

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月2日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02204

研究課題名(和文)半導体ナノ構造における人工トポロジカル相の創成

研究課題名(英文) Design of topological effects in semiconductor nanostructures

研究代表者

ロス ダニエル (Loss, Daniel)

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・チームリーダー

研究者番号：00524000

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 38,910,000円

研究成果の概要(和文)：我々は本研究で以下の研究成果を挙げた。(1)トポロジカル相の設計では、量子ドット配列における分数電荷状態やスカーミオン、高次トポロジカル絶縁体でのマヨラナ粒子実現手法を提案した。(2)トポロジカル相になりうる研究舞台の特性では、2次元トポロジカル絶縁体での核スピン効果を理論調査した。また二重細線超伝導接合でクーバー対分離の実現と高効率化に成功した。InAs細線の電子間相互作用を理論実験両面から解明した。(3)トポロジカル相の実験的探索では、HgTe量子井戸ジョセフソン接合で異常ACジョセフソン効果の観測に成功した。これらは人工的にトポロジカル相を実現する基礎となるため重要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物質中のトポロジカル相は現在のハードウェアの限界を超える情報処理を可能にすると期待されている。その実現には多くの障害を除去する必要がある。本研究はトポロジカル相の実現で障害となる要素の物理を理解し、その除去手法の実現に重要となるものである。本研究では広い分野での基礎、応用研究への発展が期待できる半導体に注目した。特にトポロジカル相の舞台となる物質における信頼性の高い評価手法の確立を行った。また、より制御性の良いロバストなトポロジカル相の実現手法の設計やその要素技術の実証を行い、生成、検出、制御手法を発展させた。本研究は完全に保護された量子計算やその他の新技術への道を示す重要なものである。

研究成果の概要(英文)：We have accomplished several research goals planned for this project. (1) On designing topological nanoscale systems, we theoretically demonstrated that fractional boundary charges can be realized in a one-dimensional quantum dot array, and that Majorana bound states can be realized using skyrmionic spin texture. In addition, we proposed a tune-free scheme to stabilize Majorana Kramers pairs in higher-order topological insulators. (2) On characterizing potential platforms for topological matters, we theoretically investigated nuclear spin effects in two-dimensional topological insulators. Experimentally, we demonstrated Cooper pair splitting in proximitized InAs nanowires with high efficiency, a condition for Majorana Kramers pairs. (3) On searching topological signatures, we observed unconventional ac signals in Josephson junctions made of HgTe-based topological weak links. Our results establish foundations for future research on topological matter in semiconductor nanostructures.

研究分野：Physics

キーワード：半導体物性 物性実験 物性理論 マヨラナ粒 超伝導 電子対分離 スピン軌道相互作用

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

トポロジカル超伝導体が発見され、マヨラナ粒子に関する研究が進んでいる。マヨラナ粒子は、非アーベリアン統計に従うとともにトポロジカルな性質を持ち、擾乱に強い量子ビットを情報単位とする量子計算に応用できるという期待が持たれ、研究が国内外で急速に進んでいる。しかし、トポロジカルに保護された状態を作るには、高品質な低次元電子系の実現、スピン軌道相互作用（SOI）の制御などの実験要素を組み合わせる必要がある。これらの要素は個々には研究されているものの、その研究はまだ緒に就いたばかりであり、実験的に調べられているトポロジカル相についても、議論の余地が大きい。これは、各要素に対する知見や制御性が十分ではないためであり、言い換えれば、技術的に有用なトポロジカル相は、系統的で現実的な条件で研究を行うことによって初めて実現される。従って、本研究では、実験・理論双方からのアプローチでトポロジーの制御と応用の研究を遂行した。

### 2. 研究の目的

本研究では、マヨラナ粒子およびナノ細線（NW）を用いた新奇なトポロジカル相の実現と検証に関する代表者の理論アプローチに基づき、下記の研究項目を目標として、研究分担者のグループが実験研究を遂行した。

（1）低次元系においてSOIによって誘起されるヘリカル状態の知見を得ることを目標とする。ヘリカル状態はマヨラナ粒子の実現に必須な状態であるにも関わらず、当時実証はされていなかった。そこで、実験研究ではヘリカル状態を実証することに注力することとした。（2）既存の実験技術を超えるSOIの制御性の達成を目標とする。また、本研究項目で得た制御性を用いてマヨラナ粒子の実現を行うことを最終目標として設定した。（3）（1）（2）で確立した1次元人工トポロジカル相を2つ結合させた複合系において、その結合の制御を目標とする。これを基に、新たなマヨラナ粒子、トポロジカル量子ビットの実現可能性を議論する。

