

## 「強磁性半導体を用いたトポロジカル超伝導状態の実現」

研究期間：2020年4月～2023年3月（3年間）

研究者：Le Duc Anh（東京大学大学院工学系研究科）

## 1. 研究のねらい

本研究は超伝導体/トポロジカル材料/Fe系強磁性半導体ヘテロ接合を作製し、熟成した半導体材料プラットフォームに強磁性、トポロジカル物性と超伝導性を融合することを目指す。このようなAll-in-one材料プラットフォームにおいて新しいトポロジカル性質の創発と制御、外部磁場を要しない電気的手段による制御方法を開拓することを目的としている。開発したトポロジカル超伝導/半導体材料によってトポロジカル超伝導状態を含め様々な新しいトポロジカル物性を創出し、次世代エレクトロニクスに適するトポロジカルデバイスへの応用および大規模量子演算回路に適したマジョラナフェルミオン状態の創出と制御の基盤技術を確立する。

## 2. 研究成果

## (1) 概要

本研究では、Feを添加した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/半導体・半金属/強磁性半導体ヘテロ接合を超高真空一貫で結晶成長を行い、その結晶構造、基本物性およびトポロジカル伝導現象を調べた。

Feドープ強磁性半導体は分子線エピタキシー成長装置（MBE）を用いてInAs, GaSb, InSbのような狭ギャップ半導体へ大量のFeを添加することにより作製される新しい強磁性半導体材料系である。本研究でまずトポロジカル超伝導状態の実現に相応しいFeドープ強磁性半導体の結晶成長及び物性制御の研究を進めた。既存のN型(In,Fe)AsとP型(Ga,Fe)Sbの電子状態を角度分解光電子分光法で測定しフェルミエネルギー以下の伝導帯、価電子帯およびFe関連の不純物帯を初めて明瞭に観測でき、バンド構造から強磁性発現機構を解明した。次に、P型(Ga,Fe)SbとN型(In,Fe)Sbの中間の材料である4元混晶(In,Ga,Fe)Sbを開発した。(In,Ga,Fe)SbではGa濃度の制御により格子定数、バンド構造、磁気異方性などが広範囲で制御できる材料系であるため、後程のトポロジカルディラック半金属 $\alpha$ -Snや超伝導体とのヘテロ接合構造の作製に好都合である。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。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、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移動度( $\sim 3000$  cm<sup>2</sup>/Vs)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のスピンスプリットしたフェルミ面を観測することに初めて成功した。さらに、本構造において磁場の方向を反転する時にInAsの抵抗が27%も変化した大きな奇関数磁気抵抗効果を発見した。

次に、トポロジカルディラック半金属 $\alpha$ -Snのエピタキシャル結晶成長とトポロジカル物性を解明した。MBEを用いてInSb(001)基板上に成長した $\alpha$ -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 $\alpha$ -Snにおいて明瞭な量子振動が観測でき、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 cm<sup>2</sup>/Vsと1800 cm<sup>2</sup>/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。

## (2) 詳細

### I-1&I-2. 超伝導体/(In,Fe)As あるいは超伝導体/InAs/(Ga,Fe)Sb の結晶成長、量子細線の作製および超伝導状態の制御

本テーマでは、①強磁性半導体(In,Fe)As や InAs/(Ga,Fe)Sb の上に超伝導体を成長して高品質の結晶界面の作製、②これらのヘテロ構造においてナノスケールの Josephson 接合の作製、③強磁性半導体チャンネル中の超伝導状態の観測と制御、という 3 つの課題がある。我々が分子線エピタキシー成長装置 (MBE) を用いて (In,Fe)As と InAs/(Ga,Fe)Sb の上に単結晶 Al の成長に成功した。半絶縁 GaAs(001) 基板の上に強磁性半導体 (In,Fe)As (Fe を 8% 添加) または InAs/(Ga,Fe)Sb (Fe を 20% 添加) のヘテロ接合を 250°C で低温成長した。そして液体窒素を流して基板温度を零度以下に冷やしてから Al 膜 (膜厚 20 nm) を成長した。透過型電子顕微鏡 (TEM) で観測した Al(20 nm)/(In,Ga)As (3 nm)/(In,Fe)As ヘテロ界面の格子像から、Al 層も含めて全構造で単結晶の成長ができたことが分かる。上記の結果、InAs/(Ga,Fe)Sb ヘテロ接合に関しても同様な結果が得られている。強磁性半導体と超伝導 Al の界面にある (In,Ga)As の結晶を成長温度や As フラックスで最適化する必要がある。

一方、強磁性半導体 (In,Fe)As や (Ga,Fe)Sb のバンド構造の特徴を解明する必要がある。我々が角度分解光電子分光 (ARPES) を利用して、N 型 (In,Fe)As ではフェルミレベルが伝導帯の中に存在し、伝導帯の直下に形成される Fe の不純物帯と強く相互作用してスピン分裂することを初めて証明できた。電子キャリアが伝導帯に存在するため有効質量が小さく、コヒーレンス性が高い。このスピン分裂した伝導帯のスピン軌道相互作用と超伝導体による近接効果を利用してマヨラナフェルミオンの実現に適している。

