。得られたラシュバスピン軌道相互作用( $=1 \times 10^{-11} \text{eVm}$ )により、 $B=15\text{T}$ 以上の強い有効磁場を電子スピンに作用させることができる。よって、InGaAsP/InGaAs2次元電子ガスを用いてナノ構造を形成すれば、外部磁場ゼロでスピン偏極が可能ではないかと考えられる。

そこで本研究では、半導体ナノ構造を用いて、磁場や強磁性体、偏光を全く必要としない、半導体のみによる電气的スピン偏極生成を実現することを目的とした。量子ポイントコンタクトと呼ばれる1次元ナノ細線構造と、電子に対し有効磁場として働くスピン軌道相互作用を組み合わせるアイデアにより、電子スピンを有効磁場方向に揃えさせ、高いスピン偏極率を有するスピン流の生成を試みる。

### 3. 研究の方法

InGaAs量子ポイントコンタクトを用いたスピン偏極生成を実現するには、スピン軌道相互作用のゲート電界制御、および量子ポ

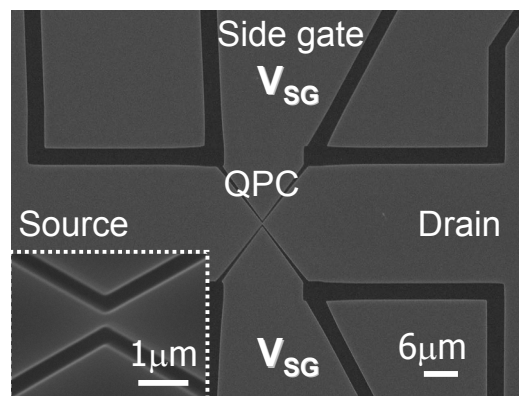


図1. InGaAs量子ポイントコンタクトのSEM写真

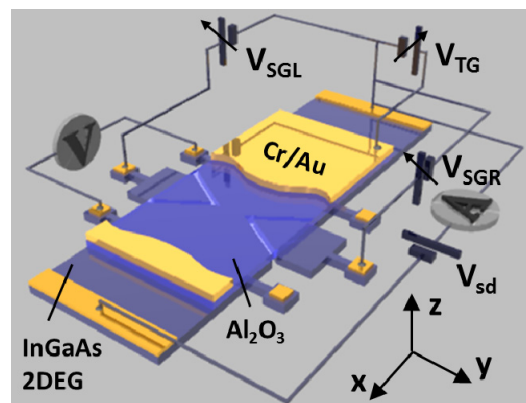


図2. デバイス構造の模式図と測定方法の概略図

イントコンタクトによる1次元チャンネル形成を、同時に実現する必要がある。そこで、はじめに(1)スピン軌道相互作用の強さをゲート制御することで、スピン偏極に起因した量子化コンダクタンスとスピン軌道相互作用の関係を定量評価し、スピン偏極の起源解明に向けた基礎データを集める。次に、(2)面内外部磁場とスピン軌道相互作用による有効磁場を競合させ、スピン偏極率やスピン偏極方向の定量評価を行い、スピン偏極方向を突き止める。さらに、(3)スピン偏極のメカニズムを明らかにすることを目的とした。

InGaAsP/InGaAsヘテロ構造を用いた量子ポイントコンタクトは、図1に示すように、エッチングにより溝を形成しサイドゲートにより1次元チャンネルを形成する方法を採用した。これにより、基板表面にトップゲートを作製することが可能となり、スピン軌道相互作用の強さをゲート制御することができる。エッチングにより形成した1次元チャンネル構造の幅は300-500nm程度でありサイドゲートにより空乏化することが可能となる。図2に具体的なデバイス構造の模式図と測定方法を示す。クライオスタットを用いて0.22-16Kにおいてソース・ドレインに電流を印加し、量子ポイントコンタクト間の電圧を測定する。トップゲート $V_{TG}$ およびサイドゲート $V_{SG}(V_{SGL}, V_{SGR})$ を変化させながら磁気伝

導測定を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) スピン軌道相互作用のゲート制御によるスピン偏極量子化コンダクタンスの観測

はじめに異なるトップゲート電圧における電導度のサイドゲート電圧依存性を測定した。図3に  $V_{TG} = 5.8, 2.4V$  における電導度とサイドゲート電圧依存性を示す。 $V_{TG} = 5.8V$  を印加しスピン軌道相互作用を弱くした場合、伝導度量子化が観測され  $(2e^2/h)$  の整数倍にプラトーが観測された。このことから、サイドゲート制御により良好な1次元伝導が形成されていることを確認した。その後、スピン軌道相互作用の影響を調べるため  $V_{TG} = 2.4V$  にしスピン軌道相互作用を増大させた。すると、通常観測される量子化伝導に加えて伝導度  $G = 0.5(2e^2/h)$  に新たにプラトーが観測された。通常  $0.5(2e^2/h)$  に観測される量子化伝導は外部磁場を印加し、スピン縮退を解いた時に観測されるスピン偏極したチャンネルになる。本測定では外部磁場を印加していないことから、ゼロ磁場においてスピン縮退が解けていることが明らかになった。図4には、量子化伝導度の温度依存性を示す。温度上昇に伴いプラトーが見え難くなるが、16Kにおいても観測できており比較的高温までスピン偏極状態が残ることを明らかにした。

