

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21340078

研究課題名（和文）量子デバイスを用いたスピホール効果の研究

研究課題名（英文）Study of spin Hall effect in quantum devices

研究代表者

勝本 信吾（KATSUMOTO SHINGO）

東京大学・物性研究所・教授

研究者番号：10185829

研究成果の概要（和文）：スピン軌道相互作用により量子ポイントコンタクトが非磁性半導体中でスピンフィルターとして動作することを検証した。常伝導体を超伝導体で挟んだ構造に生じるアンドレーフ束縛状態において、横電流によって生じたスピホール効果によって異常伝導度が大きく抑えられる効果を見出した。

研究成果の概要（英文）：We have experimentally verified that a quantum point contact with a spin-orbit interaction works as a perfect spin polarizer. In the Andreev bound states, which appear in a normal conductor bounded by two superconductors, we have found that the spin Hall effect induced by a transverse current greatly reduces the anomalous conductance due to the Andreev reflection.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
2010年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2011年度	2,700,000	810,000	3,510,000
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性I

キーワード：スピン軌道相互作用，スピン流，アンドレーフ反射，スピホール効果

1. 研究開始当初の背景

スピン軌道相互作用によるスピホール効果の発見は、スピン物性、スピントロニクス分野ばかりでなく物性物理学全体に対して大きなインパクトを与え、トポロジーの視点から物理系を捉えるという新しいパラダイムが築かれてきた。ただし、スピホール効果自体は一般にたいへん小さなものであり、実用的なスピン流を生成できるかどうかは疑問であった。

2. 研究の目的

本研究の企画は、この微妙なスピホール効果を、鋭敏な量子デバイスを用いて検出し、スピホール効果に関する多角的な知見を

得ることである。また、自発的スピン偏極のある系におけるスピホール効果の一種である異常ホール効果も研究スパンの中に入る。また、単に検出するだけでなく、超伝導のようなトポロジカルな性質の異なる系との組み合わせデバイスにおける新しい現象の観測をも目指した。

3. 研究の方法

(1) スピホール効果が生じやすいスピン軌道相互作用の強い **In** を含む化合物半導体による量子構造の作製技術を確立する。**In** を含む系は一般に基板との格子整合を取るのが難しく、量子デバイスに必要な品質を得るためには技術開発が必要である。更に、通常量

量子ドットやポイントコンタクトを得るために使用されるショットキ障壁が得られにくい問題もある。更に、超伝導体など、対称性の異なる系との組み合わせにおいては、逆に界面障壁によって界面の量子現象が損なわれる問題が存在する。

(2) 以上のような問題を逐次解決して量子デバイスの作製条件確立を行い、続いて極低温での測定を行う。量子ドット研究や微小超伝導体研究で蓄積した実験技術を活用して通常とは異なる条件下での測定を通し、スピンホール効果の物理的な理解を深めると同時に、実用的なスピントロニクスへの応用の可能性を検証する。

4. 研究成果

(1) InAs および(In,Ga)As 2次元電子系の成長技術確立

まず、GaAs 基板上に格子不整合転移が入らない極薄膜(In,Ga)As 量子井戸を成長して2次元電子を生成し、その品質を調べた。In 組成 0.2 までは十分2次元電子系と呼べるものが成長し、電子濃度は $2 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ という GaAs 系に比べて桁違いの高さになることを見出した。

これ以上の In 濃度では移動度が急激に低下し、十分な2次元系ができないため、InP 基板を用い、格子定数を合わせて $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ を成長する手法を試みた。この場合も、量子井戸には InAs を使い、極薄膜にして不整合転位が入らない構造とした。この結果、移動度 $8 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{Vs}$ の InAs 2次元電子系が得られた。ただし、これも2次元電子系にアクセスしやすい反転構造にすると、 $1.4 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{Vs}$ まで低下する。

(2) 量子デバイス構造形成技術

ショットキー障壁のできにくい(In,Ga)As 系に対して、幾つかの量子デバイス形成法を試みた。第1に原子間力顕微鏡を用いた電流による陽極酸化法、第2にエッチングによってトレンチを掘り、大電圧によって空乏層を広げる方法、第3に In を含まない最上層を成長し、通常のショットキー障壁を形成する方法である。いずれの方法でも障壁の形成に成功したが、もっとも微細で再現性の良い制御ができたのは第3の方法と試料冷却時の適切なバイアス印加を行った場合であった。

超伝導体と半導体との障壁問題は深刻であり、障壁のできにくい InAs を用いても解決は難しく、再現性の高い方法は未開発で残された問題である。しかし、ここでは冷却後に高周波高電圧を一定時間印加する方法によって低抵抗で良質な接合を得ることに成功した。