### I-3: 新規強磁性半導体材料構造の開発:

更に、図1に示すように、InAs 結晶の中に同じ構造の閃亜鉛鉱構造の FeAs の単原子層を一定の間隔で挿入する FeAs/InAs 超格子構造の結晶成長に成功した。結晶中のキャリアを介して FeAs 層間の RKKY 相互作用と同じ FeAs 層内の Fe-Fe 超交換相互作用によって強い強磁性が成立されること、そして 500% の巨大磁気抵抗効果を初めて実証した (図1 d)。その結果、系の強磁性転移温度 (キュリー温度  $T_C$ ) が FeAs 層間の間隔の 3 乗に反比例する傾向も判明した。この構造は電子キャリアの不純物散乱を軽減することが可能なため、超伝導体との Josephson 接合において超伝導近接効果が起こりやすい強磁性半導体チャンネルとして期待できる。(代表論文1)

一方、P 型 (Ga,Fe)Sb と N 型 (In,Fe)Sb の中間の材料である 4 元混晶 (In,Ga,Fe)Sb を開発した。Ga 濃度の制御により格子定数 (0.61 - 0.64 nm)、バンド構造、磁気異方性などが広範囲で制御できる材料系である。後述するように (In,Ga,Fe)Sb の上に  $\alpha$ -Sn を成長すれば、Sn にかかるひずみを制御できること及び磁気近接効果が起こることが期待される。半絶縁 GaAs (001) 基板の上に (In<sub>0.94-x</sub>Ga<sub>x</sub>Fe<sub>0.06</sub>)Sb (Ga 濃度  $x = 0 - 30\%$ ) を 15 nm で成長した。これらの結晶構造は透過型電子顕微鏡で母材の閃亜鉛鉱構造が保たれることを確認した。Ga 濃度を増大させると (In,Ga,Fe)Sb の格

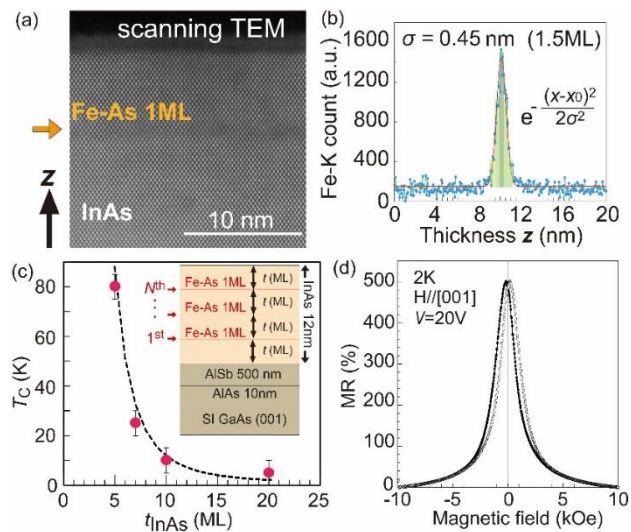


図1. a) InAs 中の FeAs 単原子層の STEM 格子像。b) EDX による成長方向の Fe 分布の測定結果。(c) FeAs/InAs 超格子の  $T_C$  の層間距離の依存性 (インセット: 試料構造、 $N$  が FeAs の層数、 $t$  が InAs 原子層で表される層間距離)。(d)  $t = 5$  と  $N = 7$  の試料で観測した巨大磁気抵抗効果。

子定数が Vegard 則に従って線形に減少し、Ga 濃度が 10%以下では試料が N 型伝導、20%以上では P 型伝導を示すことも判明した。この特徴は全強磁性半導体で構成する PN 接合の作製にとっても有利である。キュリー温度  $T_C$  が Fe が 6%の場合では 40–110K で、16%の場合では室温を超えることも確認した。

#### I-4. (I-2 から発展した内容) InAs/(Ga,Fe)Sb ヘテロ接合における新規量子輸送現象

図 2 に示すように、InAs/(Ga,Fe)Sb の二層構造において(Ga,Fe)Sb からの磁気近接効果によって InAs の電子状態にスピン分裂が発生し、外部のゲート電圧によってスピン分裂エネルギーが制御されることは我々の先行研究によって明らかになった[Nature Phys. 15, 1134 (2019)]. 本研究ではこの二層構造において磁場を面直方向にかけると、磁場方向の正負反転に伴う非常に大きな奇関数磁気抵抗(室温で磁場 10T をかける時 27%の抵抗変化)も初めて観測した。この結果は InAs のエッジ伝導で時間反転と空間反転対称性が同時に敗れることに起因することが明らかになり、高感度磁気センサーに繋がると期待できる(代表論文3)。一方、(Ga,Fe)Sb からの磁気近接効果のメカニズムを解明するために、InAs に Ga を混ぜた  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}/(\text{Ga,Fe})\text{Sb}$  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(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長の 2 つの物理量で支配されることを明らかにした。

さらに、我々は InAs/(Ga,Fe)Sb の結晶性と移動度を向上させられたことにより、InAs の 2 次元電子ガスから Shubnikov - de Haas (SdH)振動および量子ホール効果を鮮明に観測できるようになった。InAsチャ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、近接効果によるInAsのスピン分裂したフェルミ面を SdH の 2 つの振動成分として観測することに成功した。本結果より InAs 量子井戸のスピン分裂が $\sim 6\text{meV}$  程度分裂し、ゲート電圧によって大幅に制御できることが明らかになった。

