

二次元機能性原子・分子薄膜の創製と利用に資する基盤技術の創出
2016 年度採択研究代表者

2020 年度
年次報告書

笹川 崇男

東京工業大学 科学技術創成研究院 フロンティア材料研究所
准教授

トポロジカル量子計算の基盤技術構築

§ 1. 研究成果の概要

マヨラナ準粒子(=特殊な量子統計性をもちトポロジカル超伝導状態に現れる)を用いた「トポロジカル量子コンピュータ」の実現に向けて、要素技術(マヨラナ準粒子の生成法・検出法・操作法)の確立および革新的素材(ヘテロ構造用各物質・最適トポロジカル超伝導体)の創製を目指した。トポロジカル量子ビットの構成に必要な各素材を、単結晶として開発することがほぼ完了したので、デバイス化に向けた基礎データの取得や要素技術の蓄積に取り組んだ。例えば、開発した高絶縁性のトポロジカル絶縁体(TI; $\text{Sn}_{0.02}\text{Bi}_{1.08}\text{Sb}_{0.9}\text{Te}_2\text{S}$)については、表面に現れる特殊金属状態を単独で本当に使えるのか、という素朴ではあるが核心を突く設問に真っ向から取り組んだ。リソグラフィでコルビノ配置の円形電極をもつデバイス構造を作製し、マイクロフレイク単結晶の伝導特性を評価した。抵抗ネットワークモデルの解析も通じて、熱励起キャリアの生成や上下の表面間における短絡などを避けて、150 K 以下では単一表面伝導が実現することの実証に成功した[Appl. Phys. Lett. 118, 033102 (2021)]。

素材創製への取り組みとして、より優れた物質の開発も継続している。上記の高絶縁性 TI は、成分が5つと多く、不定比の精密組成制御も必要な系である。この改善を目指した物質開拓の結果、絶縁性にも優れて2成分の定比組成からなる Bi_4X_4 ($X = \text{I}, \text{Br}$)を見出した。高温相の $\beta\text{-Bi}_4\text{I}_4$ が特定の結晶面にのみトポロジカル表面金属状態をもつ「弱い」TI であることの発見[Nature 566, 518 (2019)]の続報として、 Bi_4Br_4 がバルクと表面は絶縁体で特定のエッジ(ヒンジ)に1次元の特殊金属状態をもつ「2次」TI であることを発見した[Nature Materials 20, 473 (2021)]。

§ 2. 研究実施体制

(1)「東工大」グループ

- ① 研究代表者: 笹川 崇男 (東京工業大学・科学技術創成研究院、准教授)
- ② 研究項目
 - ・革新的素材(トポロジカル量子デバイス用電子物質)の開発
 - ・革新的量子状態(トポロジカル表面伝導・マヨラナ準粒子)の確立
 - ・革新的量子デバイス機能(マヨラナ準粒子制御)の実証

(2)「理研」グループ

- ① 主たる共同研究者: 花栗 哲郎 (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)
- ② 研究項目
 - ・革新的計測(極限性能走査型トンネル顕微鏡分光)装置・データ解析法の開発
 - ・革新的素材(トポロジカル電子物質)・デバイス構造の実空間電子状態の解明
 - ・革新的量子状態(マヨラナ準粒子)の確立
 - ・革新的量子デバイス機能(マヨラナ準粒子制御)の実証

(3)「東大」グループ

- ① 主たる共同研究者:石坂 香子 (東京大学・大学院工学系研究科、教授)
- ② 研究項目
 - ・革新的計測(極限性能角度分解光電子分光)装置の開発
 - ・革新的素材(トポロジカル電子物質)・デバイス構造の運動量空間電子状態の解明
 - ・革新的量子状態(マヨラナ準粒子)の確立

(4)「名大1」グループ

- ① 主たる共同研究者:柏谷 聡 (名古屋大学・大学院工学研究科、教授)
- ② 研究項目
 - ・革新的量子状態(マヨラナ準粒子の発生法、検出法)の確立
 - ・革新的量子デバイス機能(トポロジカルジョセフソン素子・トポロジカル量子ビット)の実証

(5)「名大2」グループ

- ① 主たる共同研究者:川口 由紀 (名古屋大学・大学院工学研究科、教授)
- ② 研究項目
 - ・革新的量子デバイス構造(トポロジカル量子ビット構造)の理論的検討
 - ・革新的量子デバイス機能(トポロジカル量子ビット性能)の理論的検討
 - ・革新的量子デバイス技術(トポロジカル量子ビット操作)の理論的検討

【代表的な原著論文情報】

[1] “Evidence for a Higher-order Topological Insulator in a Three-dimensional Material”, R. Noguchi, M. Kobayashi, Z. Jiang, K. Kuroda, T. Takahashi, Z. Xu, D. Lee, M. Hirayama, M. Ochi, T. Shirasawa, P. Zhang, C. Lin, C. Bareille, S. Sakuragi, H. Tanaka, S. Kunisada, K. Kurokawa, K. Yaji, A. Harasawa, V. Kandyba, A. Giampietri, A. Barinov, T.K. Kim, C. Cacho, M. Hashimoto, D. Lu, S. Shin, R. Arita, K. Lai, T. Sasagawa, T. Kondo, Nature Materials 20, 473 (2021).

[2] “Pair Density Wave at High Magnetic Fields in Cuprates with Charge and Spin Orders”, Z. Shi, P.G. Baity, J. Terzic, T. Sasagawa, and D. Popović, Nature Commun. 11, 3323 (2020).

[3] “Switching of Band Inversion and Topological Surface States by Charge Density Wave” N. Mitsuishi, Y. Sugita, M. S. Bahramy, M. Kamitani, T. Sonobe, M. Sakano, T. Shimojima, H. Takahashi, H. Sakai, K. Horiba, H. Kumigashira, K. Taguchi, K. Miyamoto, T. Okuda, S. Ishiwata, Y. Motome, and K. Ishizaka, Nature Commun. 11, 2466 (2020).

[4] “Single-surface Conduction in a Highly Bulk-resistive Topological Insulator $\text{Sn}_{0.02}\text{Bi}_{1.08}\text{Sb}_{0.9}\text{Te}_2\text{S}$ using the Corbino Geometry” T. Misawa, S. Nakamura, Y. Okazaki, Y. Fukuyama, N. Nasaka, H. Ezure, C. Urano, N.-H. Kaneko, and T. Sasagawa, Appl. Phys. Lett. 118, 033102 (2021).

[5] “Unusual Superconducting Proximity Effect in Magnetically Doped Topological Josephson Junctions”, R. Yano, M. Koyanagi, H. Kashiwaya, K. Tsumura, H. T Hirose, Y. Asano, T. Sasagawa, and S. Kashiwaya, J. Phys. Soc. Jpn 89, 034702 (2020).