

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：92704

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26287068

研究課題名(和文)電子-正孔複合量子井戸による量子スピンホール効果の実現

研究課題名(英文)Realization of quantum spin Hall effect in electron-hole composite quantum wells

研究代表者

鈴木 恭一 (Suzuki, Kyoichi)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・量子電子物性研究部・主任研究員

研究者番号：20393770

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：InAs/GaSb系半導体ヘテロ接合構造により人工的に形成された2次元トポロジカル絶縁体(TI)について、表面、裏面の両側からのゲート制御によりTI-半金属遷移を実現した。また、試料形状および電極配置を工夫し片側のみのエッジチャネル伝導を測定し、量子化伝導に非常に近い値を観測した。さらに、GaSbの代わりにInGaSbを使い、室温を超えるTIエネルギーギャップを実現した。

研究成果の概要(英文)：We have realized topological insulator (TI)-semimetal transition in InAs/GaSb semiconductor heterostructures by applying back and front gate voltages. In addition, we have succeeded in detecting the conductance very close to the quantized value using the sample with a specialized shape and an electrode arrangement. In InAs/InGaSb heterostructures instead of GaSb, we have observed the energy gap larger than the room temperature.

研究分野：半導体物理学

キーワード：トポロジカル絶縁体 半導体ヘテロ構造 量子スピンホール効果 量子化伝導

1. 研究開始当初の背景

物質をトポロジーの観点から分類する動きが盛んになり、トポロジカル絶縁体 (Topological Insulator, TI) という、従来の金属・半導体・絶縁体の枠組みには分類できない新しい物質の存在が明らかになってきた。TI は、スピン-軌道相互作用の強い材料系において、伝導帯と価電子帯のエネルギーが重複し、それらの混成により新たにバンドギャップが開いたエネルギーバンド構造をもつ。

その内部は、我々の存在する外界とはトポロジーの異なる絶縁状態となり、この絶縁状態は外界と連続的に接続することはできず、境界にトポロジーによって強固に保護された伝導チャンネルが現れる。この伝導チャンネルは3次元TIでは表面チャンネル、2次元TIではエッジチャンネルとなる。特に、2次元TIのエッジチャンネルは、ヘリカルと呼ばれる逆向きにスピン偏極した電子の対向した流れで構成され、量子力学的に後方散乱が禁制となるため伝導の量子化(量子スピンホール効果)が起こり、スピンドバイスや省電力デバイスとしての応用が期待される。また、2次元TIと超伝導体を接合することでマヨラナ粒子の生成が予測されており、量子コンピューティングにおける量子ビットとして期待されている。

3次元TIも含めて従来確認されていたTIは、産業的になじみが薄く、作製や取り扱いも非常に難しい材料であったが、最近になり半導体であるInAsとGaSbのヘテロ接合によって、より人工的な2次元TIが実現された。半導体を母材とするTIは、産業的に高度に発展している結晶成長技術や微細加工技術の適用が可能で、今後TIのさらなる物性解明やデバイス応用が期待される。

2. 研究の目的

本研究は、InAs/GaSbヘテロ接合による2次元TIを対象に、より安定したTI状態の実現と詳細な物性解明を目指し、以下を目的として行われた。

- (1)量子スピンホール効果、つまりより正確な量子化エッジチャンネル伝導の実現
- (2)エッジチャンネル伝導の詳細な解明
- (3)スピン注入・検出
- (4)超伝導体との接合によるマヨラナ粒子の生成
- (5)新材料の探索

3. 研究の方法

- (1)材料組成および層構造、半導体プロセス、伝導測定の最適化を行う。
- (2)電極のパターンや間隔の異なる試料について伝導測定を行う。また、基板-表面間に電界をかけ、伝導帯-価電子帯のエネルギー重複を変えた測定を行う。
- (3)磁性体電極、量子ポイントコンタクトまたはスピンホール効果を利用しスピン注入・検出を行う。
- (4)超伝導体としてNb電極を作製し、アンド

レーエフ反射および量子干渉パターンを解析する。

- (5)障壁層 (AlGaSb または GaSb) による伝導特性の違いを調べる。また GaSb 層の代わりに InGaSb 層を挿入し、伝導特性の違いを調べる。