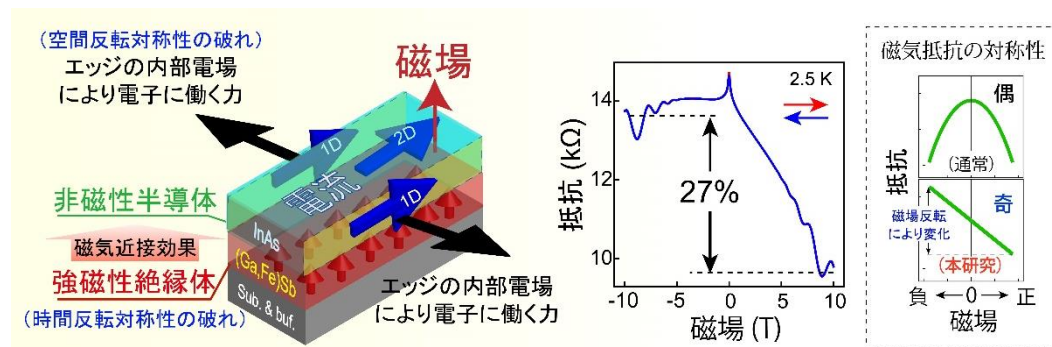


図 2. InAs/(Ga,Fe)Sb ヘテロ接合で観測した新しい磁気抵抗効果。磁場の偶関数と奇関数成分が共存。

## II. $\alpha$ -Sn ベーストポロジカル材料構造のエピタキシャル成長とトポロジカル物性

$\alpha$ -Sn はトポロジカル絶縁体、トポロジカル Dirac 半金属をはじめ、豊かなトポロジカル相図を持つ数少ない単元素材料である。 $\alpha$ -Sn はダイヤモンド構造を持って InSb と格子定数が近いので、本研究では MBE 法を用いて InSb (001) 基板上に高品質の  $\alpha$ -Sn の作製およびそのトポロジカル性質を量子振動測定と第一原理計算を用いて解明することに成功した(図 3a)。磁場下の電気伝導測定は図 3b の方に示して、低温(2K)では 0.3T の低磁場から明瞭な Shubnikov - de Haas (SdH) 振動が観測できた。SdH 振動の解析より、 $\alpha$ -Sn のトポロジカル表面バンドと重い正孔バンドが観測でき、それらの量子移動度が  $30,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  と  $1800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  と初めて定量的な評価に成功した。これらの移動度は先行研究の結果より 10 倍高く、我々が成長した  $\alpha$ -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から証明できた。(代表論文2)

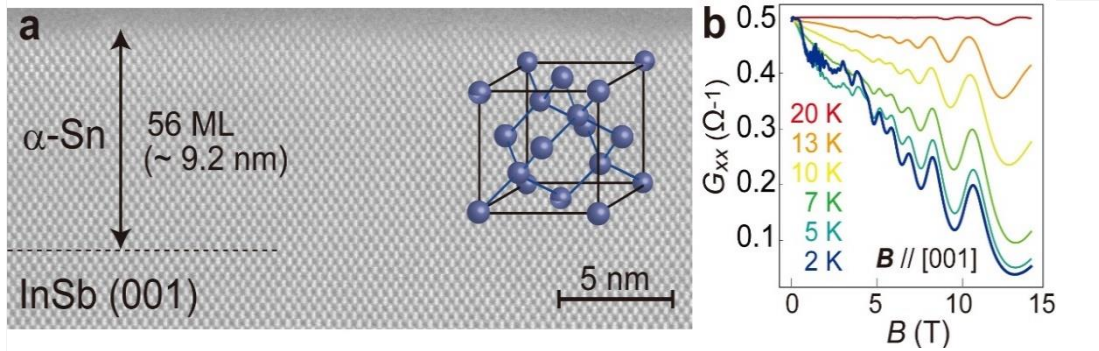


図 3. a) 透過型電子顕微鏡による  $\alpha$ -Sn の結晶構造の評価結果。b)  $\alpha$ -Sn で観測した Shubnikov - de Haas 振動。2K から 20K まで明瞭な振動が見えた。

### 3. 今後の展開

トポロジカル材料と物性は世界で盛んに行われる。様々な新材料や物性が次々に報告されているが、理解が未熟な材料が多い。またトポロジカル超伝導を創出するために時間反転対称性の破れを導入する方法において、ゲート電圧という能動的な制御法の研究がほとんどない。本研究は我々が長年開発してきた Fe 系 FMS を元にして、①熟成した半導体技術との良い整合性と②強磁性状態のゲート電圧による高い制御性というこの材料系の 2 つの大きな特徴をトポロジカル材料に活かす。この新規な材料融合は本研究の独創的な内容であり、挑戦的な内容でもある。

超伝導体/Fe 系強磁性半導体ヘテロ材料構造の研究テーマにおいて、高品質材料ヘテロ構造を超高真空一貫で成長でき、およびナノ細線やジョセフソン接合の作製まで行ってきた。しかし、強磁性半導体上で成長された超伝導 Al のラフネス、単結晶性の改善、超伝導体/半導体界面に(In,Ga)As などスペース層の導入によって超伝導近接効果の制御、Josephson 接合の超伝導結合特性をより明瞭に観測する必要がある。またゲート電圧によってこれらの接合の超伝導状態の制御およびマヨラナフェルミオンの有無を確認するために解決しなければいけない課題が山積みである。これらの課題は今後、さきがけ研究で整備した結晶成長装置システムと極低温測定環境によって解決したい。

