

令和 5 年 6 月 29 日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01835

研究課題名（和文）磁性体および半導体複合素子を用いたトポロジカル超伝導の研究

研究課題名（英文）Research for topological superconductivity in compound devices of semiconductor and magnet

研究代表者

中村 壮智（Nakamura, Taketomo）

福岡工業大学・工学部・准教授

研究者番号：50636503

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）：本研究では強磁性半導体である(In,Fe)Asに超伝導細線を接合し一次元近接効果超伝導系をとすることで、極低温での電気伝導特性の測定からゼロバイアス付近で電気抵抗の減少を観測した。このディップ構造は一次元接合に平行な磁場を加えてもほぼ変化せずロバストな特性を示しており、トポロジカル超伝導で現れるゼロバイアス伝導度ピークに相当する可能性がある。また、量子ホール端状態で、状態間遷移をポテンシャル変調によって制御することで、伝播する電子スピンの方向を制御することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究はこれまで外部磁場が必要であった近接効果による一次元トポロジカル超伝導体を、強磁性半導体を用いてゼロ磁場で創り出すことを試み、トポロジカル超伝導の存在を示すと思われる兆候を観測した。これがトポロジカル超伝導によるものであれば強磁性半導体の磁性を電場によってコントロールすることで、完全にゼロ磁場で、制御可能なトポロジカル超伝導接合が実現できることになり、比較的複雑な構造のトポロジカル量子計算素子の実現も期待できる。また、強磁性半導体は有力なスピントロニクス材料であるが、同時に量子計算への応用可能性も大きいと示すことができた。

研究成果の概要（英文）：We fabricated 1D proximity superconductor by depositing conventional superconducting wire on a ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As. We measured the differential resistance as a bias current at low temperatures and observed resistance dip around zero-bias. This dip structure is robust against the external magnetic fields parallel to the wire. We expect that the dip structure corresponds to zero-bias conductance peaks which appears in topological superconducting junctions.

We also tried to control the electron spins via quantum Hall edge states by changing the inter-channel transition probability with the potential modulation.

研究分野：Physics

キーワード：superconductivity superconducting junction semiconductor topology

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

物質のトポロジーが注目されるようになり、新物質だけでなく以前から知られていた物質においても非自明な界面現象が発見されるようになったが、その中でもトポロジカルに非自明な超伝導体は界面に生じるマヨラナフェルミオンが量子計算へと応用できると期待され理論と実験の両面から盛んに研究が進められている。トポロジカル超伝導にはいくつも種類があるが、これらの一部は物質固有の性質ではなく複数の物質を組み合わせることで人工的に生じさせることができることが知られており、スピン軌道相互作用の強い一次元系に超伝導体を接合し近接効果による超伝導相関と外部磁場を組み合わせた系では、2012年にマヨラナフェルミオンの観測に成功して以降様々な研究グループによってトポロジカル量子計算に向けた研究が進められてきた。この系ではT型接合や井形接合を用いた素子が実用に近い素子として研究されているが、これらの素子は自己成長量子細線をエピタキシャルに接続する必要があり、作製には極めて高度な技術と設備が必要である。また、この系では細線に並行に磁場を加える必要があるが、これらの素子では細線が直交しているため磁場方向を局所的に変える必要があるため運用も容易ではない。

2. 研究の目的

本研究では、スピン軌道相互作用と超伝導相関およびゼーマン効果を共存させることで作り出される一次元トポロジカル超伝導を強磁性体を複合させることで、ゼロ磁場あるいは微弱な磁場によって発現させることを目指した。また、強磁性体として磁性不純物を加えたIII-V族半導体を用いることで、電場によってその磁性をチューニングしそのトポロジーを変調することを目指した。