### 3. 研究の方法

本研究では、まず、SOIにより生み出される人工トポロジカル相であるヘリカル状態を輸送測定から実証し、その理論の構築を行う。同時に、NWの配列系で実現される人工トポロジカル相に関する理論の構築を行う。加えて、結合NWでの実験研究を行い、トポロジカル相が実現される強磁場下での輸送特性の評価を行う。最後に人工トポロジカル相を用いた超伝導接合系で、マヨラナ粒子の実証を行う。その際、既存の手法とは異なる、より確実に信頼性の高い手法を用いる。

本研究目標達成のために、人工的にトポロジカル相を創成し、その学理構造と制御技術を確立する。当初計画では、SOIを持つNWでのヘリカル状態の実証とその特性評価を行うことを予定した。また、周期的な磁場により誘起されるトポロジカル相の実証と物性および制御性の評価を行うことを予定した。これらの系はトポロジカル絶縁体と比べ制御性が非常に高く、マヨラナ粒子の実証にも適している。また、結合NWの配列系で実現される人工トポロジカル相に焦点を当て、その理論構築と、理論舞台となる結合NW系での強磁場での超伝導輸送特性の評価を行う予定とした。その後、これらの計画で実現される人工トポロジカル相を用いてマヨラナ粒子を探索する計画を立てた。

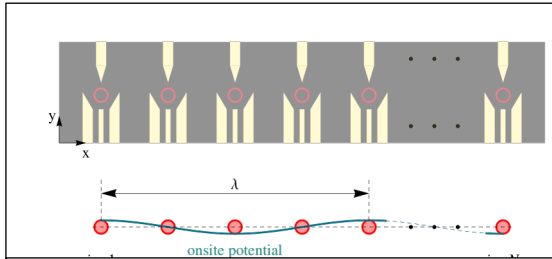


図 1：量子ドット列にて分数電荷を実現するためのデバイス構造の模式図

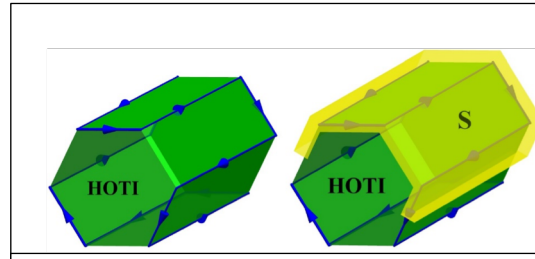


図 2：高次トポロジカル絶縁体を用いたマヨラナ粒子の実現デバイスの模式図

#### 4. 研究成果

量子ドットを用いて核スピンによる効果を取り除いてSOIを評価する手法を理論的に提唱した。また、トポロジカル相を実現する系として、分数電荷を実現する量子ドット列 (図 1)、マヨラナ粒子束縛状態を実現するスカーミオン/超伝導体結合素子、パラフェルミオンを実現する電気的に駆動された結合NW系を理論的に提唱した。量子スピンホールエッジ状態における核スピンの抵抗への効果を解析し、伝導度の量子化が消失することを理論的に明らかにした (図 3)。

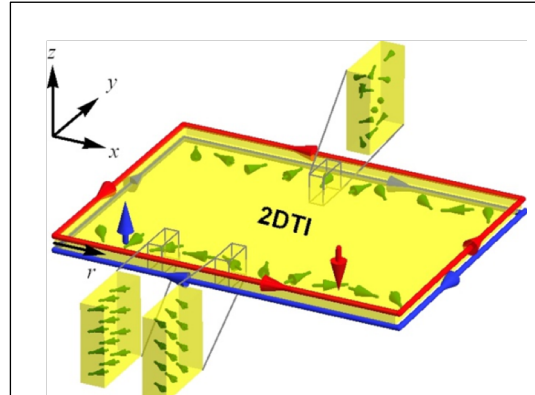


図 3：量子スピンホール状態のエッジに対する核スピンの影響についての模式図

同時に、自己形成螺旋核スピン構造がどのように抵抗に反映されるかを実証した。さらに、フォノン等による長距離相互作用ノイズに対するマヨラナ状態の安定性に関する理論的研究を始めた。フォノンによるマヨラナ粒子の安定性への影響を評価し、有限温度の条件では長距離相関に起因する不安定化が起こることがわかった。これはマヨラナ粒子のエネルギー分裂や寿命が有限サイズの系では指数関数的に小さくはなりえないことを意味している。また、高次トポロジカル絶縁体と超伝導接合においてマヨラナクラマース対が出現することを提案した。