また、InAs/(Ga,Fe)Sb ヘテロ接合で観測した巨大奇関数磁気抵抗効果は当初予期しなかった研究の新展開である。巨大奇関数磁気抵抗効果は広い磁場範囲での好感度磁気センサーとして有望である。今後はその起源の解明と制御方法の確立が重要であろう。

一方、 $\alpha$ -Sn についての研究は理論計算が多いが、実験の報告が少ない。本研究は非磁性 InSb 基板と Fe 系強磁性半導体の絶縁性と格子整合によってこれまでうまく測定できなかった  $\alpha$ -Sn のトポロジカル伝導特性に容易にアクセスできた。しかも Fe 系 FMS の磁化による時間反転対称性破れの導入で  $\alpha$ -Sn の新しいトポロジカル相(トポロジカル Weyl 半金属)とその未知の物理を開拓する道を開ける。 $\alpha$ -Sn が単元素半導体で不純物ドーピングや組成乱れの影響がなく、バルクのギャップが室温の熱エネルギーより大きいこと、トポロジカル表面状態による量子異常ホール効果や MF 状態を遥かに高温で実現できる、大変価値のある材料である。逆に、 $\alpha$ -Sn に電流を流せば大きなスピン軌道相互作用より Fe 系 FMS へ強いトルクを発生させ磁化方向を反転することも原理的に可能である。これによって、all-electric で動作可能なトポロジカルデバイスの概念も本構造より初めて提唱できる。

### 4. 自己評価

本研究では、半導体に「強磁性」「超伝導」「トポロジー」という新しい要素を融合するという非常に挑戦的かつ野心的な研究を行っており、材料工学、固体物理学、磁気物性、超伝導物性、トポロジカル物性など多くの分野のフロンティアを開拓しているため学術的貢献が大きい

と言える。当初で計画した内容の中で、超伝導体/Fe 系強磁性半導体ヘテロ材料構造の研究テーマにおいて、高品質材料ヘテロ構造およびナノ細線やジョセフソン接合の作製まで行ってきたがトポロジカル超伝導状態の創出と制御まで至っていない。しかし、超高真空一貫でエピタキシャル結晶成長技術の開発成果によって強磁性体、超伝導体など材料科学への進歩をもたらした。今後、さきがけ研究で整備した結晶成長装置システムと極低温測定環境によってトポロジカル超伝導状態を実証するデバイスまで引き続き進めていきたい。

一方、上記の材料開発過程によってさまざまな予期せず新規なトポロジカル物性が発見できたことは興味深い。InAs/(Ga,Fe)Sb で発見した巨大奇関数磁気抵抗効果は以前観測した類似の磁気抵抗効果に比べて大きさも磁場範囲も優れており、トポロジカル磁気センサーとして応用性が高いのみならず、主要な半導体においても時間反転や空間反転対称性が破れることによって巨大磁気応答が誘発できること自体が大きな意味を持つ。

Sn 材料構造のテーマは予定通りに順調に実施でき、当初予期しなかった新しい成果も多く生み出した。われわれの結晶成長技術を駆使することにより、これまでにない高品質のトポロジカルディラック半金属  $\alpha$ -Sn 薄膜の作製に成功し、そのトポロジカル物性の真相を色々明らかにした。今後も広く応用されると期待している。

これまでの研究成果により、新しい強磁性半導体を開発、従来の理論で定着していた従来の考え方を覆す性質を発見し、次々と新しいナノ構造、物性、機能を実現するなど、スピントロニクス分野の理論と応用の両面の研究を大きく前進させた。又、強磁性半導体中の超伝導の観測は先行の理論と実験が殆ど無いため、半導体技術や物性科学の新分野を開拓する重要な研究成果である。本研究成果を通じて半導体技術に電子の「スピン」、クーパー対の「位相」の自由度を組み込むことによって、高感度磁気センサー、不揮発性メモリや再構成可能な論理回路、量子演算や量子位相メモリデバイスなど、今後の産業技術に応用できる新しい「種」を多く創出し、これらの基礎技術を発展させることにより、日本の半導体産業の再生と将来の発展に大きく貢献できると期待される。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 代表的な論文(原著論文)発表

#### 研究期間累積件数:23件 (3-1のリストを参照)

<p>1. <b>Le Duc Anh*</b>, 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", <i>Nature Communications</i> <b>12</b>, pp.4201/1-10 (2021). (*corresponding author)</p>
<p>Fe-As 正四面体結合からなる結晶構造は、その結合の分布(密度と形状)によって高温超伝導から高温強磁性まで様々な重要な量子物性が確認され注目されている。本研究では低温分子線エピタキシー結晶成長法により、初めて InAs 中に等間隔で母材の結晶構造を保ちながら FeAs 単原子層を埋め込んだ超格子構造を作製することに成功した。この構造では Fe-As 結合が非常に高密度に分布されるため、超格子構造全体が強磁性状態となり、すべての Fe 原子が最大に近い <math>5 \mu_B</math> の大きな磁気モーメントを持ち、超格子構造の電気抵抗が磁場によって 500%も変化する巨大磁気抵抗効果が発現することを発見した。</p>
<p>2. <b>Le Duc Anh*</b>, Kengo Takase, Takahiro Chiba, Yohei Kota, Kosuke Takiguchi, Masaaki Tanaka*, "Elemental topological Dirac semimetal <math>\alpha</math>-Sn with high quantum mobility", <i>Advanced Materials</i> <b>33</b>, 2104645 (2021). (*corresponding author)</p>
<p>トポロジカル・ディラック半金属(TDS)は、他の様々なトポロジカル相に転移できる親の相(parent phase)として重要な材料ですが、これまで実験で確認された例が非常に少ない。本研究では応募者らが TDS の一例である <math>\alpha</math>-Sn の世界最高品質と移動度(<math>\sim 30000 \text{ cm}^2/\text{Vs}</math>)を持つ薄膜の作製とそのトポロジカル物性の解明に成功した。<math>\alpha</math>-Sn は非常に強いスピン軌道相互作用を有しダイヤモンド型結晶構造をもつため、InSb など主要な半導体材料や多くの超伝導体に整合する。今後超伝導/<math>\alpha</math>-Sn/Fe 系 FMS (In,Fe)Sb のヘテロ接合において、FMS</p>