(3) 側面結合量子ドットによるスピン偏極検出

量子ドット(QD)でスピン偏極を検出できるかどうか調べるため、量子細線(QW)に QD を側面結合し、磁場印加によってスピン偏極を誘起し、QW の半奇数量子化プラトー上でスピン偏極信号が増大する様子を検証した(図1)。

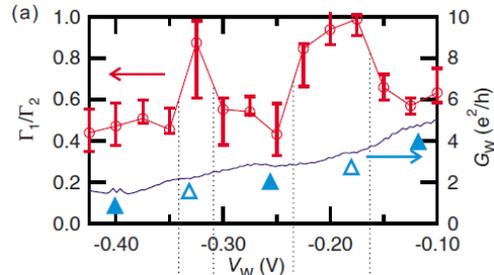


図1: 側面結合 QD のスピン偏極信号(赤線)と QW の電気伝導度(青線)。

(4) スピン軌道相互作用を持つ系の量子ポイントコンタクトにおける 1/2 量子化

擬格子整合(In,Ga)As(In 組成 0.1)において量子ポイントコンタクト(QPC)を形成し、0.05K での電気伝導を調べたところ、ゼロ磁場において通常の半分、 e^2/h を単位とする伝導度の量子化現象を見出した。磁場印加によって通常のスピン分裂による e^2/h 量子化が生じることからゼロ磁場においてスピン軌道相互作用と印加電流による時間反転対称性の破れによってスピン偏極が生じていると解釈できる。(図2) すなわち、QPC によるスピンフィルター効果を発見した。

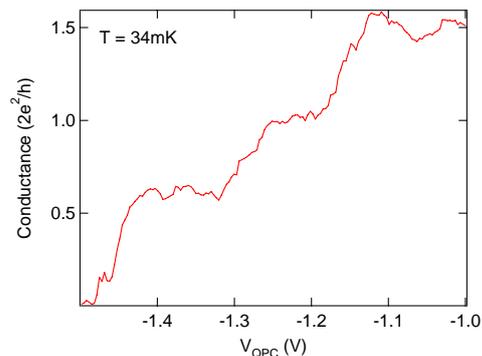


図2: (In,Ga)As QPC に現れた 1/2 量子化伝導度

(5) 量子ドット伝導を用いたゼロ磁場スピンフィルター効果の検証

更にスピン偏極が生じていることを確認するため、QPC を直列にした構造の QD を構成し、伝導を調べた。QD の電子状態を明らかにするため、近藤効果を利用し、スピン 1/2 状態が実現していることを確認した。その上で、QD のパウリブロッケード状態を使用して、 e^2/h の伝導度プラトーが生じている状態

がスピン偏極状態であることを実験的に確認した(図 3).

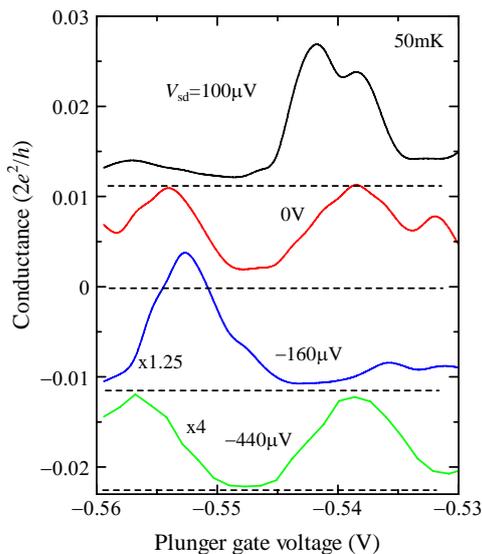


図 3 スピン偏極を反映して、バイアス電圧に対して反対称に電流がブロックされるクーロン振動。

(6) 電流注入による整流反転素子

強磁性半導体(Ga,Mn)As 素子においては、薄膜に垂直・水平方向のいずれの方向の電流注入においても磁化方向の制御が可能であることを示した。更に、2重量子井戸構造において、電流注入によって整流特性を反転させる新しい機能を見出した(図 4)。

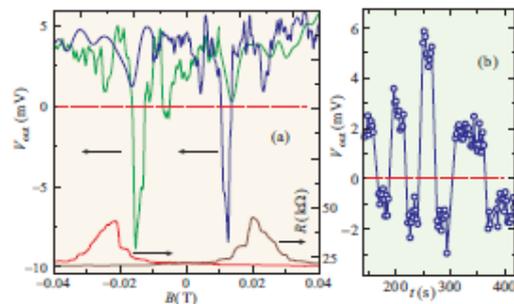


図 4: (a) 高周波(図は 1kHz だが、8GHz でも同様)に対する出力電圧. (b) 電流注入に対する整流電圧出力のスイッチング.