4. 研究成果

(1)ゲートによるTI-半金属遷移の実現

代表的な2次元TIであるHgTe/HgCdTeヘテロ構造では、TIバンド構造を構成する伝導帯と価電子帯が同一のHgTe層に存在するため、伝導帯と価電子帯の重複の大きさはHgTeの井戸幅で決まり、外的に制御することはできない。それに対して、InAs/GaSbヘテロ構造ではInAs層の伝導帯とGaSb層の価電子帯でTIバンド構造を構成するため、外部からの電界により伝導帯と価電子帯の重複を制御できる。

我々は、基板をバックゲートとし、表面ゲートとの間に電圧をかけることで、電界により伝導帯-価電子帯の重複を制御しTI-半金属遷移を実現した。本結果は、TIデバイスに新たな機能性を付加する。[論文]

図1は試料の電極配置図で、電極6-1間、1-2間に周波数の異なる交流電流を同時に流し、3-4間、4-5間の電圧を周波数別に測定した。この方法は、異なる電流経路の非局所電圧比(または非局所抵抗比)の同時測定を可能とする。

図2は4-5間、3-4間の電圧比で、バックゲート( $V_{BG}$ )を(a)10V、(b)0Vに固定し、表

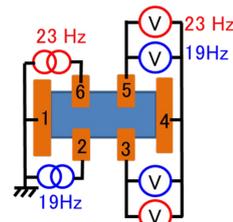


図1. 試料構造と電極配置。異なる周波数の交流電流を異なる電極間に同時に流し、各周波数に対応する非局所電圧比(例:電極4-5間と3-4間の電圧比)を同時に測定する。

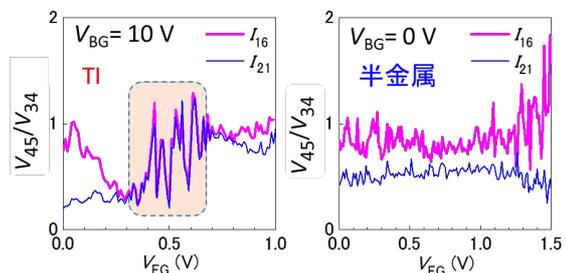


図2. 異なる電流経路に対する隣り合った非局所電圧の比。(a)  $V_{BG} = 10\text{ V}$ :一致した領域がTI状態。(b)  $V_{BG} = 0\text{ V}$ :一致しない(半金属状態)。

面ゲート ( $V_{FG}$ ) を掃引している。  $V_{BG} = 10V$  においては、  $V_{FG} = 0.5V$  付近で異なる電流経路の電圧比が完全に一致する。これは、試料内部が絶縁となり、伝導はTIのエッジチャンネルに支配されていることを示す。一方、  $V_{BG} = 0V$  では、電圧比は一致せず、試料内部つまりバルク領域に伝導があることを示し、半金属状態であることがわかる。

### (2) 単一エッジチャンネルの伝導特性解析

2次元TIで電気伝導を測定する場合、電流入力端子から注入された電流は、左回りと右回りに分かれてエッジチャンネルを流れ、電流出力端子に到達する。そのため、一般的な測定手法では単一のエッジチャンネル伝導を調べることは困難である。我々は、以下のような単一エッジチャンネルの伝導特性を調べる手法を考案し、その測定を行った。その結果、量子化伝導度に非常に近い伝導を観測した。本結果は、TI状態を示す一つの証拠であり、今後、電極間隔を変えることで、エッジチャンネルのコヒーレンス長を調べることが可能である。[論文]

試料は図3のような構造および電極配置をもつ。電流は端子番号2-5間に流し、3-4間の電圧を測定する。端子7-8側にもエッジチャンネルは存在するが、距離が非常に長いので途中で散乱に起因した抵抗が積算され、その

