

2025 年度年次報告書

先端国際共同研究推進事業

【2023 年度採択 次世代のための ASPIRE 量子分野】

【研究課題名】

半導体およびトポロジカル物質を用いたスピン軌道ナノ構造の量子状態制御

研究代表者：

好田 誠 (東北大学 大学院工学研究科 教授)

主たる共同研究者：

石橋 幸治 (理化学研究所 開拓研究本部 主任研究員)

相手側研究代表者：

Thomas Schäpers (ユーリッヒ研究センター ピーター・グリュンベルグ研究所 グループリーダー)

Dan Bucca (ユーリッヒ研究センター ピーター・グリュンベルグ研究所 グループリーダー)

1. 研究進捗状況と成果

本研究構想は、大きなスピン軌道相互作用を有する新規量子材料を基盤として、量子情報デバイスおよび超伝導ハイブリッド構造に必要な電子状態制御技術を確立することを目的とする。2025 年度は、ユーリッヒ研究センターにおける高品質薄膜成長、東北大学におけるスピン輸送・量子干渉計測、理研における極低温量子輸送評価の役割分担のもと、材料開発から物性評価までを一体的に推進した。特に、GeSn 量子井戸構造では東北大学とユーリッヒ研究センターの共同研究により、低温磁気輸送測定から高移動度二次元ホールガス形成、小さな有効質量、大きな g 因子、およびラシュバ型スピン軌道相互作用に由来する大きなスピン分裂を実証し、GeSn が量子情報デバイスおよび超伝導ハイブリッド構造に有望な材料であることを示した。本成果は *Communications Materials* に掲載された。

加えて、理研とユーリッヒ研究センターの共同研究では、GaAs/InAs コア-シェルナノワイヤのジョセフソン接合において軸方向磁場に対する周期的な超伝導電流振動を観測し、アハラノフ-ボーム位相が超伝導輸送に反映されることを示した。磁場・ゲート依存性解析からトポロジカル超伝導相実現に向けた電子状態制御の設計指針を得て、本成果は *Communications Physics* に掲載された。

国際頭脳循環の促進としては、2025 年 10 月に東北大学で **ASPIRE Workshop on Quantum and Topological Materials** を開催し、ユーリッヒ研究センターから複数の研究者を招へいして、GeSn、SnS、トポロジカル絶縁体、GaAs/InAs コア-シェルナノワイヤ接合を中心とした研究成果と今後の方針を議論した。さらに、その一環として博士学生 1 名を 9 月から 3 か月間東北大学に受け入れ、 Bi_2Te_3 薄膜の磁気輸送測定と多チャネル解析を共同で実施し、得られた成果をワークショップおよび国内学会で発表した。

2. 代表的な成果事例

代表的な成果論文

1. P. Kaul, J. Kartheim, J. Buchhorn, T. Kawano, T. Usubuchi, J. Ishihara, N. Rotaru, P. Del Vecchio, O. Concepcion, Z. Ikonc, D. Grützmacher, Q.-T. Zhao, O. Moutanabbir, **M. Kohda, T. Schäpers and D. Buca**, “GeSn quantum wells as a platform for spin-resolved hole transport”, *Communications Materials* **6**, 216 (2025).

概要：GaAs/InAs コア-シェルナノワイヤのジョセフソン接合において、軸方向磁場に対する周期的な超伝導電流振動を観測し、ナノワイヤ表面電子のアハラノフ-ボーム位相が超伝導輸送に反映されることを示した。これにより、トポロジカル超伝導相実現に向けた電子状態制御の重要な設計指針を得た。

2. P. Zellekens, R. S. Deacon, F. Basaric, R. Juluri, M. D. Randle, B. Bennemann, C. Krause, E. Zimmermann, A. M. Sanchez, D. Grützmacher, A. Pawlis, **K. Ishibashi and T. Schäpers**, “Flux-periodic supercurrent oscillations in an Aharonov-Bohm-type nanowire Josephson junction”, *Communications Physics* **8**, Article number (2025).

概要：GaAs/InAs コア-シェルナノワイヤに超伝導ハーフシェル構造を形成したジョセフソン接合において、軸方向磁場に対する周期的な超伝導電流振動を観測した。アハラノフ-ボーム位相が超伝導輸送に反映されることを示し、トポロジカル超伝導相実現に向けた電子状態制御の設計指針を得た。

3. Patrick Zellekens, Russell S. Deacon, Farah Basaric, Raghavendra Juluri, Michael D. Randle, Benjamin Bennemann, Christoph Krause, Erik Zimmermann, Ana M. Sanchez, Detlev Grützmacher, Alexander

Pawlis, Koji Ishibashi & Thomas Schäpers, “Flux-periodic supercurrent oscillations in an Aharonov–Bohm-type nanowire Josephson junction”, Communications Physics, 8, 363 (2025)

概要：GaAs/InAs コアシェルナノワイアにアルミニウム（ハーフシェル）を蒸着してジョセフソン接合を作製した。ナノワイアに沿った方向に印可した磁場の関数として電気伝導のふるまいを調べた。コンタクト電極が正常金属の場合は、 h/e （磁束）を周期とする磁気抵抗の振動が観測された。コンタクトが超伝導金属（Al）の場合は、超伝導電流に $h/2e$ （磁束）を周期とする振動が観測された。これらの振動は、正常電子やクーパペアの干渉による Aharonov-Bohm(AB)効果によるものであるが、超伝導コンタクトの場合は円筒状の超伝導体に鎖交する磁場による Little-Parkes 効果の影響も加わっているものと思われる。

プレスリリース

2025 年 10 月 3 日 新半導体材料 GeSn の量子井戸構造における量子・スピン物性を解明- GeSn が切り拓く量子技術とスピントロニクス未来 – 日刊工業新聞掲載(2025 年 10 月 24 日)