

令和 2 年 5 月 20 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03998

研究課題名(和文)空間反転対称性が破れた半導体表面に創成されるハイブリッド単原子層物理

研究課題名(英文)Hybrid one-atomic-layer physics on semiconductor surfaces without space inversion symmetry

研究代表者

枘富 龍一(Masutomi, Ryuichi)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教

研究者番号：00397027

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は層に依存するラッシュバスピ軌道相互作用をもつ、単原子層超伝導体の多層系に実現する新奇な超伝導状態を探索し、その発現機構を解明することを目的とした。単原子層の鉛と層間物質(アンチモン)から構成される二層膜および三層膜において、平行上部臨界磁場の温度依存性に急峻な折れ曲がりを観測した。層に依存するラッシュバスピ軌道相互作用を考慮した理論計算を併用することにより、その異常は複素ストライプ相からヘリカル相への転移に対応していることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は強いスピ軌道相互作用をもつ鉛の単原子層から構成される二層系および三層系を用いて、超伝導秩序変数が実空間で変調する非従来型超伝導の存在を上部臨界磁場の測定から立証するものである。この研究成果は秩序変数の大きさと位相の両方が変調する複素ストライプ相や秩序変数の位相のみが変調するヘリカル相の存在を実験的に明らかにするだけに留まらず、空間反転対称性の破れにより引き起こされる非従来型超伝導を研究する新たな舞台を提供する。

研究成果の概要(英文)：We observed a sharp upturn in the measurements on the temperature dependence of the parallel upper critical field for multiple monolayer films with layer-dependent Rashba spin-orbit interactions. Using numerical calculations with the Bogoliubov-de Gennes equations, we found that it corresponds to a transition from a complex-stripe phase to a helical phase. Our findings not only provide experimental evidence supporting the existence of the complex-stripe phase and the helical phase, but also offer a new platform to study non-trivial superconductivity caused by symmetry breaking, including odd-parity pair-density-wave superconductivity and 2D topological superconductivity predicted for multilayer systems that are made up of the 2D Rashba superconductors.

研究分野：低次元物性物理学

キーワード：低次元超伝導 ラッシュバ効果

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

#### 1. 研究開始当初の背景

我々は近年、原子レベルで平坦なガリウム砒素 (GaAs) 劈開表面に単原子層の鉛を作成するという独自の方法で2次元超伝導体の研究を行ってきた。この系では単原子層の鉛が GaAs 基板と真空に挟まれているため空間反転対称性が破れている。さらに鉛原子の強いスピン軌道相互作用により大きなラッシュバ (Rashba) 効果が期待され、スピン方向に依存してフェルミ面が分裂した系が実現している。この系において軌道効果による対破壊が無視できる平行磁場下での電気伝導測定の結果、スピン-重項状態から期待されるパウリ限界より一桁近く高い平行磁場下においても超伝導転移温度がほとんど変化しないという特異な現象を観測した。このことは臨界磁場の増大を意味しており、空間反転対称性が破れた超伝導の理論を2次元超伝導に拡張することにより、超伝導秩序変数が空間変調した不均一な超伝導状態が実現している可能性が高いことを明らかにした。しかしながら、現時点において本研究は鉛の単原子層における電気伝導測定に限られており、今後、異なる系や新たな手法による決定的な現象の観測やその新奇な超伝導状態を利用した新たな研究が望まれている。

#### 2. 研究の目的

本研究は上述の鉛の単原子層超伝導体を利用した2種類のハイブリッド系を作成し、下記に示す(1)と(2)の研究を行う。

(1) 層に依存するラッシュバスピン軌道相互作用をもつ単原子層超伝導体の多層系(ハイブリッド系)を実現し、そこに出現する新奇な超伝導状態の観測およびその発現機構の解明を目的とする。

(2) GaAs 劈開表面上に形成された超伝導超薄膜に種々の磁性体を付着させることもしくは合金化させることにより、空間反転対称性が破れた超伝導と磁性体との間の磁氣的相互作用の解明を目的とする。

#### 3. 研究の方法

(1) 層に依存するラッシュバスピン軌道相互作用をもつ単原子層超伝導体の多層系(ハイブリッド系)は単原子層の鉛と層間物質にアンチモンを用いて、二層膜および三層膜を作成した(図1(挿図))。本研究では半金属であるアンチモンをスペーサー層として用いることにより、弱結合系を実現する。さらに、二層系(三層系)では一、二層目(三層目)で空間反転対称性の破れ方が逆になるため、異符号のラッシュバスピン軌道相互作用が働くことが期待させる。測定は磁場下における電気伝導測定を行うことにより、臨界磁場の温度依存性を求めた。さらに、臨界磁場の磁場方位依存性についても精密な測定を行った。