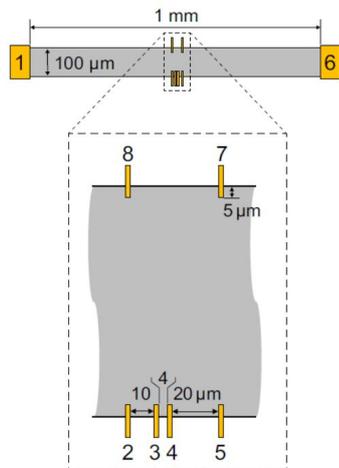


図3. 試料構造と電極配置。

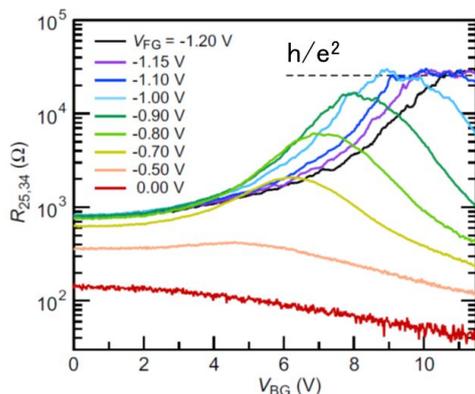


図4. 電極2-5間に電流を流し、3-4間の電圧を測定したときの抵抗 ( $R_{25,34}$ )。

伝導は無視できる。

この方法で端子3-4間の抵抗を測定した結果が図4である。この測定では、研究成果(1)とは逆に  $V_{BG}$  でフェルミレベルを制御し  $V_{FG}$  で伝導帯-価電子帯の重複を制御している。  $V_{FG} = -1.2V$  における測定では、抵抗ピークが量子化伝導度 ( $e^2/h$ ) の逆数に非常に近いことがわかる。

### (3) InAs/InGaSb ヘテロ構造

InAs/GaSb ヘテロ構造では、TIを実現する伝導帯と価電子帯の混成で開いたバンドギャップは4 meV程度と予測されており、非常に小さい。不純物等のポテンシャル揺らぎもあり、実効的なバンドギャップはさらに小さくなるため、測定には0.3 K以下の極低温が必要となる。このため、このヘテロ構造をそのまま用いるデバイスは現実的ではない。

GaSbの代わりにInGaSbを用いると、構造外側の障壁層に使うAlSbに対してInGaSbは格子定数が大きいので圧縮ひずみを受ける。その効果により、InAsの伝導帯とInGaSbの価電子帯のエネルギー重複が大きくなり、InAs/GaSbヘテロ構造に比べて大きなバンドギャップが期待される(図5)。

我々は、InAs/InGaSbヘテロ構造について、エネルギーバンド構造の理論的解析を行うとともに、実験により伝導特性を調べた。その結果、計算では  $In_{0.4}Ga_{0.6}Sb$  の場合25 meVの

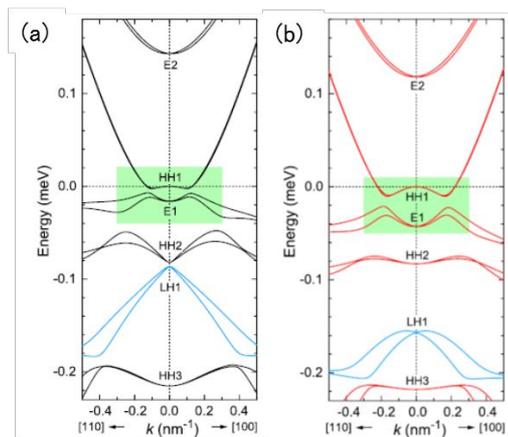


図5. 分散関係の計算結果

(a) InAs/GaSb, (b) InAs/ $In_{0.25}Ga_{0.75}Sb$ .

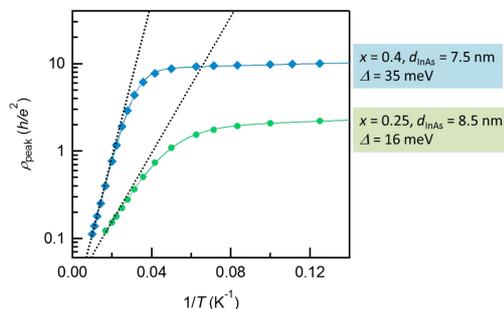


図6. 抵抗ピークの温度変化。

(青) InAs/ $In_{0.4}Ga_{0.6}Sb$ 、  
(緑) InAs/ $In_{0.25}Ga_{0.75}Sb$ 。

ギャップが予測され、抵抗の温度変化測定からは 35 meV のバンドギャップが求まった(図 6)。35 meV は 75 K に対応し、室温におけるトポロジカル絶縁体デバイスの可能性を開く。  
[論文、学会発表]

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 6 件)

T. Akiho, F. Couedo, H. Irie, K. Suzuki, K. Onomitsu, K. Muraki, Engineering quantum spin Hall insulators by strained-layer heterostructures, Appl. Phys. Lett. 109, 192105 (2016) 査読あり。  
DOI:10.1063/1.4967471

F. Couedo, H. Irie, K. Suzuki, K. Onomitsu, K. Muraki, Single-edge transport in an InAs/GaSb quantum spin Hall insulator, Phys. Rev. B 94, 03501 (2016) 査読あり。  
DOI:10.1103/PhysRevB.94.035301

