

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25247051

研究課題名(和文)超伝導スピントロニクス

研究課題名(英文)Spintronics with superconductivity

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,900,000円

研究成果の概要(和文)：近接効果により2次元電子系内に生じた超伝導電流を、スピンホール効果によってスイッチすることに成功した。また、このような超伝導接合が、トラップ磁束によって0接合から π 接合へと変化する現象を見出した。希薄磁性半導体(In,Fe)Asを近接効果で超伝導状態にし、これがスピン3重項超伝導である可能性が高いことを見出した。

スピン軌道相互作用が強い系の量子点接合で強いスピン偏極が起こることを検証し、特に単伝導量子プラトーでの偏極を初めて検証した。

この技術を用いてスピン軌道相互作用が強い系に、スピン偏極した電子を注入することで、相対論的電子に特徴的なZitterbewegung現象を検証した。

研究成果の概要(英文)：We found switching of supercurrent through two-dimensional electron gas (2DEG) with the spin-Hall effect. The transition from 0-junction to π -junction in such a superconducting junction was found due to a trapping of magnetic flux in superconducting electrodes was also found. We succeeded in making an n-type diluted ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As superconducting with proximity effect and found the pairing is probably spin-triplet.

We confirmed experimentally for the first time that through a quantum point contact with strong spin-orbit interaction spins are highly polarized particularly on the plateau with single conductance quantum.

With this technique, we found that so called "Zitterbewegung" phenomenon, which is characteristic in relativistic electrons, appears as reproducible conductance fluctuation versus in-plane magnetic field in spin-polarized transport.

研究分野：量子物性物理学

キーワード：スピントロニクス 超伝導トランジスタ 希薄磁性半導体 超伝導近接効果

1. 研究開始当初の背景

(1) 超伝導発現のキーとなるクーパ対の形成にはスピン状態が重要であり、時間反転対称性とも関連している。古くからあるこの認識にも関わらず、超伝導をスピントロニクスと結合しようという試みは行われておらず、限られた系で生じる特別なスピン状態によるトポロジカル超伝導が主な興味の対象であった。

(2) スピン軌道相互作用が強い系の量子ポイントコンタクトでスピン偏極が生じているという予想が伝導度からなされていたが、直接的な証拠がなく、そのスピントロニクス応用も報告されていなかった。

2. 研究の目的

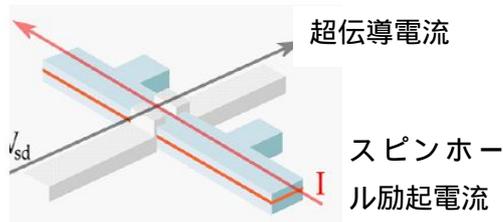
(1) スピントロニクスと超伝導の接点領域を形成する。このためにスピントロニクスで培われた技術を用いて超伝導に影響を与える現象を見出す。

(2) (1)の目的を達成するため、制御しやすい超伝導を生じる系として半導体ヘテロ接合2次元電子系を取り上げ、この系へのスピン注入、およびスピン伝導を調べる。

3. 研究の方法

(1) 強いスピン軌道相互作用(SOI)を持つ2次元系(2DEG)をInAsの非対称量子井戸で構成する。上部金属との良好な接合のため、反転ドープ構造とする。2つの独立なイオンガンを持つ蒸着機を整備し、クリーニング直後に超伝導金属(Nb, NbTi)を積層する。

(2) スピン偏極導入の1つの方法が、スピンホール効果を用いるものである。図のように、2DEGを挟む超伝導接合を作製し、横方向に電流を加えるとスピンホール効果によって超伝導-常伝導接合にスピン蓄積を生じることができる。他の方法として、通常の強磁性体を用いる方法も考えられる。この際、スピン注入抵抗を避けるため、bcc鉄系の結晶を成長させ、MgO類似のバンド構造を持つトンネル障壁を使用する。



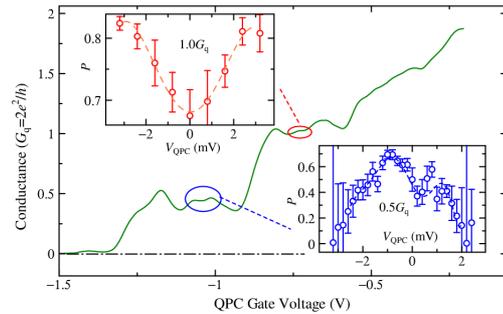
(3) 強いSOIを導入した2DEGで量子ポイントコンタクト(QPC)を構成し、スピン偏極を調べる。局所的なスピン偏極を検出するために、単一コンタクト量子ドット(QD)を使用する。スピントロニクスを時間軸上で実現することでスピン偏極を測定する。