のスピンスプリットと  $\alpha$ -Sn のスピントラッキング相互作用を制御し、MF 状態の実現の材料プラットフォームとして期待される。

3. Kosuke Takiguchi, **Le Duc Anh\***, Takahiro Chiba, Harunori Shiratani, Ryota Fukuzawa, Takuji Takahashi and Masaaki Tanaka\*, "Giant gate-controlled odd-parity magnetoresistance in one-dimensional channels with a magnetic proximity effect", *Nature Comm.* **13**, 6538 (2022). (\*corresponding author)

非磁性半導体 InAs/強磁性半導体(Ga,Fe)Sb からなる二層ヘテロ接合を作製し、新しい電子伝導現象を発見した。通常物質では磁場を印加したときの電気抵抗の変化は磁場の向きを変えても全く同じですが、作製した半導体ヘテロ構造では外部磁場の向きを反転させると電気抵抗が 27%も変化する巨大な奇関数磁気抵抗効果を発見した。この新しい奇関数磁気抵抗は、非磁性半導体層の側面(エッジ)に形成される一次元伝導チャンネルにおいて発生し、①試料端(側面)の表面ポテンシャルによる「空間反転対称性の破れ」と②隣接する強磁性半導体からの磁気近接効果による「時間反転対称性の破れ」が同時に存在することに起因していることが判明した。この現象は、対称性の破れによる巨大電磁気応答がエレクトロニクスに整合性の良い半導体ヘテロ接合で現れたことに意義があり、高感度磁気センサなど次世代のスピントロニクスや量子デバイスに応用可能と考えられる。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 1 件(特許公開前のもも含む)

1	発 明 者	レデウックアイン、石原奎太、田中雅明
	発 明 の 名 称	回路素子およびその製造方法
	出 願 人	東京大学
	出 願 日	2023/01/10
	出 願 番 号	特願 2023-001989
	概 要	本発明ではすべてスズ(Sn)でできる超伝導トポロジカル半金属のプレーナ型ヘテロ接合の新しい作製技術を実証する。トポロジカル半金属 Sn( $\alpha$ -Sn)の膜面内に集束イオンビーム描画法を用いて部分的に加熱し超伝導体である Sn( $\beta$ -Sn)に相転移を起こすことによって、Sn 膜面内に nm 寸法まで超伝導トポロジカル半金属のヘテロ構造を自由自在に形成でき、大面積化や高集積化できる量子情報デバイスの実現に適した方法である。

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

3-1. 出版論文リスト

- [1] T. Endo, S. Tsuruoka, Y. Tadano, S. Kaneta-Takada, Y. Seki, M. Kobayashi, **L. D. Anh**, M. Seki, H. Tabata, M. Tanaka, and S. Ohya, "Giant Spin-Valve Effect in Planar Spin Devices Using an Artificially Implemented Nanolength Mott-Insulator Region", *Adv. Mater.* 2300110 (2023).
- [2] Akhil Pillai, Shobhit Goel, **Le Duc Anh\***, and Masaaki Tanaka\*, "Control of magnetic anisotropy by epitaxial strain in n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)Sb" *Phys. Rev. B* (2023, accepted)
- [3] Ryo Okano, Tomoki Hotta, Takahito Takeda, Kohsei Araki, Kengo Takase, **Le Duc Anh**, Shoya Sakamoto, Yukiharu Takeda, Atsushi Fujimori, Masaaki Tanaka, and Masaki Kobayashi, "Ferromagnetism induced by hybridization of Fe 3d orbitals with ligand InSb bands in the n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)Sb", *Phys. Rev. B* **107**, 205205 (2023).