(2) 磁性体としてセリウム(Ce)を7.3%と10%を混合した鉛-セリウム合金を GaAs 劈開表面上に作成した。さらに急冷蒸着法を用いて鉛の超薄膜(膜厚 1.1nm)上に磁性体(セリウム、マンガンを)を付着させた試料も作成した。その後、試料を作成した“その場”において、極低温(0.5K程度)まで冷却し、電気伝導測定により臨界磁場の温度依存性を求めた。

#### 4. 研究成果

(1) 図1(挿図)に示されている二層膜と三層膜に対してアンチモンの厚みをパラメータとして磁気輸送特性の測定を行った。アンチモンの厚みが1.5nmから3.75nmまでの測定されたすべての多層膜は11Tまでの平行磁場中で超伝導の振る舞いが見られた。特に、図1にアンチモンの厚

みが 3.75nm の場合の二層膜とアンチモンの厚みが 3.0nm の場合の三層膜の面抵抗の温度依存性を示す。二層膜と三層膜におけるゼロ磁場の超伝導転移温度は単原子層の鉛のそれとほぼ同じか僅かに上昇している程度である。このことはスペーサー層としてのアンチモンを用いた多重の単原子層の鉛の膜が、弱く結合した系としてうまく働いていることを意味している。一方、ゼロ磁場の結果とは対照的に、平行磁場の増加に伴う超伝導転移温度の減少量は単原子層の鉛の場合のそれと全く異なっている。

この超伝導転移温度の平行磁場に対する依存性の差異の理由を明らかにするために、図 2 に二層膜と三層膜の平行上部臨界磁場と垂直上部臨界磁場の温度依存性をプロットした。図 2 において、平行上部臨界磁場は平行根の温度依存性を示し、垂直上部臨界磁場は線形の温度依存性を示した。図 2 (a)-(c) では平行上部臨界磁場は温度の減少とともに緩やかに増加している。一方、アンチモンの厚みが 3.0nm の三層膜においては平行上部臨界磁場に急激な上昇が観測された(図 2 (d))。さらに、アンチモンの厚みが増加するにつれて、平行上部臨界磁場の立ち上がりは低磁場領域に観測された。