(4) 2DEG内でのスピン注入-スピンフィルター間伝導を調べ、スピン偏極伝導の特徴を抽出する。

(5) 磁性体内、あるいは量子ホール状態のようなスピンが特別な状態になる系に近接効果で超伝導を生じさせ、その性質を調べる。

4. 研究成果

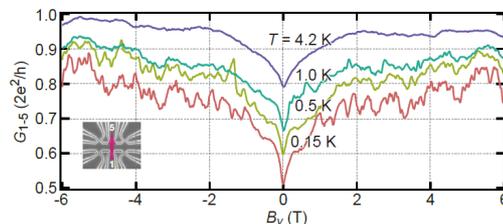
(1) 混晶半導体 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ の非対称量子井戸でQPCを構成し、QPCの直近にQDを設け、2電子トンネル過程を用いることでスピン偏極の検出を行った。



上の図がその結果で、QPC伝導度(緑線)がゲート電圧に対して赤で示した1量子化伝導度の位置だけでなく、青で示した0.5量子化伝導度でもプラトーを示している。これらの位置でスピン偏極を測定すると、挿入図に示したようにいずれも高い偏極率を示している。ただし、QPCにバイアス電圧を印可すると、0.5量子化では偏極度が減少し、スピンフィルター効果が生じており、1量子化では偏極度は増加し、スピン回転効果が生じていることが明らかになった。

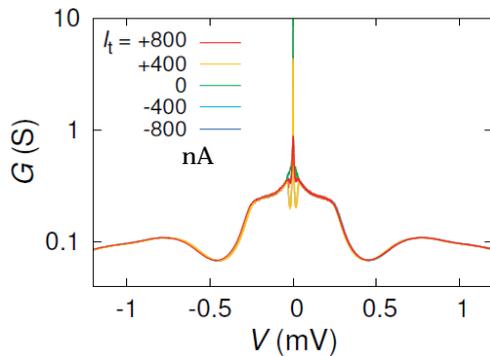
特に、1量子化プラトーでスピン偏極が生じていることは、理論的な予言はあったものの測定手段がなく見過ごされてきたが、この研究により初めて明瞭な実験的証拠が得られた。

(2) 1量子化プラトーで強いスピン偏極が生じ、更にバイアスを印可して大きな電流を流せることから、SOIがさらに強い系であるInAsの量子井戸を用いて伝導度が1量子化伝導度に固定されたQPCを複数取り付け量子ビリヤード構造を作製し、SOIの強い系でのスピン偏極伝導を調べた。



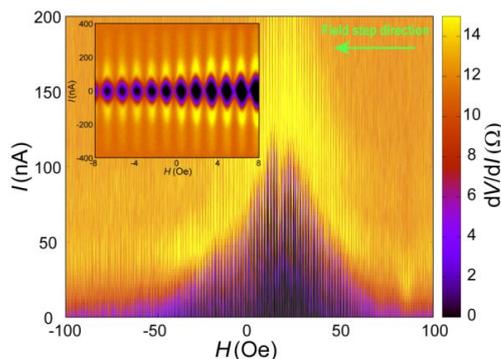
2次元面内方向の磁場に対するQPC間の伝導を調べると上の図のように一見不規則だが再現する振動が生じることを発見した。現象論モデルによる詳細な解析の結果、この振動は、量子力学の始祖であるシュレディンガーがかつて予言した、Zitterbewegungと

いう現象が生じているものであることが明らかになった．相対論的量子力学に現れる基本的な現象の一つであったが，電子においてはこれまでほとんど観測不可能であった．スピン偏極電子と強いSOIとの組み合わせ，および，不純物散乱長と試料形状との微妙な組み合わせによってここで初めてこのように明瞭な効果として観測することに成功した．
 (3) 目的の(2)である，超伝導電流に対するスピンホール-スピン蓄積の効果を調べた．