3. 研究の方法

強磁性体を非磁性体に接合すると強磁性近接効果によって接合付近に交換相互作用が広がるため、一次元トポロジカル超伝導発現の要素であるゼーマン効果を強磁性相関で代替することで、ゼロ磁場でトポロジカル超伝導を創り出すことができると考えられる。この方法ではトポロジカル超伝導創出の為に外部から加える磁場は不要であり、複数のトポロジカル超伝導を組み合わせても局所的に磁場方向を変える必要がないため運用の難易度は下がり集積もしやすい。トポロジカル量子計算のためにはトポロジカル超伝導をON/OFFする必要があるため磁化方向を変えたり磁化そのものの強弱を制御する必要があるが、これはトポロジカル超伝導創出に必要な磁場に比べ微弱な磁場を加えるか、強磁性半導体であれば電場によってキャリアや磁荷を変調することで制御できる。超伝導体と強磁性体をスピン軌道相互作用の強い系に接合すれば、3者の境界でマヨラナフェルミオンが生じるという理論的提案は以前からあったが、実験的には3つの物質を接合するのはプロセスの難易度が高い。そこで本研究では強いスピン軌道相互作用を持ちながらそれ自身が強磁性体としての性質を併せ持つ強磁性半導体を用いることで、超伝導体と強磁性半導体の2者の接合とし構造の単純化と歩留まりの向上を図った。また、これと並行してInAsの量子細線に超伝導体を接合し、これに強磁性体を接合する方法でのトポロジカル超伝導創出についても試みた。具体的には以下の研究を行った。

- (1) InAsの量子細線に超伝導体を接合し、これに強磁性体を接合することでトポロジカル超伝導が創り出せるかどうかを調べた。超伝導体と強磁性体を接合するのは同時にできないため順にプロセスを行う必要があるが、後から行うプロセスによって先に接合した界面の状態が悪化することが懸念されるため、予備実験としてInAs量子細線に超伝導体を接合し、これに磁場を加えることでトポロジカル超伝導発現の必要条件を満たしているかどうかを調べた。
- (2) n型の強磁性半導体(In,Fe)Asに、超伝導体としてNb、TiおよびNbTi合金を接合し、この超伝導接合においてトポロジカル超伝導が創り出せるかどうかを調べた。接合は(In,Fe)Asをエッチングによって細線状に加工しその上に超伝導体を蒸着したものと、(In,Fe)As薄膜上に細線状の超伝導体を蒸着したものの2通りで試料を作成した。いずれの試料も細線幅を変えたり、超伝導電極間の距離を変えたものを複数作成し、トポロジカル超伝導となっているかを調べた。それぞれの試料は希釈冷凍機で極低温まで冷却し、温度の変化や磁場大きさや方向の変化で生じる導電特性の変化から、トポロジカル超伝導の観測を試みた。
- (3) トポロジカルな量子現象の一つである量子ホール効果では端に一次元強磁性伝導チャンネルは月限するが、このチャンネルにおいてスピン軌道相互作用が電子スピンに及ぼす効果を調べた。

4. 研究成果

(1) InAsの量子細線に超伝導体を接合し細線に並行に磁場を印加することでトポロジカル超伝導となるかどうかを調べ、強磁性体を接合した時にトポロジカル超伝導となりうるかどうかを調べた。量子細線はInGaAsに挟まれた厚さ4nmのInAsの量子井戸をエッチングによって幅200nmまで細くし、これに超伝導体としてTiを接着層としてNbを接合することで作成した。量子細線の両側から超伝導体を接合した場合、これらの超伝導体間には超伝導電流が流れ、これによってInAs内に近接効果が生じていることが確認できた。次にこの量子細線に平行に磁場を印加したところ、200G程度の小さな磁

場で超伝導電流は消失し、その後磁場を大きくしていても導電特性に変化は見られなかった。これは量子細線中の超伝導が磁場によって破壊され消失したことを意味している。この原因としては量子細線中のスピン軌道相互作用が小さいことが原因だと考えられたため、InAs を GaSb で挟んだ量子井戸構造を作成しスピン軌道相互作用の増強を図った。この基板は完全ではないものの二次元トポロジカル絶縁体となっており強いスピン軌道相互作用があることが伝導測定から分かったが、基板の絶縁性が悪くそのままでは一次元量子細線とし超伝導接合を作成するのは難しかった。基板の構造や成長温度、成長速度などを変え絶縁性の高い基板作製のための条件を精査したが、どの条件でもリーク電流が無視できず、超伝導接合の作製に必要な基板は得られていない。