これら理論的研究の結果を踏まえ、実験研究を相補的に推し進めた。

交流ジョセフソン効果検出のための高周波測定系 (周波数帯域1~20 GHz、磁場 < 2 T) を確立した。この測定系を用いて、HgTeトポロジカル絶縁体ジョセフソン接合試料では、トポロジカル相による超伝導位相の $4\pi$ 周期性の観測に成功した (図 4)。

また、従来手法に比べて安定的にHgTe量子井戸をSi基板上に転写する技術を確立し、オンチップ雑音検出器などの複雑な試料の作製が可能となった。

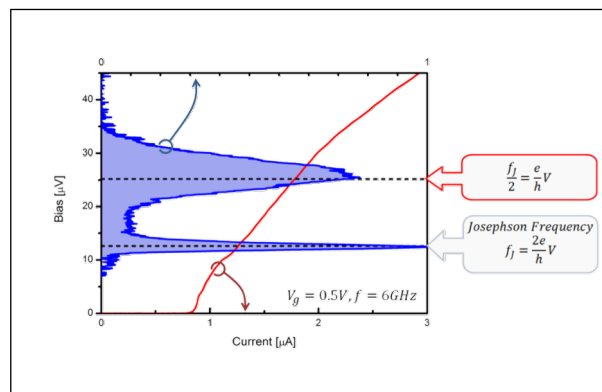


図 4：HgTeにおける $4\pi$ 周期性を示すジョセフソン放射の実験結果。

単一NW接合において、h-BN薄膜をゲート絶縁層として用いることにより、高品質なInAs NW試料を作製した。NWに対して常伝導体を接合した試料では、明瞭な量子化伝導度を観測することに成功し、超伝導体NbTiまたは超伝導体 Alを接合したジョセフソン接合では、上記の高周波測定によって交流ジョセフソン効果による基本周波数ジョセフソン雑音の検出に成功した。さらに、交流ジョセフソン効果の高周波信号が接合近傍の回路定数の変化によって変調を受けることを見出した。これらの結果はマヨラナ粒子の兆候として考えられているジョセフソン放射の実験結果の解釈に注意が必要であることを意味しており、重要なものである。

また、Ge/Si単一NW上の量子ポイント接合において、ヘリカル状態の証拠となる伝導度のリエントラント構造の観測に成功した。この結果はNW中でのヘリカル状態の実現を示唆するものであり、マヨラナ粒子の研究に重要な知見を与える。

一方、並列2重NW（結合NW系）において、超伝導体Alから別々のNWへのドットを介したクーパー対分離に加えて、より良質なデバイスでは弾道的なクーパー対分離現象の観測に成功した。2重NWにおいて、ドットを介さないクーパー対分離の実証と分離効率100%以上を実現した例は世界初である（図 5）。

また、上記のクーパー対分離ではSOIを持つNWのラッティンジャー液体的性質が重要となるため、これを解明するためにInAs NWのラッティンジャー液体的性質を伝導度測定から明らかにし、電子間相互作用が非常に大きな系であることを見出した（図 6）。この結果を理論的に評価し、ラッティンジャー液体中でのSOIの物理を解明した。

トポロジカル絶縁体BiSbTeから作製したジョセフソン接合では、超伝導電流のゲート制御に成功し、鏡面アンドレーエフ反射の兆候を観測した。加えて、シャピロステップの測定を行ったが、マヨラナ粒子の兆候は得られなかった。

高品質InAs量子井戸と超伝導体との接合系では、スピン分離した量子ホールバルク状態が支配的な領域において超伝導ギャップ内での伝導度の増強を観測した。

コルビノ型ジョセフソン接合では、抵抗の磁場依存性から磁気渦の大きさを評価することに成功し、ゲート電圧や温度によって磁気渦の大きさが制御できることがわかった。

また、高周波測定によるトポロジカル接合のスペクトロスコピーを目指し、実験系の構築を行った。現在までにInAsジョセフソン接合におけるアンドレーエフ束縛状態の検出に成功している。また、量子スピンホール状態候補物質である単層WTe<sub>2</sub>のジョセフソン接合作製のための微細加