- [4] Shobhit Goel, Nguyen Huynh Duy Khang, Yuki Osada, **Le Duc Anh**, Pham Nam Hai, and Masaaki Tanaka, "Room-temperature spin injection from a ferromagnetic semiconductor", *Sci. Rep.* **13**, 2181/1-9 (2023).
- [5] Kosuke Takiguchi, **Le Duc Anh**\*, Takahiro Chiba, Harunori Shiratani, Ryota Fukuzawa, Takuji Takahashi and Masaaki Tanaka\*, "Giant gate-controlled odd-parity magnetoresistance in one-dimensional channels with a magnetic proximity effect", *Nature Comm.* **13**, 6538 (2022). 📄 **Press release (Japanese):** 非磁性/強磁性半導体へテロ接合において磁場の向きを変えると符号が変わる巨大な磁気抵抗効果を発見
- [6] Kosuke Takiguchi, Kyosuke Okamura, **Le Duc Anh**\*, and Masaaki 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* **105**, 235202 (2022).
- [7] Takahito Takeda, Shoya Sakamoto, **Le Duc Anh**, Yukiharu Takeda, Shin-ichi Fujimori, Miho Kitamura, Koji Horiba, Hiroshi Kumigashira, Atsushi Fujimori, Masaaki Tanaka, and Masaki Kobayashi, "Development of magnetism in Fe-doped magnetic semiconductors: Resonant photoemission and x-ray magnetic circular dichroism studies of  $(\text{Ga,Fe})\text{As}$ ", *Phys. Rev. B* **105**, 195155 (2022).
- [8] N. T. Tu, T. Otsuka, Y. Arakawa, **L. D. Anh**, M. Tanaka, P. N. Hai, "Spin transport in fully ferromagnetic p-n junctions". *Journal of Applied Physics* **131**, 013902 (2022).
- [9] Tomoki Hotta, Kengo Takase, Kosuke Takiguchi, Karumuri Sriharsha, **Le Duc Anh** and Masaaki Tanaka, "Growth and characterization of quaternary-alloy ferromagnetic semiconductor  $(\text{In,Ga,Fe})\text{Sb}$ ", *AIP Advances* **12**, 015307 (2022). (Open Access)
- [10] **Le Duc Anh**, Kengo Takase, Takahiro Chiba, Yohei Kota, Kosuke Takiguchi, Masaaki Tanaka, "Elemental topological Dirac semimetal  $\alpha\text{-Sn}$  with high quantum mobility", *Advanced Materials* **33**, 2104645 (2021). DOI: 10.1002/adma.202104645. 📄 **Press release (Japanese):** 世界最高品質の単元素トポロジカル・ディラック半金属を実現
- [11] **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  $\text{FeAs}$  monolayers embedded in semiconductor structures", *Nature Communications* **12**, 4201 (2021). 📄 **Press release (Japanese):** 磁性元素を配列した強磁性超格子構造の作製と巨大磁気抵抗の実現～究極の原子層結晶成長法を駆使したスピントロニクス機能の実現へ新たな道～
- [12] Karumuri Sriharsha, **Le Duc Anh**, Masaaki Tanaka, "Ferromagnetic Fe-doped  $\text{InAs}$  quantum dots with high Curie temperature", *Appl. Phys. Express* **14**, pp.083002/1-4 (2021).
- [13] Masaki Kobayashi, **Le Duc Anh**, Masahiro Suzuki, Yukiharu Takeda, Shin-ichi, Fujimori, Masaaki Tanaka, Shinobu Ohya, and Atsushi Fujimori, "Alternation of Magnetic Anisotropy Accompanied by Metal-Insulator Transition in Strained Ultrathin Manganite Heterostructures", *Phys. Rev. Applied* **15**, 064019 (2021).
- [14] 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  $(\text{In,Fe})\text{As}$ : A Materials Perspective for Ferromagnetic Semiconductors", *Phys. Rev. B* **103**, 115111 (2021).
- [15] 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  $(\text{Ga,Fe})\text{Sb}$ ", *Phys. Rev. B.* **102**, pp.1-8, 245203 (2020).
- [16] Shingo Kaneta-Takada, Michihiro Yamada, Shoichi Sato, Shoma Arai, **Le Duc Anh**, Kohei Hamaya and Shinobu Ohya, "Enhancement of the spin Hall angle by interdiffusion of atoms in  $\text{Co}_2\text{FeAl}_{0.5}\text{Si}_{0.5}/\text{n-Ge}$  heterostructures", *Phys. Rev. Applied* **14**, 024096 (2020).
- [17] Karumuri Sriharsha, **Le Duc Anh**, Yuji Shimada, Takuji Takahashi, and Masaaki Tanaka, "Growth and characterization of ferromagnetic Fe-doped  $\text{GaSb}$  quantum dots with high Curie temperature", *APL Materials* **8**, pp.091107/1-7 (2020).

- [18] Kengo Takase, **Le Duc Anh**, Kosuke Takiguchi, and Masaaki Tanaka, "Current-in-plane spin-valve magnetoresistance in ferromagnetic semiconductor (Ga,Fe)Sb heterostructures with high Curie temperature", Appl. Phys. Lett. **117**, pp.092402/1-5 (2020).
- [19] **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).
- [20] 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).
- [21] S. Goel, **L. D. Anh**, S. Ohya, and M. Tanaka, "Temperature dependence of magnetic anisotropy in heavily Fe-doped ferromagnetic semiconductor (Ga,Fe)Sb", J. Appl. Phys. **127**, 023904 (2020)
- [22] Vu T. H. Huong, Dao T. T. Nguyet, Nguyen P. Duong, To T. Loan, S. Soontaranon, **L. D. Anh**, "Magnetic interactions and spin-wave stiffness constant of In-substituted yttrium iron garnets." Journal of Science: Advanced Materials and Devices (2020).
- [23] S. Sakamoto, Y. Nonaka, K. Ikeda, Zh. Chi, Y. Wan, M. Suzuki, A. Fujimori, **L. D. Anh**, P. N. Hai, Y. Takeda, Y. Saitoh, M. Kobayashi, M. Tanaka, Y. K. Wakabayashi, and H. Yamagami, "Magnetization process of the insulating ferromagnetic semiconductor (Al,Fe)Sb", Phys. Rev. B **101**, 075204 (2020).