(2) エピタキシャル成長した(In,Fe)As を細線状に加工し超伝導体を接合した試料と、(In,Fe)As の二次元薄膜に細線状の超伝導体を接合した構造のそれぞれで試料を作成し、トポロジカル超伝導の観測を試みた。前者の試料では(In,Fe)As 層の劣化がひどく超伝導体との接触も悪かったため、細線状の超伝導体を接合したものを中心に研究を行った。線幅を変えた複数の超伝導電極と、この細線から少し離れたところに別の超伝導電極を接合することで、導電特性にトポロジカル超伝導に起因した特徴が見られるかどうかを調べた。その結果複数の接合で、トポロジカル超伝導に見られるのと同様の、ゼロバイアス近傍の電気抵抗の減少が見られた。そこでこの電気抵抗の減少の起源を調べるため、面直及び細線平行方向に磁場を加えてその変化を調べたところ、面直では 140 G 程度、面内では 3000 G 程度までピーク構造に変化がなかった。これは磁場に対してロバストな状態であり、トポロジカル超伝導を示している可能性がある。そこでこれを明確にするため、面内に磁場を加え磁化方向を回転させることで、この振る舞いに変化するかを調べる予定であったが、コロナ化によるベクトルマグネットの納品遅れのため測定が中断し、納品後に再冷却して調べたところ、試料の劣化により特性が変わってしまったために測定ができていない。また、代表者の研究機関の変更により、同実験の継続が難しくなったため、(In,Fe)As の超伝導接合を用いた研究については、これまでに得られたデータを基に解析を継続している。

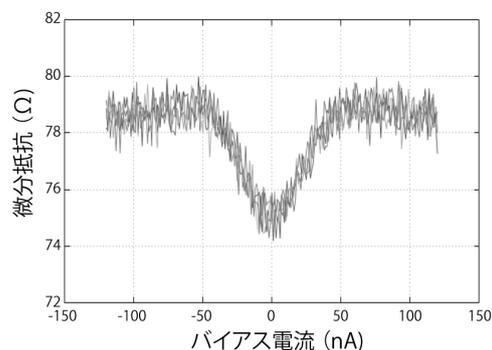


図 1 超伝導細線下の強磁性半導体 (In,Fe)As とバルク Nb 間の微分抵抗のバイアス依存性。

(3) 量子ホール効果によるトポロジカル端状態は高いコヒーレンスを持った一次元伝導チャンネルであるが、高磁場下ではスピン分裂し、各チャンネルは強磁性にあるとみなすことができるため、チャンネル間での波動関数の重ね合わせと位相制御によって入出力の電子スピンを自由に制御できると考えられる。本研究では半導体ヘテロ構造中の二次元電子系に磁場を加え量子ホール状態にしたうえで、チャンネルを鋭角に折り曲げることでチャンネル間のトンネルを生じさせ、それぞれのチャンネルを伝播する波束の混成を起こすことでスピンの制御ができないか試みた。その結果、ポテンシャル制御によってチャンネル間遷移確率や位相を変化させることに成功し、これによってスピンの方向を制御できることを実証した(①)。さらにこの方法を応用し、ポテンシャル制御によって透過率を変化させられる電子系のハーフミラーとして機能することを示した(②)。