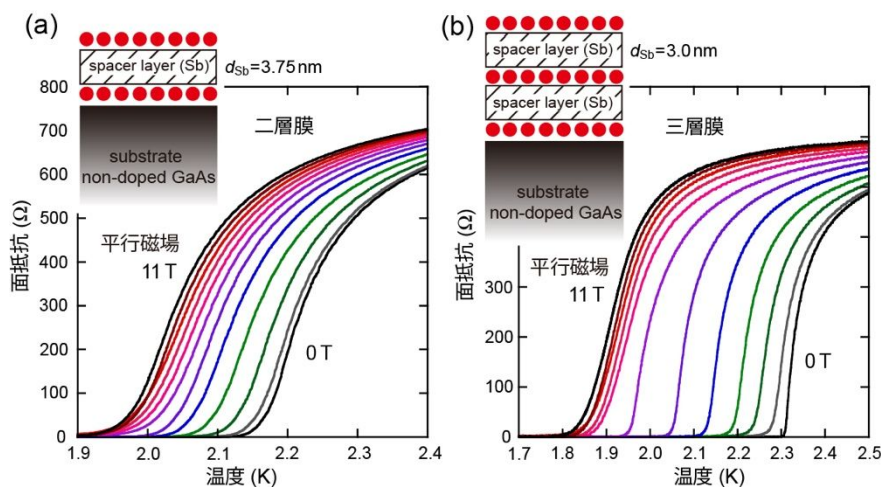


図 1：面抵抗の温度依存性

図 2 (d)に示されている平行上部臨界磁場の温度依存性を説明するために、三層系のモデルを線形化された Bogoliubov-de Gennes 方程式を解くことにより解析した。図 3 (a)に層に依存するラッシュバスピ軌道相互作用が 125, 75, 0meV のときの平行上部臨界磁場の温度依存性に関する数値計算の結果を示す。ラッシュバスピ軌道相互作用がゼロもしくは無視できるほど小さい場合、平行上部臨界磁場は温度の減少に従って単調に増加している、言い換えれば、図 2 (d)に示されたような平行上部臨界磁場の急激な立ち上がりは再現されていない。一方、層に依存するラッシュバパラメータが 125meV の場合は数値計算により実験結果がよく再現されることがわかった。この結果は三層系の平行上部臨界磁場の温度依存性の決定に関して層に依存したラッシュバスピ軌道相互作用が本質的な役割と果たしていることが理解できる。さらに三層系の相図についても示す(図 3 (b))。高温領域では超伝導秩序変数が均一な BCS 状態が安定になる。一方、低温領域ではクーパー対の重心運動量がゼロでない 2 種類の超伝導状態が BCS 状態の代わりに安定化される。一つ目は複素ストライプ相である。この相は常磁性効果を通してラッシュバスピ軌道相互作用によっても誘起されるが、単層の鉛の膜を用いた多層系ではフェルミエネルギーが比較的大きいため(数 eV)、軌道効果が常磁性効果より支配的になる。したがって、三層系で安定化される複素ストライプ相は層間を貫く平行磁場によって誘起されるジョセフソンボルテックス相である。二つ目はヘリカル相であり、これは層間を貫く量子化された磁束(磁

束量子)は層間の結合を実効的に弱くすることにより実現される。ヘリカル相は強磁場・低温領域において層間の結合定数がゼロでない複素ストライプ相の代わりに安定化される。したがって、図2(d)に示されている平行上部臨界磁場の急激な立ち上がりは平行磁場誘起による複素ストライプ相からヘリカル相へのクロスオーバーに起因していると考えられる。

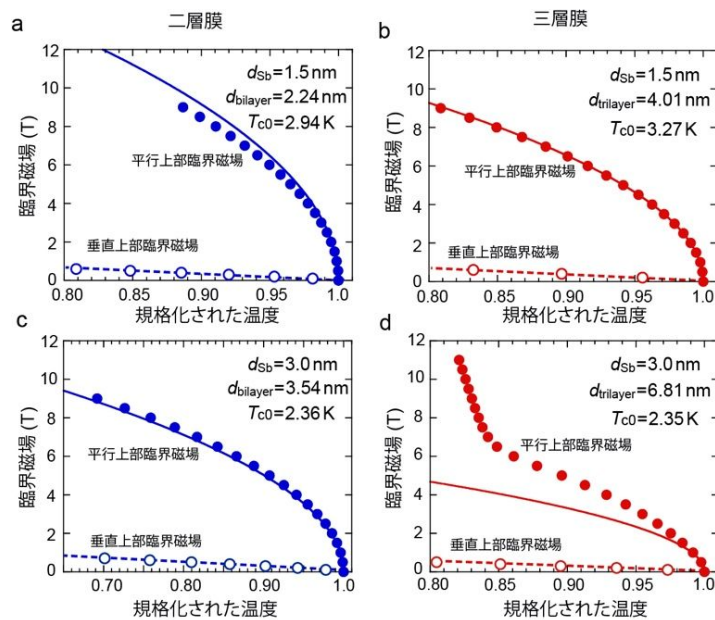


図2：臨界磁場の温度依存性

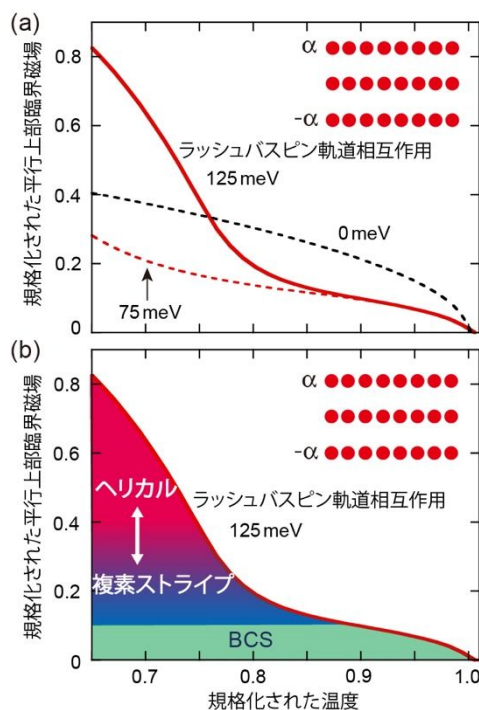


図3：計算結果と三層系の相図

(2) 一般的に超伝導物質に磁場を印加すると軌道効果と常磁性効果によりエネルギー的に不利になり、その超伝導状態はある臨界磁場以上において絶縁体(常伝導)状態に相転移する。これが磁場誘起による超伝導絶縁体転移であり、多くの超伝導物質で観測されている。一方、本研究では面内磁場を印加することにより絶縁体状態から超伝導状態に相転移する“絶縁体-超伝導転移”を引き起こす二次元超伝導物質(a-CePb, Ce:10%)の作成に初めて成功した。図4にその観