(7) アンドレーフ束縛状態に対するスピンホール効果の影響

トポロジカル超伝導体の議論で、バルクのトポロジカル量子数に対してエッジ状態を生じるアンドレーフ束縛状態(ABS)をスピン軌道相互作用の強い InAs2 次元電子系中に直接導入した. この時伝導度には、ABS によって運ばれる電流によるバイアス電圧に対して振動する異常伝導度が生じる. この状態で横方向の電流を流すと、スピンホール効果によって InAs と超伝導体との界面方向に向かってスピン流が生じ、界面のスピン蓄積によ

って ABS に影響を与える.

図 5 に示したように、横電流によって ABS に起因する異常伝導度が大きく抑制される現象を初めて捉えることができた.

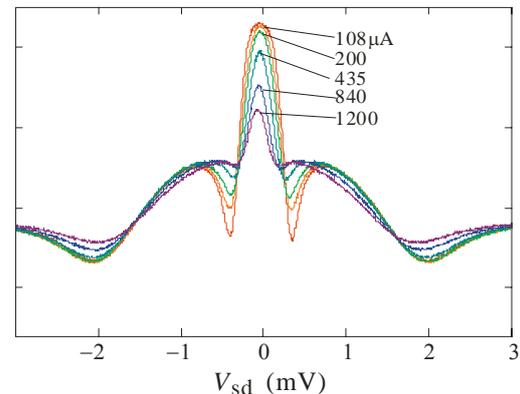


図 5: Nb-InAs 2DEG-InAs アンドレーフ素子の異常伝導度. 横電流によるスピンホール効果によって大きく抑制される.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 16 件)

- (1) T. Otsuka, E. Abe, Y. Iye and S. Katsumoto, "Detection of spin polarization with a side coupled quantum dot", *Phys. Rev. B*, Vol.79, 2009, 195313(1-5) (査読有).
- (2) M. Kato, A. Endo, S. Katsumoto and Y. Iye, "Temperature-Dependent Screening of the Edge State around Antidots in the Quantum Hall Regime", *Phys. Rev. Lett.*, Vol.102, 2009, 086802(1-4) (査読有).
- (3) M. Kawamura, M. Ono, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, K. Hamaya and T. Machida, "Dynamic nuclear polarization induced by breakdown of fractional quantum Hall effect", *Phys. Rev. B*, Vol.79, 2009, 193304(1-3) (査読有).
- (4) T. Otsuka, E. Abe, Y. Iye and S. Katsumoto, "Detection of spin polarization in a quantum wire", *Physica E* Vol.42, 2010, 809-812 (査読有).
- (5) M. Kawamura, T. Yamashita, H. Takahashi, S. Masubuchi, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, and T. Machida, "Strain-induced enhancement of electric quadrupole splitting in resistively detected nuclear magnetic resonance spectrum in quantum Hall systems", *Appl. Phys. Lett.* vol.96, 2010, 032102(1-3) (査読有).
- (6) A. Aharony, O. Entin-Wohlman, Y. Tokura and S. Katsumoto, "Spin filtering due to quantum interference in periodic mesoscopic networks", *Physica E* Vol.42, 2010, 629-633 (査読有).
- (7) T. Otsuka, E. Abe, Y. Iye and S. Katsumoto, "Probing local electronic states in the quantum Hall regime with a side-coupled quantum dot", *Phys. Rev. B*, Vol.81, 2010, 245302(1-4) (査読有).
- (8) M. Kawamura, K. Kono, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, and T. Machida, "Spatial gradient of

dynamic nuclear spin polarization induced by breakdown of the quantum Hall effect", Phys. Rev. B, Vol.83, 2011, 041305(1-4) (査読有).

(9) A. Aharony, Y. Tokura, G. Z. Cohen, O. Entin-Wohlman, and S. Katsumoto, "Filtering and analyzing mobile qubit information via Rashba-Dresselhaus-Aharonov-Bohm interferometers", Phys. Rev. B, Vol.84, 2011, 035323(1-12) (査読有).

(10) Y. Hashimoto, H. Amano, Y. Iye, and S. Katsumoto, "Magnetization Dependent Current Rectification in (Ga,Mn)As Magnetic Tunnel Junctions", Appl. Phys. Express, Vol.4, 2011, 063004(1-3) (査読有).

