

トポロジカル材料科学と革新的機能創出
2019 年度採択研究者

2020 年度 年次報告書

Le Duc Anh

東京大学 大学院工学系研究科
助教

強磁性半導体を用いたトポロジカル超伝導状態の実現

§ 1. 研究成果の概要

強磁性半導体を用いたトポロジカル超伝導状態の実現に向けて、超伝導体 Al/強磁性半導体 (In,Fe)As 及び超伝導体 Al/ InAs/強磁性半導体(Ga,Fe)Sb のヘテロ接合を超高真空一貫で結晶成長を行い、高品質な単結晶膜とヘテロ界面が作製できた。次に Al/強磁性半導体/Al の横型 Josephson 接合(ギャップ長が 50nm)を作製し、390 mK において超伝導近接効果を観測できた。また、Josephson 接合のチャンネルを担う材料候補の強磁性半導体(In,Fe)As や(Ga,Fe)Sb を角度分解光電子分光で調べて、バンド構造を初めて明瞭に観測できることより強磁性発現機構の解明とバンドのトポロジーに関する新しい知見が得られた。

更に、InAs に Fe を 2 次元原子層に添加し FeAs/InAs 超格子構造の作製に成功した。この構造が強磁性を示し、外部磁場下で 500%も巨大磁気抵抗効果を実現できた。強磁性転移温度が FeAs 層間距離の 3 乗に反比例し、RKKY 相互作用が強磁性状態を発現させることを示唆した。本構造は超伝導体との Josephson 接合において有望な強磁性半導体チャンネルと期待できる。

次に、トポロジカル材料として有望である α -Sn の結晶成長とトポロジカル物性を解明した。分子線エピタキシー装置を用いて InSb (001) 基板上に成長した α -Sn が良好なダイヤモンド型単結晶構造を示し、InSb との界面が原子レベルで平坦である。このような高品質の α -Sn において明瞭な量子振動が観測でき、 α -Sn のトポロジカル表面バンドと重い正孔バンドの量子移動度がそれぞれ $30,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ と $1700 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ と初めて定量的に評価でき、先行研究の結果より 10 倍高い値を実現した。この結果から α -Sn はトポロジカル Dirac 半金属であることを初めて量子伝導現象で証明できた。

【代表的な原著論文情報】

- 1) M. Kobayashi, Le Duc Anh, J. Minár, W. Khan, S. Borek, P. N. Hai, Y. Harada, T. Schmitt, M. Oshima, A. Fujimori, M. Tanaka, and V. N. Strocov, "Minority-Spin Impurity Band in n-Type (In,Fe)As: A Materials Perspective for Ferromagnetic Semiconductors", *Phys. Rev. B* 103, 115111(2021).
- 2) T. Takeda, M. Suzuki, Le Duc Anh, N. T. Tu, T. Schmitt, S. Yoshida, M. Sakano, K. Ishizaka, Y. Takeda, S. Fujimori, M. Seki, H. Tabata, A. Fujimori, V. N. Strocov, M. Tanaka, and M. Kobayashi, "Hybridization between the ligand p band and Fe-3d orbitals in the p-type ferromagnetic semiconductor (Ga,Fe)Sb", *Phys. Rev. B* 101, 155142 (2020).
- 3) Takahito Takeda, Shoya Sakamoto, Kohsei Araki, Yuita Fujisawa, Le Duc Anh, Nguyen Thanh Tu, Yukiharu Takeda, Shin-ichi Fujimori, Atsushi Fujimori, Masaaki Tanaka, and Masaki Kobayashi, "Evolution of the Fe-3d impurity band state as the origin of high Curie temperature in p-type ferromagnetic semiconductor (Ga,Fe)Sb", *Phys. Rev. B* 102, pp.1-8, 245203 (2020).
- 4) Le Duc Anh, Taiki Hayakawa, Kohei Okamoto, Nguyen Thanh Tu, Masaaki Tanaka, "Transport and magnetic properties of co-doped ferromagnetic semiconductor (In,Fe,Mn)As",

Appl. Phys. Express 13, 083005 (2020).