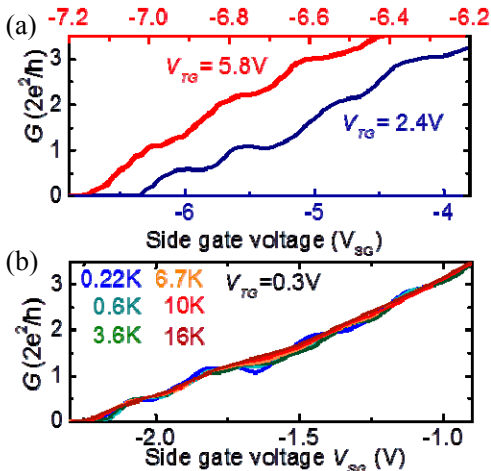


図3. (a)異なるトップゲート電圧における量子化コンダクタンス. (b)量子化コンダクタンスの温度依存性

##### (2) スピン偏極率やスピン偏極方向の定量評価

スピン偏極に起因した量子化コンダクタンスが観測されたことから、スピン偏極方向及びスピン偏極率の評価を試みた。スピン偏極方向を評価するために、異なる方向に外部磁場を印加し、スピン偏極に起因する  $G = 0.5(2e^2/h)$  プラトーの安定性を評価した。面直方向に外部磁場を印加した場合、2.5T以上の磁場では  $0.5(2e^2/h)$  プラトー状態は消失し、 $N(2e^2/h)$  ( $N$  は整数) のプラトーのみが観測されたことから、スピン偏極方向は面垂直ではないことが分かった。一方、外部磁場を膜面

内かつ伝導方向と垂直に印加した場合  $\pm 8T$  の

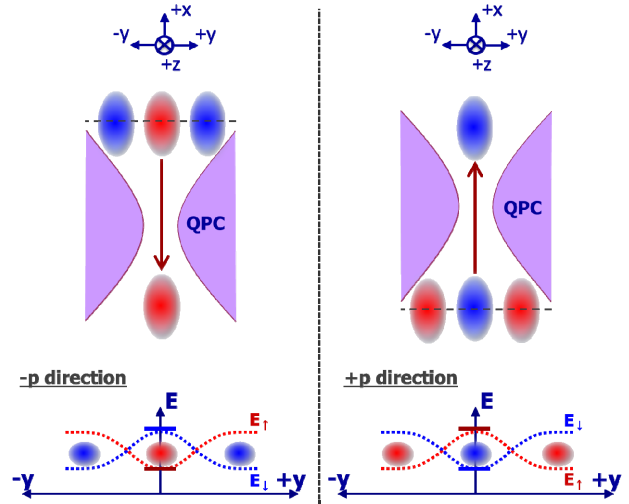


図4. InGaAs 量子ポイントコンタクトにおけるスピン偏極メカニズム

磁場を印加しても  $0.5(2e^2/h)$  は安定に存在した。このことから、スピン偏極方向は面内方向であることが示唆される。

さらにスピン偏極率を評価するため、ショットノイズ測定からスピン偏極率の定量評価を行った。その結果、 $0.5(2e^2/h)$  におけるスピン偏極率は最大 70% であることが分かった。

##### (3) InGaAs 量子ポイントコンタクトにおけるスピン偏極のメカニズム

これまでの実験結果から InGaAs 量子ポイントにおいては、スピン軌道相互作用がスピン偏極に対し重要な役割を果たすことが分かってきた。量子ポイントコンタクトにおける横方向の閉じ込め効果は、1次元伝導チャンネルを形成するのみならず、スピン軌道相互作用に起因する有効磁場の空間勾配が形成される。そこを通過する電子スピンに対しスピン依存力が生じるため、スピン偏極が生じていることが考えられる。このことを示すため、波動関数の時間発展を計算した。その結果、図4に示すように、波動関数が量子ポイントコンタクトに近づくにつれて、上向きスピンと下向きスピンが空間的に分離され、中央に収束された片方のスピンのみが1次元チャンネルを通過することで、スピン偏極が形成されることが明らかとなった。有効磁場の特徴は、このスピン偏極方向が運動方向に依存することである。このことは、スピンに働くポテンシャルが空間的に変調されていることを意味する(図4)。この有効的なスピン分裂と面内外部磁場を競合させることで、スピンの安定性がどのように変化するかを調べた。その結果、電子の運動方向に依存しスピン偏極方向が逆転していることを明らかにした。これにより、スピン軌道相互作用に起因してスピン偏極が形成されていることを実証した。

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6件)