(11) S. W. Kim, Y. Hashimoto, Y. Iye, and S. Katsumoto, "Evidence of Spin-Filtering in Quantum Constrictions with Spin-Orbit Interaction", J. Phys. Soc. Jpn. Vol.81, 2012, 054706(1-5) (査読有).

[学会発表] (計 42 件)

(1) T. Otsuka, E. Abe, Y. Iye and S. Katsumoto, "Detection of spin polarization in a quantum wire", 18th Int. Conf. Electronic Properties of 2D Systems, Tu-eP87, Kobe, Japan (2009).

(2) K. Fujita, A. Endo, S. Katsumoto and Y. Iye, "Measurement of diffusion thermopower in the quantum Hall systems", 18th Int. Conf. on Electronic Properties of 2D Systems, Th-eP70, Kobe, Japan (2009).

(3) T. Otsuka, E. Abe, Y. Iye and S. Katsumoto, "Probing edge states in the quantum Hall regime with a side coupled quantum dot", 36th Int. Symp. on Compound Semiconductors, Santa-Barbara USA (2009).

(4) K. Fujita, A. Endo, S. Katsumoto, Y. Iye, "Experimental verification of the Mott relation in the thermoelectric effect of the quantum Hall systems", 30th Int. Conf. Phys. Semicond., P2-186, Seoul, Korea (2010).

(5) S.W. Kim, Y. Kuwabara, T. Otsuka, Y. Iye, S. Katsumoto, "Energy level spectroscopy of a quantum dot with a side-coupled satellite dot", 30th Int. Conf. Phys. Semicond., P2-399, Seoul, Korea (2010).

(6) Y. Hashimoto, H. Amano, Y. Iye, S. Katsumoto, "Magnetization Dependent Rectification in (Ga,Mn)As Triple-layer Tunneling Junctions", Int. Symp. on Nanoscale Transport and Technology 2011, Fr-5, Atsugi, Japan (2011).

(7) S.-W. Kim, Y. Hashimoto, Y. Iye, S. Katsumoto, "Perfect spin-filtering in quantum point contacts with spin-orbit interaction", 38th Int. Symp. on Comp. Semicond., Tu-3A, Berlin, Germany (2011).

(8) S.-W. Kim, Y. Hashimoto, Y. Iye, S.

Katsumoto, "Spin Blockade due to Spin-Orbit Filtering", 5th Int. Workshop on Spin Currents, P1-40, Sendai, Japan (2011).

(9) Y. Hashimoto, H. Amano, Y. Iye, and S. Katsumoto, "Current Injection Switching of Rectification in (Ga,Mn)As Magnetic Tunnel Junctions", 5th Int. Workshop on Spin Currents, P2-9, Sendai, Japan (2011).

(10) K. Fujita, A. Endo, S. Katsumoto, Y. Iye, "Spatial distribution of electron temperatures induced by a current in the quantum Hall regime", 19th Int. Conf. on Electronic Properties of 2D Systems, Mo-P-18, Tallahassee, USA (2011).

(11) S.-W. Kim, Y. Hashimoto, Y. Iye, S. Katsumoto, "Current blockade due to spin-filtering in a quantum dot", 19th Int. Conf. on Electronic Properties of 2D Systems, Tu-P-68, Tallahassee, USA (2011).

(12) Y. Hashimoto, H. Amano, Y. Iye, and S. Katsumoto, "Control of rectification with current injection in (Ga,Mn)As tri-layer tunnel junctions", Spintech 6, WP-05, Matsue, Japan (2011).

(13) S.-W. Kim, Y. Hashimoto, Y. Iye, S. Katsumoto, "Spin-filtering in quantum point contacts with spin-orbit interaction", Spintech 6, O-17, Matsue, Japan (2011).

(14) H. Amano, Y. Hashimoto, Y. Iye, and S. Katsumoto, "In-plane magnetic anisotropy of (Ga,Mn)As detected through anomalous Hall effect", Spintech 6, WP-04, Matsue, Japan (2011).

(15) S.-W. Kim, Y. Hashimoto, Y. Iye, S. Katsumoto, "Novel blockade due to spin-filtering with spin-orbit interaction", 26th Int. Conf. on Low Temp. Phys., 13P-D012, Beijing, China (2011).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

勝本信吾 (KATSUMOTO SHINGO)
東京大学・物性研究所・教授
研究者番号：10185829

(2) 研究分担者

橋本義昭 (HASHIMOTO YOSHIAKI)
東京大学・物性研究所・技術専門職員
研究者番号：20396922