

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05407

研究課題名(和文) ナノ細線を介した超伝導輸送現象と電子構造の相関

研究課題名(英文) Superconducting transport phenomena and the electron structures in semiconductor nanowires

研究代表者

松尾 貞茂 (Matsuo, Sadashige)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・助教

研究者番号：90743980

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,000,000円

研究成果の概要(和文)：二重ナノ細線と超伝導体の接合に着目し二重InAsナノ細線と超伝導体との接合の作製手法の確立とナノ細線中にできた量子ドットを介したクーパー対分離、さらに弾道的な電子輸送領域での二重ナノ細線でのクーパー対分離の実証に成功した。またNbTiを使用することで超伝導とスピン分離した量子ホールバルク状態の接合面でのアンドレーエフ反射の測定に成功した。さらに、高移動度量子井戸から作製した量子細線で無磁場で半整数量子化伝導度にプラトー構造が出現し、磁場によって伝導度が減少することを確認した。また、ゲート制御可能なコルビノ型ジョセフソン接合の測定に成功し、その磁場依存性から磁束の大きさを評価することに成功した。

研究成果の概要(英文)：About junctions of superconductors and double InAs nanowires, we established the fabrication technique and demonstrated Cooper pair splitting in the junctions via quantum dots occasionally formed in the nanowires. Furthermore, we demonstrated Cooper pair splitting in the ballistic double nanowire junctions. We also fabricated the nice interface between NbTi and InAs quantum well and realized coexistence of superconductivity and spin-resolved quantum Hall effect. In the junctions, we observed conductance enhancement around zero bias voltage as a signature of equal-spin Andreev reflection. In addition, we found the half-integer quantized conductance plateaus in InAs quantum wire and in-plane fields makes the plateau conductance decrease, meaning the e-e interaction can be assigned as the origin instead of the spin-orbit interaction. We succeeded in gate control of supercurrent in Corbino-geometry Josephson junction and estimation of vortex size from the field dependence.

研究分野：メゾスコピック物理

キーワード：マヨラナ粒子 トポロジカル超伝導 半導体ナノ細線

1. 研究開始当初の背景

超伝導体と半導体ナノ細線において、単一ナノ細線に平行な磁場を印加することにより細線端にマヨラナ粒子と呼ばれる新奇粒子を実現できるという理論提案<sup>1</sup>が注目を集め、実験的にもその兆候が観測され始めていた<sup>2,3</sup>。マヨラナ粒子は自身とその反粒子とが等しくなる粒子のことで、その非可換統計性のため将来的なトポロジカル調子コンピューティングへの応用が期待されている。このような中、しかし、マヨラナ粒子の兆候は明瞭なものではなく、さらなる実験的な証拠の積み重ねが課題であった。さらに、磁場を用いてマヨラナ粒子を実現する手法では超伝導性が壊れるために実現に技術的な困難があるだけでなく、マヨラナ粒子の特徴的な性質が失われやすくなるという欠点も指摘され始めていた。

2. 研究の目的

本研究では、主に半導体材料である半導体ナノ細線と超伝導体の接合や半導体量子井戸と超伝導体の接合を用いてマヨラナ粒子実現のための舞台を新たに実現することと、その実証を掲げて研究を行った。そのなかで電流位相関係の測定と電子状態の相関を実証することを計画していた。

3. 研究の方法

電子線リソグラフィを用いた半導体材料と超伝導体の接合に関する微細デバイスの作製を行い、極低温での超伝導電流や電子状態の測定を用いて研究を行った。特に、半導体材料であることの利点であるゲート制御性を利用し、半導体中の電子状態の制御を行いながら観測される超伝導現象の研究を行った。研究にはナノ細線として自己形成型 InAs ナノ細線を、量子細線として半導体 InAs 量子井戸から切り出された量子細線を、量子井戸として高移動度 InAs 量子井戸試料を用いた。

4. 研究成果

A. 二重ナノ細線と超伝導体の接合に関する研究

まず、単一ナノ細線と超伝導体を用いた従来の手法でマヨラナ粒子の実現を試みた。Al と InAs ナノ細線のジョセフソン接合試料を用いて AC ジョセフソン効果に起因するジョセフソン放射現象の観測を行い、その磁場依存性を測定した。その結果、ある磁場においてマヨラナ粒子の兆候に対応するジョセフソン放射の異常を観測した。しかし、詳細な解析の結果、これは細線とボンディング用のパッドをつなぐ部分の超伝導体の磁場依存性に起因するものであることがわかった。