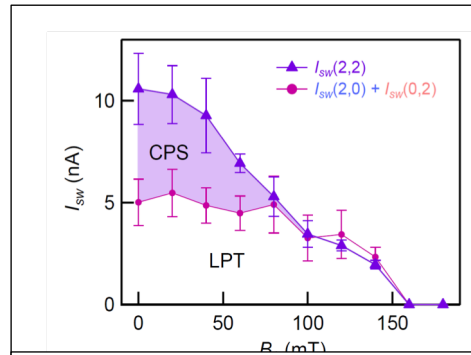


図 5：クーパー対分離（CPS）成分の磁場依存性。二重NWにおいてゼロ磁場でCPSが大きな寄与を持っている。

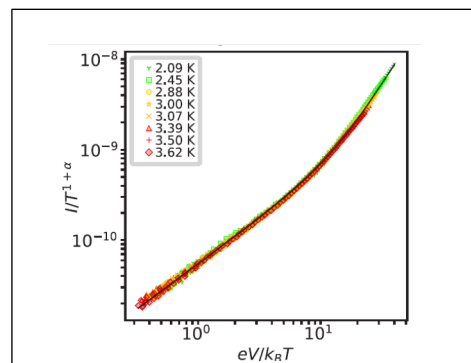


図 6：InAs NWで観測された普遍的スケーリング則。ここからラッティンジャー液体パラメータを評価した。

工技術の開発を行った。現在までに多層WTe<sub>2</sub>に対するエッジコンタクトの形成に成功している。また、ワイル半金属であるPtSe<sub>2</sub>においてカイラル異常の観測を行った。

研究代表者であるロスダニエルは 2017 King Faisal International Prize を受賞した。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 23 件) Selected list:

1. R. Wang, R. S. Deacon, J. Sun, J. Yao, Ch. M. Lieber, K. Ishibashi, “Gate Tunable Hole Charge Qubit Formed in a Ge/Si Nanowire Double Quantum Dot Coupled to Microwave Photons”, *Nano Lett.* 19, 1052-1060 (2019). Peer-reviewed.  
DOI: 10.1021/acs.nanolett.8b04343
2. J. Sun, R. S. Deacon, R. Wang, J. Yao, Ch. M. Lieber, K. Ishibashi, “Helical Hole State in Multiple Conduction Modes in Ge/Si Core/Shell Nanowire”, *Nano Lett.* 18, 6144–6149 (2018). Peer-reviewed.  
DOI: 10.1021/acs.nanolett.8b01799
3. S. Matsuo, K. Ueda, S. Baba, H. Kamata, M. Tateno, J. Shabani, C. J. Palmstrøm, S. Tarucha, “Equal-Spin Andreev Reflection on Junctions of Spin-Resolved Quantum Hall Bulk State and Spin-Singlet Superconductor”, *Scientific Reports* 8, 3454 (2018). Peer-reviewed.  
DOI: 10.1038/s41598-018-21707-0
4. Ch.-H. Hsu, P. Stano, J. Klinovaja, and D. Loss, “Majorana Kramers Pairs in Higher-Order Topological Insulators”, *Phys. Rev. Lett.* 121, 196801 (2018). Peer-reviewed.  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.196801
5. R. S. Deacon, J. Wiedenmann, E. Bocquillon, F. Domínguez, T. M. Klapwijk, P. Leubner, C. Brüne, E. M. Hankiewicz, S. Tarucha, K. Ishibashi, H. Buhmann, and L. W. Molenkamp, “Josephson Radiation from Gapless Andreev Bound States in HgTe-Based Topological Junctions”, *Phys. Rev. X* 7, 021011 (2017). Peer-reviewed.  
DOI: 10.1103/PhysRevX.7.021011
6. E. Bocquillon, R. S. Deacon, J. Wiedenmann, P. Leubner, T. M. Klapwijk, C. Brüne, K. Ishibashi, H. Buhmann, L. W. Molenkamp, “Gapless Andreev bound states in the quantum spin Hall insulator HgTe”, *Nature Nanotechnology* 12, 137–143 (2017). Peer-reviewed.  
DOI: 10.1038/nnano.2016.159
7. S. Baba, S. Matsuo, H. Kamata, R. S. Deacon, A. Oiwa, K. Li, S. Jeppesen, L. Samuelson, H. Q. Xu, and S. Tarucha, “Gate tunable parallel double quantum dots in InAs double-nanowire devices”, *Appl. Phys. Lett.* 111, 233513 (2017). Peer-reviewed.  
DOI: 10.1063/1.4997646
8. I. V. Borzenets, F. Amet, C. T. Ke, A. W. Draelos, M. T. Wei, A. Seredinski, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Bomze, M. Yamamoto, S. Tarucha, and G. Finkelstein, “Ballistic Graphene Josephson Junctions from the Short to the Long Junction Regimes”, *Phys. Rev. Lett.* 117, 237002 (2016). Peer-reviewed.  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.237002
9. H. Kiyama, T. Nakajima, S. Teraoka, A. Oiwa, and S. Tarucha, “Single-Shot Ternary Readout of Two-Electron Spin States in a Quantum Dot Using Spin Filtering by Quantum Hall Edge States”, *Phys. Rev. Lett.* 117, 236802 (2016). Peer-reviewed.  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.236802
10. T. Fujita, P. Stano, G. Allison, K. Morimoto, Y. Sato, M. Larsson, J.-H. Park, A. Ludwig, A. D. Wieck, A. Oiwa, and S. Tarucha, “Signatures of Hyperfine, Spin-Orbit, and Decoherence Effects in a Pauli Spin Blockade”, *Phys. Rev. Lett.* 117, 206802 (2016). Peer-reviewed.  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.206802
11. J. Klinovaja, P. Stano, and D. Loss, “Topological Floquet Phases in Driven Coupled Rashba Nanowires”, *Phys. Rev. Lett.* 116, 176401 (2016). Peer-reviewed.  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.176401