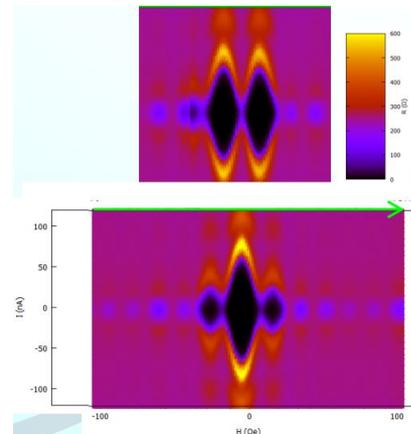
上図のように，わずかな横電流を流してスピン蓄積を生じることで超伝導電流をスイッチできることがわかった．これは，界面でアンドレーフ反射によるスピンフリーデル振動が生じているためと考えられ，初めての超伝導電流増幅素子を構成した実験結果である．

(4) 希薄磁性半導体(In,Fe)As に Nb 電極を取り付け伝導を測定したところ，1K 以下の低温で超伝導転移を起こすことを確認した．



成長面に垂直な磁場を印可すると，上図のように電極間干渉による量子振動が生じるが，臨界電流の最大値が磁化のマイナーループに応じてゼロ磁場からシフトして現れる．このシフト位置から，ここで生じている超伝導は通常のスピン 1 重項超伝導ではなく，スピン 3 重項超伝導であることが示唆された．これは，希薄磁性半導体が近接効果により超伝導を発現した初めての例である．また，スピン 3 重項超伝導は非常に稀な例であり，かつ上記実験結果は，スピン 3 重項超伝導発現のために界面のスピン乱れが必要になるという理論的予言を初めて検証した例になっている．

(5) SOI の強い InAs に接触する超伝導金属を磁束ピン止め効果の強い NbTi に変更してジョセフソン効果を調べた．



上図下のように，フラウンホーファー干渉を示す超伝導パターンが生じるが，面内磁場を加えていくと，上図上のように，ゼロ磁場での超伝導が消失し， $0-\pi$ 転移が生じることを発見した．これは，磁束ピン止め効果と反転対称性が破れて SOI が強い系の超伝導の特徴を捉えた実験結果である．

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 3 件)

S. W. Kim, Y. Hashimoto, T. Nakamura and S. Katsumoto, “Spin polarization in the vicinity of quantum point contact with spin-orbit interaction”, *Phys. Rev. B* **94**, 125307 (2016). doi: 10.7566/JPSJ.85.105002.

T. Nakamura, J. Haruyama and S. Katsumoto, “Introduction of Spin-Orbit Interaction into Graphene with Hydrogenation”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **85**, 105002 (2016). doi: 10.7566/JPSJ.85.105002

T. Nakamura, Y. Takahashi, Y. Hashimoto, D. H. Yun, S. W. Kim, Y. Iye and S. Katsumoto, “Spin Hall reduction of Josephson effect in InAs two-dimensional electrons”, *Phys. Status Solidi C* **10** (2013) 1473. doi: 10.1002/pssc.201300263.

〔学会発表〕(計 5 件)

S. Katsumoto, Y. Iwasaki, Y. Hashimoto and T. Nakamura, “‘Zitterbewegung’ appeared as fluctuation in transport” (invited), China-Japan International Workshop on Quantum Technologies, Beijing University, China, May, 2016.

T. Nakamura, Y. Iwasaki, L. D. Anh, Y. Hashimoto, S. Ohya, M. Tanaka, S. Katsumoto, “Josephson effect in Nb/(In,Fe)As/Nb junctions”, 9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in

Solids, Kobe, Hyogo, August, 2016.

Y. Iwasaki, Y. Hashimoto, T. Nakamura, S. Katsumoto, “Observation of Conductance Fluctuation due to Zitterbewegung in InAs 2-dimensional Electron Gas”, 33rd International Conference on the Physics of Semiconductors, Beijing, China, August, 2016.

S. Katsumoto, Y. Iwasaki, S.-W. Kim, Y. Hashimoto, T. Nakamura, “Coherent Transport under Spin-Orbit Interaction” (invited), International Symposium on New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics, Kashiwa, Chiba, June, 2015.

T. Nakamura, Y. Hashimoto, J. Haruyama, Y. Iye, and S. Katsumoto, “Inverse spin Hall effect in hydrogenated graphene”, 21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, Sendai, Miyagi, August, 2015.

〔図書〕(計 1 件)

勝本信吾, 培風館, 半導体量子輸送物性, (2014) 268.

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

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

中村 壮智 (NAKAMURA, Taketomo)

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号: 50636503

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