そのため、磁場を用いずにマヨラナ粒子の実現が可能となる舞台を作り出す実験が急務となった。そこで、二つの InAs ナノ細線が並列に配置された構造に超伝導体を接合するデバイスに着目し、実験を行った。この構造では、無磁場で超伝導体中のクーパー対が異なる細線へと分離するクーパー対分離

が存在し、その効率が 100%を超えると、無磁場でマヨラナ粒子を実現できると提案されている<sup>4</sup>。しかし、これまで二重ナノ細線のデバイス作製や測定結果に関する実験研究の報告は一切なかった。

そこで、我々はまず二重ナノ細線と超伝導体の接合デバイスを作製する手法を開発した。これにより、二重ナノ細線のそれぞれのナノ細線に常伝導体でコンタクトを形成することや超伝導体とナノ細線のコンタクトを形成することが可能となった。さらに、電子輸送測定の結果、二重ナノ細線に並置されたサイドゲート電極を用いてナノ細線中に形成された量子ドットの制御を行うことに成功した。測定結果からドット間が静電結合していることを明らかにした。

また、二重ナノ細線と超伝導体の接合を用いて Y 型のデバイスを作製した。このデバイスではそれぞれのナノ細線に常伝導体でコンタクトを形成し、超伝導体からそれぞれの細線へ流れる電流を測定した。その結果、超伝導体と常伝導体との間の細線部分に量子ドットが形成されており、この量子ドットを介してクーパー対分離が起きていることを実証した。

さらに、二重ナノ細線とアルミニウムで形成したジョセフソン接合デバイスを極低温で測定した。デバイスにはそれぞれの細線の制御用にゲート電極が二つ付置されており、そのゲート電極に印加するゲート電圧と測定される伝導度の依存性をアルミニウムが常伝導体としてふるまう 250mT で測定した。すると、ピンチオフ電圧を示す直線が折れ曲がっており、そこからそれぞれの細線のみを流れるゲート領域と二つの細線を流れるゲート領域が存在することが分かった。さらに、弾道的な電子輸送の証拠となる量子化伝導

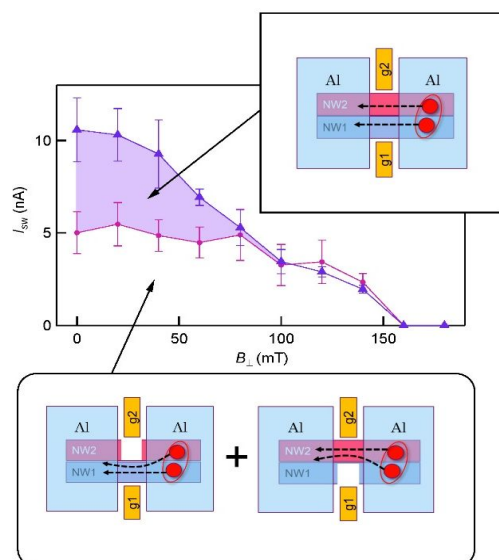


図 1: ジョセフソン接合で測定された超伝導電流 (スイッチング電流  $I_{sw}$ ) の磁場 ( $B_{\perp}$ ) 依存性。紫領域がクーパー対分離成分に対応する。

度プラトーが観測された。さらに、プラトール上での超伝導電流の測定から、二重ナノ細線に流れる超伝導電流がそれぞれの細線のみを流れる超伝導電流の和よりも顕著に大きくなっていることを発見した。これは、ドットを介さない弾道的な電子輸送領域でのクーパー対分離の検証に初めて成功したことを意味している。また、この分離の効率は134%となっており、分離が支配的になる状況が実現可能であることも実証した。図1に分離成分の磁場依存性を紫領域として示している。これは無磁場で二重ナノ細線中にマヨラナ粒子を実現する必要条件が満たされたことを意味しており、非常に重要な意義を持つ。今後この構造を用いたマヨラナ粒子実現に関する研究が活発になると考えられる。