[学会発表] (計 101 件) Examples:

1. R. S. Deacon, “Signatures of  $4\pi$  periodicity in the dynamics of HgTe Josephson Junctions”, International symposium on revolutionary atomic-layer materials(招待講演)(国際学会) 2016年10月21日~2016年10月22, Tohoku University, Sendai, Japan
2. D. Loss, “From Majorana- to Para-Fermions in Coupled Nanowires”, International School and Conference on Nanoscience and Quantum Transport (nanoQT-2016)(招待講演)(国際学会) 2016年10月08日~2016年10月14, Kiev, Ukraine

3. S. Tarucha, “Superconductor junctions to nanowires and 2DEGs with strong spin-orbit interactions and topological insulators” Topological States of Matter(招待講演)(国際学会), 2016年09月05日, Miramar Palace, San Sebastian, Spain
4. P. Stano, “Majorana bound states in magnetic skyrmions”, SPIE NanoScience + Engineering symposium(招待講演)(国際学会), 2016年08月31日, San Diego, USA

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：樽茶 清悟            タルチャ セイゴ  
ローマ字氏名：**Tarucha Seigo**  
所属研究機関名：国立研究開発法人理化学研究所  
部局名：創発物性科学研究センター  
職名：グループディレクター  
研究者番号（8桁）：40302799

研究分担者氏名：ディーコン ラッセル  
ローマ字氏名：**Deacon Russell**  
所属研究機関名：国立研究開発法人理化学研究所  
部局名：開拓研究本部  
職名：専任研究員  
研究者番号（8桁）：40552443

研究分担者氏名：鎌田 大            カマタ ヒロシ  
ローマ字氏名：**Kamata Hiroshi**  
所属研究機関名：国立研究開発法人理化学研究所  
部局名：創発物性科学研究センター  
職名：研究員  
研究者番号（8桁）：70755545

研究分担者氏名：松尾 貞茂            マツオ サダシゲ  
ローマ字氏名：**Matsuo Sadashige**  
所属研究機関名：東京大学  
部局名：大学院工学系研究科（工学部）  
職名：助教  
研究者番号（8桁）：90743980

研究分担者氏名：スタノ ピーター  
ローマ字氏名：**Stano Peter**  
所属研究機関名：国立研究開発法人理化学研究所  
部局名：創発物性科学研究センター  
職名：上級研究員  
研究者番号（8桁）：10722746

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：徐 晨軒  
ローマ字氏名：**Hsu Chen-Hsuan**

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。