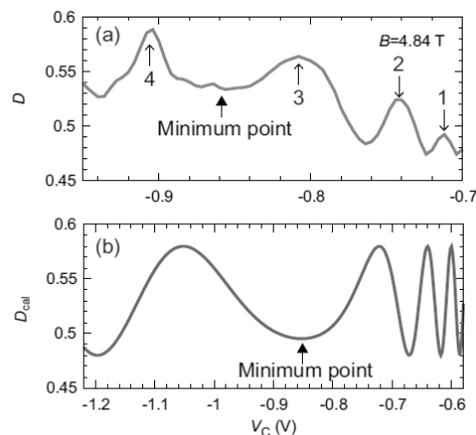


図 2 各チャンネルの分配電流のゲート依存性。振動的な変化はスピンの回転を示している(①)。

- ① Shimizu Takase, Nakamura Taketomo, Hashimoto Yoshiaki, Endo Akira and Katsumoto Shingo, Physical Review B 102, 235302 (2020).
- ② Shimizu Takase, Ohe Jun-ichiro, Endo Akira, Nakamura Taketomo and Katsumoto Shingo, Physical Review Applied 19, 034085 (2023).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nagamine Y., Sato J., Qian Y., Inoue T., Nakamura T., Maruyama S., Katsumoto S., Haruyama J.	4. 巻 117
2. 論文標題 Optoelectronic properties of laser-beam-patterned few-layer lateral MoS ₂ Schottky junctions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 043101-1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0015471	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Katsuragawa Naoki, Nishizawa Mizuki, Nakamura Taketomo, Inoue Taiki, Pakdel Sahar, Maruyama Shigeo, Katsumoto Shingo, Palacios Juan Jose, Haruyama Junji	4. 巻 1
2. 論文標題 Room-temperature quantum spin Hall phase in laser-patterned few-layer 1T - MoS ₂	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications Materials	6. 最初と最後の頁 51-1~51-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s43246-020-00050-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Shimizu Takase, Nakamura Taketomo, Hashimoto Yoshiaki, Endo Akira, Katsumoto Shingo	4. 巻 102
2. 論文標題 Gate-controlled unitary operation on flying spin qubits in quantum Hall edge states	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 235302-1~8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.102.235302	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shimizu Takase, Ohe Jun-ichiro, Endo Akira, Nakamura Taketomo, Katsumoto Shingo	4. 巻 19
2. 論文標題 Half-Mirror for Electrons in Quantum Hall Copropagating Edge Channels in a Mach-Zehnder Interferometer	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 034085-1~11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevApplied.19.034085	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Taketomo Nakamura
2. 発表標題 Recent progress of superconducting junctions on ferromagnetic semiconductors
3. 学会等名 Oxide Superspin 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村壮智, 橋本義昭, 勝本信吾
2. 発表標題 超伝導近接効果によるInAs二次元電子系の電気伝導度の変化
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takase Shimizu, Taketomo Nakamura, Akira Endo, Jun-ichiro Ohe, Shingo Katsumoto
2. 発表標題 Beam Splitter With Spin Rotation On Quantum Hall Copropagating Edge Channels
3. 学会等名 EP2DS-24/MSS-20 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Taketomo Nakamura, Yoshiaki Hashimoto, Shingo Katsumoto
2. 発表標題 Resistance enhancement of InAs 2D electron gas near the superconductor
3. 学会等名 EP2DS-24/MSS-20 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鬼崎誠, 橋本義昭, 中村壮智, 勝本信吾
2. 発表標題 トップゲート付き超伝導体/InAs二次元電子ガス/超伝導体接合の輸送特性
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 橋本義昭, 鬼崎誠, 遠藤彰, 中村壮智, 勝本信吾
2. 発表標題 InAs/GaSb二次元系の伝導とゲート静電容量
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清水貴勢, 中村壮智, 遠藤彰, 勝本信吾
2. 発表標題 スピン軌道相互作用を用いた並走エッジチャンネル間のビームスプリッター
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桂川直樹, 西澤実起, 中村壮智, 井ノ上大樹, S.Pakdel, 丸山茂夫, 勝本信吾, J.J. Palacios, 春山純志
2. 発表標題 低パワーレーザー照射による少数原子層MoS ₂ への室温量子スピンホール相創出
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長嶺泰, 佐藤純, Y. Quian, 井ノ上大樹, 中村壮智, 丸山茂夫, 勝本信吾, 春山純志
2. 発表標題 少数層MoS2へのレーザー照射による一次元ショットキー接合創製とその特異な光応答
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------