### 3-2. 主要な学会発表

#### 国際学会

- [1]. (招待講演) **Le Duc Anh**, Kosuke Takiguchi, Takahiro Chiba, Masaaki Tanaka, "A new class of ferromagnetic semiconductors and quantum heterostructures", The Intermag 2023, Sendai (Japan), May 14-19, 2023.
- [2]. (招待講演) **Le Duc Anh et al.**, "New functionalities at oxide interfaces: Ultralow-power magnetization switching by orbital selection and high-mobility two-dimensional hole/electron transport", APS March Meeting 2021 (Online), 16 March 2021.
- [3]. (招待講演) **Le Duc Anh et al.**, "Emergent phenomena at oxide interfaces and their applications towards oxide-based electronics", International Workshop on Oxide Electronics (iWOE 27), Genoa, Italy, 10-13 Oct 2021.
- [4]. (招待、基調講演) **Le Duc Anh** "Fe-doped ferromagnetic semiconductors: New perspectives for spintronics and topological quantum electronics", Young Investigator MBE Award Talk, the 2022 International Conference on Molecular Beam Epitaxy (ICMBE), Sheffield, UK, 2022 Sep 09.
- [5]. (招待講演) **Le Duc Anh et al.**, "Epitaxial growth and topological transport properties of Sn-based quantum heterostructures", Superstripes 2023, Naples, Italy, Jun27-Jul 1 2023.(予定)
- [6]. **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/InAs superlattice structures", The 65<sup>th</sup> Annual Conference on Magnetism & Magnetic Materials – Florida, USA (Online), Nov. 3rd 2020 (Oral).
- [7]. Keita Ishihara, **Le Duc Anh**, Masaaki Tanaka, "In-situ growth and fabrication of planar ferromagnetic semiconductor-based Josephson junctions", APS March Meeting 2021 (Online), 16 March 2021.
- [8]. **Le Duc Anh**, Kengo Takase, Takahiro Chiba, Yohei Kota, Kosuke Takiguchi, and Masaaki Tanaka, "Epitaxial Growth and Quantum Transport of High-Mobility Elemental Topological Dirac Semimetal  $\alpha$ -Sn", 21st International Conference on Molecular Beam Epitaxy, Virtual Conference, Mexico, September 6-9, 2021.
- [9]. S. Goel, N. H. D. Khang, **L. D. Anh**, P. N. Hai, and M. Tanaka, "Room-temperature spin injection and spin-to-charge conversion in a ferromagnetic semiconductor / topological



- insulator heterostructure", 21st International Conference on Molecular Beam Epitaxy, Virtual Conference, Mexico, September 6-9, 2021.
- [10]. **Le Duc Anh**, Theodoros J. Wijaya, Shingo Kaneta-Takada, Munetoshi Seki, Hitoshi Tabata, Masaaki Tanaka, and Shinobu Ohya, "Field-effect transistor based on two-dimensional carrier gas at the FeOy/SrTiO3 interface", Joint International Conferences of The 24th International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems (EP2DS-24) and The 20th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS-20), online, October 31 - November 5, 2021.
- [11]. **Le Duc Anh**, Kengo Takase, Takahiro Chiba, Yohei Kota, Kosuke Takiguchi, and Masaaki Tanaka, "Elemental topological Dirac semimetal  $\alpha$ -Sn with high quantum mobility", Joint International Conferences of The 24th International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems (EP2DS-24) and The 20th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS-20), online, October 31 - November 5, 2021.
- [12]. Nguyen Thanh Tu, Pham Nam Hai, **Le Duc Anh**, and Masaaki Tanaka, "Spin dependent transport characteristics in full ferromagnetic (In,Fe)Sb/(Ga,Fe)Sb p-n junctions", Joint International Conferences of The 24th International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems (EP2DS-24) and The 20th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS-20), online, October 31 - November 5, 2021.
- [13]. S. Goel, N. H. D. Khang, **L. D. Anh**, P. N. Hai, and M. Tanaka, "Room-temperature spin injection and spin-to-charge conversion in a ferromagnetic semiconductor / topological insulator heterostructure", Joint International Conferences of The 24th International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems (EP2DS-24) and The 20th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS-20), online, October 31 - November 5, 2021.
- [14]. Kosuke Takiguchi, **Le Duc Anh**, Takahiro Chiba, Kyosuke Okamura, Harunori Shiratani, Ryota Fukuzawa, Takuji Takahashi, and Masaaki Tanaka, "Gate-controlled giant proximity magnetoresistance and odd-parity magnetoresistance in semiconductor-based nonmagnetic (InAs) / ferromagnetic (GaFeSb) heterostructures", Joint International Conferences of The 24th International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems (EP2DS-24) and The 20th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS-20), online, October 31 - November 5, 2021.
- [15]. M. Kobayashi, **Le Duc Anh**, J. Minar, W. Khan, S. Borek, P. N. Hai, Y. Harada, T. Schmitt, M. Oshima, A. Fujimori, M. Tanaka, V. N. Strocov, "Minority-Spin Impurity Band in n-Type (In,Fe)As: A Materials Perspective for Ferromagnetic Semiconductors", Joint International Conferences of The 24th International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems (EP2DS-24) and The 20th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS-20), online, October 31 - November 5, 2021.
- [16]. Takahito Takeda, Shoya Sakamoto, **Le Duc Anh**, Yukiharu Takeda, Shin-ichi Fujimori, Miho Kitamura, Koji Horiba, Hiroshi Kumigashira, Atsushi Fujimori, Masaaki Tanaka, and Masaki Kobayashi, "Onset of ferromagnetism in Fe-doped magnetic semiconductors depending on the occupation of the impurity band by electrons", Joint International Conferences of The 24th International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems (EP2DS-24) and The 20th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS-20), online, October 31 - November 5, 2021.
- [17]. Ryo Okano, Tomoki Hotta, Takahito Takeda, Kohsei Araki, Kengo Takase, **Le Duc Anh**, Shoya Sakamoto, Yukiharu Takeda, Atsushi Fujimori, Masaaki Tanaka, and Masaki Kobayashi, "Hybridization of Fe 3d orbitals with the host InSb bands in n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)Sb", Joint International Conferences of The 24th International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems (EP2DS-24) and The 20th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS-20), online, October 31 - November 5, 2021.
- [18]. **Le Duc Anh**, Kengo Takase, Chiba, Takahiro Chiba, Yohei Kota, Kousuke Takiguchi, and Masaaki Tanaka, "Elemental Topological Dirac Semimetal  $\alpha$ -Sn with High Quantum Mobility", 15th Joint MMM-INTERMAG Conference (2022 Joint), A Hybrid Conference | Based in New Orleans, USA, January 10-14 2022.