1. 著者名 : A. Sasaki, S. Nonaka, Y. Kunihashi, M. Kohda, T. Bauernfeind, T. Dollinger, K. Richter, and J. Nitta  
論文標題 : Direct determination of spin-orbit interaction coefficients and realization of the persistent spin helix symmetry  
雑誌名 : NATURE NANOTECHNOLOGY, **13**, 703-709. (2014)  
DOI: 10.1038/NNANO.2014.128  
査読有
2. 著者名 : Junichi Shiogai, Mariusz Ciorga, Martin Utz, Dieter Schuh, Makoto Kohda, Dominique Bougeard, Tsutomu Nojima, Junsaku Nitta, and Dieter Weiss  
論文標題 : Giant enhancement of spin detection sensitivity in (Ga,Mn)As/GaAs Esaki diodes  
雑誌名 : PHYSICAL REVIEW B , **89** 081307(R)-1 – 081307(R)-5. (2014)  
DOI: 10.1103/PhysRevB.89.081307  
査読有
3. 著者名 : Makoto Kohda, Shuji Nakamura, Yoshitaka Nishihara, Kensuke Kobayashi, Teruo Ono, Jun-ichiro Ohe, Yasuhiro Tokura, Taiki Mineno, and Junsaku Nitta  
論文標題 : Spin-orbit induced electronic spin separation in semiconductor nanostructures  
雑誌名 : NATURE COMMUNICATIONS, **3**, 1082-1 - 1082-8. (2012)  
DOI: 10.1038/ncomms2080  
査読有
4. 著者名 : M. Kohda, V. Lechner, Y. Kunihashi, T. Dollinger, P. Olbrich, C. Schönhuber, I. Caspers, V. V. Bel'kov, L. E. Golub, D. Weiss, K. Richter, J. Nitta, and S. D. Ganichev  
論文標題 : Gate-controlled persistent spin helix state in (In,Ga)As quantum wells  
雑誌名 : PHYSICAL REVIEW B, **86** 081306(R)-1 – 081306(R)-5. (2012)  
DOI: 10.1103/PhysRevB.86.081306  
査読有
5. 著者名 : Y. Nishihara, S. Nakamura, K. Kobayashi, T. Ono, M. Kohda, and J. Nitta.  
論文標題 : Shot Noise at the Quantum Point Contact in InGaAs Heterostructure  
雑誌名 : AIP CONFERENCE

PROCEEDINGS **1566**, 311-312 (2013).

DOI: 10.1063/1.4848410

査読有

6. 著者名 : Y. Nishihara, S. Nakamura, K. Kobayashi, T. Ono, M. Kohda, and J. Nitta.  
論文標題 : Shot noise suppression in InGaAs/InGaAsP quantum channels  
雑誌名 : APPLIED PHYSICS LETTERS **100**, 203111-1-203111-4 (2012).  
DOI: 10.1063/1.4718934  
査読有

[学会発表] (計7件)

1. 発表者名 : M. Kohda  
発表標題 : Stern-Gerlach type spin separation in semiconductor nanostructures  
The 41<sup>st</sup> International Symposium on Compound Semiconductor, May. 11-15th, 2014, 招待講演 Montpellier (フランス)
2. 発表者名 : M. Kohda  
発表標題 : Spin-orbit induced spin generation in semiconductor nanostructures  
Energy Materials Nanotechnology meeting, Oct. 21st-27th, 2013, 招待講演 Chengdu (中国)
3. 発表者名 : M. Kohda  
発表標題 : Spin-orbit induced spin generation in InGaAs quantum wells  
16th International Conference on Narrow Gap Semiconductors  
NGS16, August 2nd-6th, 2013, 招待講演 Hangzhou (中国)
4. 発表者名 : M. Kohda  
発表標題 : Spin-orbit induced electronic spin separation in semiconductor nanostructures  
The 18th International Conference on electron Dynamics in Semiconductor, Optoelectronics and Nanostructures  
EDISON18, July 22nd-26th, 2013, 招待講演 Matsue くにびきメッセ (日本)
5. 発表者名 : M. Kohda  
発表標題 : Electrical spin separation and Stern-Gerlach effect in semiconductor nanostructures  
The American Physics Society, March meeting, March 18-22 (2013). 招待講演 San Francisco (アメリカ)
6. 発表者名 : M. Kohda  
発表標題 : Electrical spin separation and

Stern-Gerlach effect in semiconductor nanostructures  
AIMR spintronics workshop, November 30-December 1 (2012). 招待講演 東北大学 (仙台)

7. 発表者名 : M. Kohda  
発表標題 : Electrical spin generation and manipulation by spin orbit interaction in semiconductor nanostructures  
The 9<sup>th</sup> RIEC International Workshop on Spintronics, May 31-June 2 (2012). 招待講演 東北大学 (仙台)

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)  
なし

○取得状況 (計 0 件)  
なし

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.material.tohoku.ac.jp/~kotaib/kohda.html>

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

好田 誠 (KOHDA, Makoto)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号 : 00420000

##### (2)研究分担者

なし

##### (3)連携研究者

新田 淳作 (NITTA, Junsaku)  
東北大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号 : 00393778