また、ナノ細線を用いた実験をより制御性のよい量子井戸に発展させるために、高移動度量子井戸から量子細線を切り出してその物性を評価した。その結果、弾道的な電子輸送を示す量子化伝導度プラトーが観測された。しかし、無磁場にもかかわらずプラトー構造での伝導度の値が  $e^2/h$  の整数倍となっていることがわかった。また、面内磁場を印加していくと、プラトー構造はゼーマン分裂を示す挙動にしたがい、プラトー伝導度は無磁場での値よりも徐々に小さくなっていくことが明らかとなった。これまで無磁場での  $e^2/h$  プラトー構造の報告<sup>5,6</sup>はあったが、すべてがスピン軌道相互作用に依存した現象とされてきていた。しかし、今回の研究結果から、スピン軌道相互作用から期待される磁場依存性は得られず、むしろ細線中の電子相関に起因した現象であることが示唆された。したがって、このプラトー構造の起源を解明するうえで非常に重要な結果である。

さらに、半導体量子井戸と超伝導体 NbTi の良質な接合の形成を行った。NbTi は強磁場においてもその超伝導性を保てるため、超伝導性とスピン偏極した電子状態の接合系で期待されるトポロジカル超伝導やマヨラナ粒子の実現に有利である。この接合に面直磁場を印加すると 2 T 以上の強磁場領域においてスピン分離した量子ホール状態が実現されることがわかった。また、超伝導性も 7 T 付近の強磁場まで維持されることがわかった。そこで、接合でのアンドレーエフ反射の測定をおこなった。すると、量子ホール端状態では電子伝導度に異常は見られなかったが、量子ホールバルク状態と超伝導体との接合が形成されるときに伝導度がバイアス電圧ゼロの領域でピーク構造を示すことがわかった。これは、アンドレーエフ反射に起因するものであると解釈できる。しかし、アンドレーエフ反射にはスピン縮退した電子状態と超伝導体との接合が必要であるが、量子ホールバルク状態は完全スピン偏極状態であるため、観測されたのは接合付近のスピン軌道相互作用に起因したスピントリップにより仲介される特異なアンドレーエフ反射

であることがわかった。この現象はスピン三重項超伝導近接効果の要素となるものであり、InAs 量子井戸と超伝導体の接合がスピン三重項超伝導の実験舞台となりうることを示唆している点で重要である。

また、半導体量子井戸と超伝導体との接合に関して、これまでに先行研究<sup>7</sup>が一例のみしかないコルビノ型のジョセフソン接合の作製を行い、その輸送測定を行った。作製したデバイスの超伝導電流をゲート制御することに成功したほか、通常の矩形ジョセフソン接合で観測されるフラウンフォーファー型の依存性ではなく、直角三角形型の特異な依存性が確認された。さらに磁場を掃引した際に、超伝導電流が流れている状態から有限の抵抗が観測される状態への変遷を、接合中に存在する磁束が生むフロー抵抗のモデルを用いて解析した。その結果、磁束周辺の位相の変化領域を特徴づける大きさ（磁束サイズ）の定量評価に成功し、さらにゲート電圧や温度でその大きさを制御することが可能であることがわかった。トポロジカル絶縁体と超伝導体の接合などではマヨラナ粒子は磁束中心に出現するため、磁束の制御やその大きさの評価は必須の技術であった。今回の結果は、この技術を提供しているという点で重要なものである。

[引用文献]

1. Y. Oreg, et al., Phys.Rev.Lett.105. 177002 (2010)
2. V.Mourik, et al., Science 336,1003 (2012)
3. S.M.Albrecht, et al., Nature 531,206 (2016)
4. J.Klinovaja, et al., Phys.Rev.B 90, 045118(2014)
5. P.Debray, et al., Nat. Nanotechnol. 4, 759 (2009)
6. M.Kohda, et al., Nat. Commun. 3,1082 (2012)
7. R.H.Hadfield, et al., Phys. Rev. B 67, 144513 (2003)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計11件)

**査読無**

1. S.Baba, C.Junger, S.Matsuo, 他 9 名  
“Cooper –pair splitting in two parallel InAs nanowires” arXiv:1802.08059 (2018) New Journal of Physics 受理済
2. H.Kamata,R.S.Deacon,S.Matsuo,他 6 名,  
“Anomalous modulation of Josephson radiation in nanowire-based Josephson junctions” arXiv 1805.04702 (2018)