鈴木恭一、小野満恒二、直接ギャップ半導体ヘテロ接合による二次元トポロジカル絶縁体、日本物理学会誌 71、93(2016) 査読あり。  
<http://www.jps.or.jp/books/gakkaishi/2016/02/712.php>

K. Suzuki, Y. Harada, K. Onomitsu, K. Muraki, Gate-controlled semimetal-topological insulator transition in an InAs/GaSb heterostructure, Phys. Rev. B 91, 245309 (2015) 査読あり。  
DOI:10.1103/PhysRevB.91.245309

鈴木恭一、小野満恒二、半導体ヘテロ接合によるトポロジカル絶縁体の実現、NTT 技術ジャーナル 27.6、34 (2015) 査読なし。  
<http://www.ntt.co.jp/journal/1506/files/jn201506034.pdf>

K. Suzuki, K. Onomitsu, Creating a topological insulator using semiconductor heterostructures, NTT Technical Review 13.8 fa7 (2015) 査読なし。  
<https://www.ntt-review.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr201508fa7.html>

[学会発表](計 22 件)

F. Couedo, 入江宏、秋保貴史、鈴木恭一、小野満恒二、村木康二、バンド反転した InAs/InGaSb 電子-正孔結合系における Berry 位相の観測、日本物理学会第 72 回年次大会 2017 年 3 月 17 日、大阪大学(大阪府・豊中市)

秋保貴史、入江宏、F. Couedo、鈴木恭一、

小野満恒二、村木康二、InAs/InGaSb 2 次元トポロジカル絶縁体における歪エンジニアリングによるバンドギャップの増大、日本物理学会第 72 回年次大会 2017 年 3 月 17 日、大阪大学(大阪府・豊中市)

秋保貴史、入江宏、F. Couedo、鈴木恭一、小野満恒二、村木康二、InAs/InGaSb 2 次元トポロジカル絶縁体における歪を用いたバンドエンジニアリング、第 64 回応用物理学会春季学術講演会、2017 年 3 月 14 日、パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)

F. Couedo、入江宏、秋保貴史、鈴木恭一、小野満恒二、村木康二、Local electrostatic gating in InAs/GaSb quantum wells、日本物理学会秋季大会、2016 年 9 月 15 日、金沢大学(石川県・金沢市)

秋保貴史、F. Couedo、入江宏、鈴木恭一、小野満恒二、村木康二、InAs/GaSb 量子スピンホール系における歪によるバンドエンジニアリングと伝導特性評価、日本物理学会秋季大会、2016 年 9 月 15 日、金沢大学(石川県・金沢市)

入江宏、鈴木恭一、秋保貴史、F. Couedo、小野満恒二、村木康二、InAs/GaSb 2 次元トポロジカル絶縁体伝導特性の InAs 層、GaSb 層厚さ依存性、日本物理学会秋季大会、2016 年 9 月 15 日、金沢大学(石川県・金沢市)

秋保貴史、入江宏、F. Couedo、鈴木恭一、小野満恒二、村木康二、InAs/GaSb 量子井戸における層厚制御によるバンド反転とその定量評価、第 77 回応用物理学会秋季学術講演会、2016 年 9 月 14 日、朱鷺メッセ(新潟県・新潟市)

T. Ota, N. Kumada, K. Suzuki, K. Onomitsu, K. Muraki, Edge magnetoplasmon in InAs quantum wells investigated by time-domain measurements, International symposium on nanoscale transport and technology, 2015 年 11 月 17 日、NTT 厚木研究開発センタ(神奈川県・厚木市)

F. Couedo, H. Irie, K. Suzuki, K. Onomitsu, K. Muraki, Single-edge transport in an InAs/GaSb two-dimensional topological insulator, International symposium on nanoscale transport and technology, 2015 年 11 月 17 日、NTT 厚木研究開発センタ(神奈川県・厚木市)

K. Suzuki, K. Onomitsu, K. Muraki, Gate control of semimetal-topological insulator transition in an InAs/GaSb heterostructure, International symposium on nanoscale transport and technology,

2015年11月17日、NTT厚木研究開発センタ  
(神奈川県・厚木市)

F. Couedo, H. Irie, K. Suzuki, K. Onomitsu, K. Muraki, Single-edge transport in an InAs/GaSb two-dimensional topological insulator, International workshop on quantum nanostructures and electron nuclear spin interaction, 2015年10月19日、東北大学(宮城県・仙台市)