- [19]. Kosuke Takiguchi, **Le Duc Anh**, Takahiro Chiba, Kyosuke Okamura, Harunori Shiratani, Ryota Fukuzawa, Takuji Takahashi, and Masaaki Tanaka, "Gate-controlled giant proximity magnetoresistance and odd-parity magnetoresistance in semiconductor-based nonmagnetic (InAs) / ferromagnetic (GaFeSb) heterostructures", 15th Joint MMM-INTERMAG Conference (2022 Joint), A Hybrid Conference | Based in New Orleans, USA, January 10-14 2022.

### 国内の招待講演

- [1]. **Le Duc Anh**, Nguyen Thanh Tu, 瀧口耕介, Pham Nam Hai, 田中雅明, "N-type and p-type ferromagnetic semiconductors: High Curie temperature and heterostructure devices", 2019 年応用物理学会秋季学術講演会「新しいスピントロニクス材料と物性」シンポジウム、北海道大学、2019 年 9 月 18-21 日。
- [2]. **Le Duc Anh**, "n 型および p 型 Fe 系強磁性半導体 – 高いキュリー温度の実現とヘテロ構造デバイスへの展開 –" 第 76 回スピントロニクス専門研究会「イマドキの磁性材料開発と理論設計」(オンライン)、2020 年 9 月 25 日。
- [3]. **Le Duc Anh**, N-type and P-type ferromagnetic semiconductors: A viable platform for topological quantum computing、応用物理学会 KOSEN SC & 九州大学 SC & 宇都宮大学 SC 共同開催 VR 学術講演会、2021 年 11 月 12 日。
- [4]. **Le Duc Anh**, スズ (Sn) ベース量子ヘテロ材料構造のエピタキシャル成長とトポロジカル輸送特性、Spin-RNJ2022 年度シンポジウム報告会、京都大学宇治キャンパス (3 月 20 日-21 日)。

### 3-3. 受賞

- [1]. Young Investigator MBE Award, 分子線エピタキシー国際会議 (International Conference on Molecular Beam Epitaxy, ICMBE 2022) 2022年9月3日.

### 3-4. 顕著な研究成果のプレスリリース、マスコミ・メディア報道など

- 1) <東大、東北大、JST のプレスリリース> **2021.7.9**: 磁性元素を配列した強磁性超格子構造の作製と巨大磁気抵抗の実現 ~ 究極の原子層結晶成長法を駆使したスピントロニクス機能の実現へ新たな道~。日本経済新聞、Optronics Online を含めて多くメディアに報道された。  
([https://www.t.u-tokyo.ac.jp/foe/press/setnws\\_202107091127413335199590.html](https://www.t.u-tokyo.ac.jp/foe/press/setnws_202107091127413335199590.html)).
- 2) <東大、福島高専、JST のプレスリリース> **2021 年 10 月 7 日**: 世界最高品質の単元素トポロジカル・ディラック半金属を実現: 新しいトポロジカル電子材料と量子デバイス技術のプラットフォーム形成に道。日経電子版、Optronics Online、EE Times Japan などマスコミでも報道された。  
([http://www.t.u-tokyo.ac.jp/soe/press/setnws\\_201910070954562671915193.html](http://www.t.u-tokyo.ac.jp/soe/press/setnws_201910070954562671915193.html))
- 3) <東大、JST のプレスリリース> **2022 年 11 月 9 日**: 非磁性/強磁性半導体ヘテロ接合において磁場の向きを変えると符号が変わる巨大な磁気抵抗効果を発見—物質中の「対称性の破れ」による特異な電子伝導現象、次世代量子デバイスの可能性—。日経電子版、Optronics Online、EE Times Japan などマスコミでも報道された。  
(<https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/pr2022-11-10-001>)