3. K.Kuroyama, M.Larsson, J.Muramoto, K. Heya, T.Fujita, G.Allison, S.R.Valentin, A.Ludwig, A.D.Wieck, S.Matsuo, A.Oiwa, S.Tarucha, “Quantum state transfer of angular momentum via single electron photo-excitation from a Zeeman-resolved light hole” arXiv: 1805.05147 (2018)

#### 査読有

4. S.Matsuo, 他 7 名, “Equal-Spin Andreev Reflection in Junctions between Spin-resolved Quantum Hall Bulk State and Superconductor”, Scientific Reports 8, 3454 (2018)
5. S.Matsuo, 他 6 名 “Magnetic Field Inducing Zeeman Splitting and Anomalous Conductance Reduction of Half-integer Quantized Plateaus in InAs Quantum Wires”, Phys. Rev. B (R) 96, 201404 (2017)
6. K.Kuroyama, M.Larsson, S.Matsuo, 他 6 名 “A single electron-photon pair generation from a single polarization-entangled photon pair”, Scientific Reports 7, 16968 (2017)
7. S.Baba, S.Matsuo, 他 8 名 “Gate tunable parallel double quantum dot in InAs double-nanowire junctions” Applied Physics Letters 111, 233513 (2017)
8. S.Matsuo, 他 6 名, “Parity effect of bipolar quantum Hall edge transport around graphene antidots”, Scientific Reports 5, 11723 (2015)
9. S.Matsuo, 他 7 名 “Edge mixing dynamics in graphene p-n junctions in the quantum Hall regime”, Nature Communications 6:8066 (2015)
10. T.Hata, T.Arakawa, K.Chida, S.Matsuo, K.Kobayashi, “Giant Fano factor and bistability in a Corbino disk in the

quantum Hall effect breakdown regime”, Journal of Physics: Condensed Matter **28**, 055801 (2016)

11. S.Takeshita, S.Matsuo, 他 7 名 “Anomalous behavior of 1/f noise in graphene near the charge neutrality point”, Applied Physics Letters **108**, 103106 (2016)

[学会発表](計 60 件)  
国際会議 口頭

1. (Invited) K.Ueda, S.Matsuo, 他 8 名 “Observation of Cooper pair splitting in a ballistic Josephson junction through double InAs nanowires” 34th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2018), the Corum conference center, Montpellier, France, July 29-August 3, 2018
2. Y.Sato, S.Matsuo, 他 8 名 “Tomonaga-Luttinger liquid behaviour in 1D electron system fabricated from InAs Quantum well holding strong spin-orbit interaction” 34th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2018), the Corum conference center, Montpellier, France, July 29-August 3, 2018
3. S.Matsuo, 他 7 名 “Edge mixing dynamics in s quantum Hall pn junction of graphene”, 9<sup>th</sup> International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Solids (PASPS9), Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, August 10 (8-11), 2016.
4. S.Matsuo, 他 6 名, “Andreev Reflection at a Junction of Spin-resolved Quantum Hall State and Superconductor”, The 22<sup>nd</sup> International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor

- Physics (HMF22), Jozankei View Hotel, Sapporo, Japan, July 24-29, 2016.
5. K. Kuroyama, M. Larsson, T. Fujita, S. Matsuo, 他 5 名 “Generation of single photon-electron pairs from single entangled photon pairs”, the 33th International Conference on the Physics of Semiconductors(ICPS2016), Beijing International Convention Center, Beijing China, July 31-August 5, 2016.
  6. (Invited) S. Matsuo, 他 6 名 , “Experimental Observation of Andreev Reflection on Junctions of Spin-resolved Quantum Hall Bulk State and Superconductor”, TOP-SPIN3: Spin and Topological Phenomena in Nano structures-Towards Topological Materials Science, the Leibniz Institute for Solid State and Materials Research (IFW Dresden), Dresden, Germany, April 25-28, 2017
  7. (Invited) S. Matsuo, 他 8 名 “Observation of Cooper pair splitting from superconductor to parallel coupled two InAs nanowires”, 2nd Japan-China International Workshop on Quantum Technologies, Ito International Research Center , the University of Tokyo, Tokyo, Japan, June 12-13, 2017
  8. (Invited)S. Matsuo,他 5 名 “Experimental study of exotic transport in superconductor-semiconductor hybrid systems”, The second international conference on Quantum Information, Quantum Topological Orders and Emergent Spacetime on Quantum Simulators, Blue Bay Hotel, Zhangjiajie, China, July 3-7, 2017
  9. S. Matsuo, 他 6 名 “Andreev reflection in junctions of spin-resolved InAs quantum Hall bulk state and superconductor NbTi”, 28<sup>th</sup> International Conference on Low Temperature Physics (LT28), Gothenburg, Sweden, August 9-16, 2017
  10. K. Kuroyama, M. Larsson, S. Matsuo, 他 6 名 “Observation of quantum state transfer from polarized photons to electron spins using optical Pauli blockade effect” 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28), Gothenburg, Sweden, August 9-16, 2017
- 国際会議 ポスター
11. S. Matsuo, 他 6 名 , “Control of transport property of InAs quantum wire with side and top gate structure” , 21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-21), Sendai, Japan, July 26-31, 2015.
  12. S. Matsuo, 他 5 名 “Anomalous reduction of plateau conductance with in-plane magnetic field in InAs quantum wires”, 9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Solids (PASPS9), Kobe, Japan, August 8 (8-11), 2016.
  13. S. Baba, H. Kamata, S. Matsuo, 他 5 名 “Transport property of parallel double quantum dots formed in InAs double-nanowire junctions”, 9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Solids (PASPS9), Kobe, Japan, August 8 (8-11), 2016.

14. H.Kamata,R.S.Deacon,S.Matsuo, 他 5 名 ” Transport properties of suspended InAs nanowires with short junctions” the 33th International Conference on the Physics of Semiconductors(ICPS2016), Beijing China, July 31-August 5, 2016.
15. S.Matsuo,他 7 名 “Equal-spin Andreev Reflection between Spin-resolved Quantum Hall Bulk State and Superconductor” , International workshop on nano-spin conversion science & quantum spin dynamics (NSCS-QSM), Takeda Hall, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, October 12-15, 2016.
16. H. Kamata, R. S. Deacon, S. Matsuo, 他 5 名 “Transport properties of InAs nanowires on hexagonal boronitride”, International workshop on nano-spin conversion science & quantum spin dynamics (NSCS-QSM), Takeda Hall, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, October 12-15, 2016.
17. Y. Sato, S. Baba, C. Juenger, S. Matsuo, 他 5 名 “Cooper-pair splitter realized in superconductor-InAs double nanowire junctions”, International Conference on Topological Materials Science 2017 (TopoMat2017), Tokyo Tech Front, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, May 10-13, 2017
18. H.Kamata,R.S.Deacon,S.Matsuo,他 5 名 “Josephson radiation of InAs nanowire Josephson junctions”, 22nd International Conference on Electronic Properties of Two Dimensional Systems (EP2DS-22) /18<sup>th</sup> International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS-18), Penn State University, USA, July 31-August 4, 2017
19. Y. Sato, S. Baba, C. Juenger, S. Matsuo, 他 5 名 “Observation of Crossed Andreev Reflection on superconductor-InAs double nanowire junction device” 22nd International Conference on Electronic Properties of Two Dimensional Systems (EP2DS-22) /18<sup>th</sup> International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS-18), Penn State University, USA, July 31-August 4, 2017

他 7 件

国内会議 34 件 (招待講演 3 件)

〔図書〕(計 1 件)

松尾貞茂、小林研介、「グラフェン pn 接合におけるパリティ効果の発見」パリティ vol. 31 2016 年 7 月号 (丸善出版)

〔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:

<http://www.meso.t.u-tokyo.ac.jp/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

松尾貞茂 (MATSUO, Sadashige)

東京大学・大学院工学系研究科・助教

研究者番号 : 90743980

(2)研究分担者

(3)連携研究者

樽茶清悟 (TARUCHA, Seigo)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号 : 40302799

(4)研究協力者

馬場翔二 (BABA Shoji)

館野瑞樹 (TATENO Mizuki)

上田健人 (UEDA Kento)

佐藤洋介 (SATO Yosuke)

武重有祐 (TAKESHIGE Yuusuke)

鎌田大 (KAMATA Hiroshi)