

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

2021 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

本年度では、InAs/(Ga,Fe)Sb の非磁性/強磁性半導体二層構造の結晶成長技術を最適化して結晶性と電子キャリアの移動度を大幅に向上させたことにより、InAs の 2 次元電子ガスの Shubnikov - de Haas (SdH)振動を鮮明に観測できるようになった。InAsチャンネルの電子濃度をゲート電圧で制御しながら SdH 振動の測定と解析により、(Ga,Fe)Sb からの近接効果によるInAsのスピン分裂したフェルミ面を観測することに初めて成功した。驚いたことに、InAs 量子井戸の量子ホール効果も観測できるようになり、整数と半整数の量子ホール効果が現れることが分かった。半整数量子ホール状態はグラフェンやトポロジカル絶縁体など、線形分散を持つ Dirac 電子系で理論予測されているが、InAs のような半導体で観測されたのは初めての例である。

さらに、(Ga,Fe)Sb から非磁性半導体 InAs への磁気近接効果のメカニズムの解明に関する成果もあった。我々が InAs に Ga を混ぜた $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}/(\text{Ga,Fe})\text{Sb}$ ($x = 0, 5, 7.5, 10\%$)の構造を持つ試料の近接磁気抵抗を調べて、Ga の添加によるキャリアの有効質量、波動関数の浸みだしの変化などに対する磁気近接効果の依存性を評価した。この結果で初めて(Ga,Fe)Sb と InAs 界面における磁気近接効果がキャリア濃度と波動関数の浸みだしの 2 つの物理量で支配されることを明らかにした。

一方、分子線エピタキシー装置を用いて InSb(001)基板上に強磁性半導体(In,Fe)Sb/トポロジカル Dirac 半金属 α -Sn ヘテロ構造の結晶成長を行った。透過型電子顕微鏡(TEM)で結晶性を評価した結果、(In,Fe)Sb/ α -Sn 界面において高品質な単結晶構造の作製に成功した。(In,Fe)Sb はキュリー温度が 300K 以上の良好な強磁性半導体になることも確認できた。(In,Fe)Sb 上の α -Sn において時間反転対称性と空間反転対称性が破れているため、これに伴う新しい磁気伝導現象も観測できた。本成果は高感度磁気センサーとしてとして期待されている。また、トポロジカル Dirac 半金属 α -Sn と超伝導体とのヘテロ接合の新しい作製方法も開発でき、Sn ベースプレーナ型 Josephson 接合の作製に成功した。

【代表的な原著論文情報】

- 1) K. Takiguchi, K. Okamura, **L. D. Anh**, M. Tanaka, “Gate-controlled proximity magnetoresistance in $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}/(\text{Ga,Fe})\text{Sb}$ bilayer heterostructures”, *Phys. Rev. B* (2022), *in press*).
- 2) **Le Duc Anh**, Taiki Hayakawa, Yuji Nakagawa, Hikari Shinya, Tetsuya Fukushima, Hiroshi Katayama-Yoshida, Yoshihiro Iwasa, and Masaaki Tanaka, “Ferromagnetism and giant magnetoresistance in zinc-blende FeAs monolayers embedded in semiconductor structures”, *Nature Communications* **12**, pp.4201/1-10 (2021).
- 3) Karumuri Sriharsha, **Le Duc Anh**, and Masaaki Tanaka, “Ferromagnetic Fe-doped InAs quantum dots with high Curie temperature”, *Appl. Phys. Express* **14**, pp.083002/1-4 (2021).
- 4) Tomoki Hotta, Kengo Takase, Kosuke Takiguchi, Karumuri Sriharsha, **Le Duc Anh**, and Masaaki Tanaka, “Growth and characterization of quaternary-alloy ferromagnetic

semiconductor (In,Ga,Fe)Sb”, AIP Advances **12**, pp.015307/1-6 (2022).

- 5) **Le Duc Anh**, Kengo Takase, Takahiro Chiba, Yohei Kota, Kosuke Takiguchi, and Masaaki Tanaka, “Elemental topological Dirac semimetal α -Sn with high quantum mobility”, Advanced Materials **33**, pp.2104645/1-9 (2021). Selected as Frontispiece Article.
- 6) Nguyen Thanh Tu, Tomohiro Otsuka, Yuto Arakawa, **Le Duc Anh**, Masaaki Tanaka, and Pham Nam Hai, “Spin transport in fully ferromagnetic p-n junctions”, J. Appl. Phys. **131**, pp.013902/1-14 (2022).