測の一例を示す。二次元超伝導体において磁場を印加することにより超伝導状態から絶縁体状態に転移する超伝導絶縁体転移は種々の系で観測されているが、磁場が誘起する絶縁体-超伝導体転移の観測は初めてである。その詳しい相転移機構については現在研究中であるが、面内磁場による磁性散乱の抑制や反強磁性相互作用による内部磁場を外部磁場が抑制する補償機構 (Jaccarino-Peter 補償機構) の混在により絶縁体超伝導体転移が生じていると考えている。この新規な相転移機構をもつ超伝導物質は次世代の二次元超伝導デバイスの開発にも一石を投じるものであり、今後の応用が期待される。

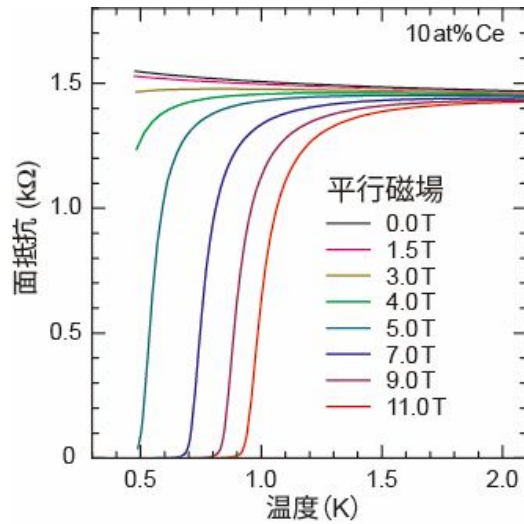


図4：平行磁場誘起による絶縁体-超伝導転移

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ryuichi Masutomi, Tohru Okamoto, Youichi Yanase	4. 巻 101
2. 論文標題 Unconventional superconducting phases in multilayer films with layer-dependent Rashba spin-orbit interactions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 184502(1-5)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevB.101.184502">https://doi.org/10.1103/PhysRevB.101.184502</a>	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 Masato Niwata, Ryuichi Masutomi, Tohru Okamoto	4. 巻 119
2. 論文標題 Magnetic-field-induced superconductivity in ultrathin Pb films with magnetic impurities	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 257001(1-5)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.119.257001	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 枘富 龍一、岡本 徹	4. 巻 平成27年度
2. 論文標題 走査トンネル顕微鏡で探る量子ホール効果	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 東京大学低温センター年報	6. 最初と最後の頁 6-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 岡本 徹、枘富 龍一	4. 巻 52
2. 論文標題 単原子層超伝導と空間反転対称性の破れ	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 97-103
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 R. Masutomi, S. Tashiro, T. Okamoto, Y. Yanase
2. 発表標題 Observation of crossover from a complex-stripe phase to a helical phase in multiple one-atomic-layer films
3. 学会等名 23th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 R. Masutomi, S. Tashiro, T. Okamoto, Y. Yanase
2. 発表標題 Observation of crossover from a complex-stripe phase to a helical phase in multiple one-atomic-layer films
3. 学会等名 31th International Conference on the Physics of Semiconductors (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 R. Masutomi, S. Tashiro, T. Okamoto, Y. Yanase
2. 発表標題 Observation of crossover from a complex-stripe phase to a helical phase in multiple one-atomic-layer films
3. 学会等名 Recent Progress in Graphene and two-dimensional Materials Research Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 枅富 龍一、田代 翔太郎、岡本 徹、柳瀬 陽一
2. 発表標題 多重単原子層膜における複素ストライプ相からヘリカル相へのクロスオーバーの観測
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 庭田 正人、栞富 龍一、岡本 徹
2. 発表標題 磁性体を吸着したPb超薄膜における平行磁場による超伝導の増強
3. 学会等名 第8回低温センター研究交流会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 庭田 正人、栞富 龍一、岡本 徹
2. 発表標題 Pb超薄膜超伝導に対する磁性不純物の影響と平行磁場印加による超伝導転移温度の上昇
3. 学会等名 日本物理学会 第72回年次大会
4. 発表年 2017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