佐々木健一、太田剛、熊田倫男、鈴木恭一、小野満恒二、村木康二、InAs量子井戸におけるエッジマグネトプラズモン：急峻な境界ポテンシャルを仮定した理論による解析、日本物理学会2015年秋季大会、2015年9月19日、関西大学(大阪府・吹田市)

F. Couedo, 入江宏、鈴木恭一、小野満恒二、村木康二、Electric field tuning of transport properties in undoped InAs/GaSb hybrid quantum wells, 日本物理学会2015年秋季大会、2015年9月18日、関西大学(大阪府・吹田市)

T. Ota, N. Kumada, K. Suzuki, K. Onomitsu, K. Muraki, Time-resolved measurement of edge magnetoplasmons in InAs quantum wells, 21st International conference on electronic properties of two-dimensional systems, 2015年6月26日、東北大学(宮城県・仙台市)

F. Couedo, K. Suzuki, H. Irie, H. Harada, K. Onomitsu, K. Muraki, Electric-field tuning of InAs/GaSb quantum wells in the band inverted regime, 21st International conference on electronic properties of two-dimensional systems, 2015年6月26日、東北大学(宮城県・仙台市)

鈴木恭一、III-V族半導体によるトポロジカル絶縁体の実現~InAs/GaSb量子スピンホール系のエッジ伝導~、日本物理学会第70回年次大会、2015年3月22日、早稲田大学(東京都・新宿区)[企画講演(招待)]

F. Couedo, 入江宏、鈴木恭一、小野満恒二、村木康二、Electric-field tuning of InAs/GaSb quantum wells in the band-inverted regime、日本物理学会第70回年次大会、2015年3月22日、早稲田大学(東京都・新宿区)

太田剛、熊田倫男、鈴木恭一、小野満恒二、村木康二、InAs量子井戸におけるエッジマグネトプラズモンの時間分解測定、日本物理学会第70回年次大会、2015年3月21日、早稲田大学(東京都・新宿区)

K. Suzuki, Y. Harada, K. Onomitsu, K. Muraki, Manifestation of edge channel transport in InAs/GaSb two-dimensional topological insulators, International symposium on quantum system and nuclear spin related phenomena, 2015年2月18日、宮城蔵王ロイヤルホテル(宮城県・蔵王町)

K. Suzuki, Y. Harada, K. Onomitsu, K. Muraki, Electric field induced semimetal-topological insulator transition in the InAs/GaSb system, International conference on topological quantum phenomena, 京都大学(京都府・京都市)

②鈴木恭一、III-V族半導体ヘテロ構造による2次元トポロジカル絶縁体の実現、日本表面科学界中部支部研究会、2014年10月31日山梨大学(山梨県・甲府市)[招待講演]

② K. Suzuki, Y. Harada, K. Onomitsu, K. Muraki, Gate-controlled semimetal-topological insulator transition in an InAs/GaSb heterostructure, International symposium on solid state device and materials, 2014年9月17日、つくば国際会議場(茨城県・つくば市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鈴木 恭一 (SUZUKI Kyoichi)

日本電信電話株式会社・NTT物性科学基礎研究所・量子電子物性研究部・主任研究員  
研究者番号：20393770

### (2) 研究分担者

入江 宏 (IRIE Hiroshi)

日本電信電話株式会社・NTT物性科学基礎研究所・量子電子物性研究部・研究主任  
研究者番号：20646856

### (3) 研究分担者

小野満 恒二 (ONOMITSU Koji)

日本電信電話株式会社・NTT物性科学基礎研究所・機能物質科学研究部・主任研究員  
研究者番号：30350466

### (4) 研究分担者

村木 康二 (MURAKI Koji)

日本電信電話株式会社・NTT物性科学基礎研究所・量子電子物性研究部・上席特別研究員  
研究者番号：90393769

### (5) 研究協力者

フランソワ コエド (Francois Couedo)

日本電信電話株式会社・NTT物性科学基礎研究所・量子電子物性研究部・リサーチアソ

シエイト

科研費従事期間:2014年9月~2016年12月

現所属:ÉCOLE SUPÉRIEURE DE PHYSIQUE ET DE  
CHIMIE INDUSTRIELLES DE LA VILLE DE PARIS

(6)研究協力者

秋保 貴史 (AKIHO Takafumi)

日本電信電話株式会社・NTT 物性科学基礎研  
究所・量子電子物性研究部・研究員

研究者番号:50786978