

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25400316

研究課題名(和文)空間反転対称性がない半導体表面に創成されるスピン物性と単原子層超伝導

研究課題名(英文) Spin-related physics and two-dimensional superconductivity at the cleaved surface of semiconductors without space inversion symmetry

研究代表者

枅富 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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究により極低温・強磁場中で動作可能な走査トンネル顕微鏡(STM)と電気抵抗測定を組み合わせた装置を開発した。そして、この装置を用いて吸着原子が誘起する表面2次元電子系に実現する量子ホール状態を調べた。特に、STMを用いて求められた電子相関から生じる増強効果の大きさを利用すれば、電気抵抗測定から得られたシュブニコフ・ド・ハース振動を精度よく説明できることがわかった。また、単原子層の超伝導鉛を用いた実験ではクーパー対が有限の運動量をもつ状態(ヘリカル相)を示唆する結果を得た。

研究成果の概要(英文)：We have developed the scanning tunneling microscope combined with transport measurements, which can be operate at low temperature and high magnetic fields. Moreover, using this microscope, the quantum Hall state in adsorbate-induced two dimensional (2D) systems and novel 2D superconductivity in one-atomic-layer metal films are investigated.

研究分野：低次元系物理学

キーワード：2次元電子系 単原子層超伝導

1. 研究開始当初の背景

(1) InAs や InSb の表面に金属等を吸着させると反転層 (または蓄積層) が誘起されることは光電子分光の測定などから知られていたが、面内電気伝導に関しての測定は行われてこなかった。近年、申請者は側面を経由した並列電気伝導の除去や良好なオーミック電極の開発といった技術面での試行錯誤の末、p 型 InAs を超高真空中で劈開して得られた清浄表面に、アルカリ金属を吸着させて誘起した 2 次元電子系の面内電気伝導を初めて測定した。さらに有効質量が小さいために、一桁近く高い電子移動度が得られる p 型 InSb に関して銀で誘起した 2 次元電子系の面内電気伝導の測定を初めて成功させ、低磁場領域において量子ホール効果を観測した。一方で、吸着物質の表面形態や界面の構造が 2 次元電子系に与える影響については理解が進んでいない。金属等を吸着させた後の熱処理によって電子濃度や電子移動度が大きく変化することや表面被覆率に対する依存性が吸着物質の種類によって全く異なることなどから、表面 2 次元電子系の特性が表面被覆率によってのみ支配されているのではなく、吸着物質の表面形態や界面の構造に強く依存していると考えられる。

(2) 2 次元超伝導体の研究は長い歴史を持っているが未だに決着がついていない問題である。理想的な 2 次元系において本当に超伝導状態が安定に存在するか、2 次元の超伝導絶縁体転移 (SIT) はどのような機構で起こるのかなど、基本的な問題でさえ理解されていない。2 次元超伝導体の研究は、以前から行われている絶縁体基板上に蒸着膜を作成する方法と、近年実現された半導体表面上にエピタキシャル成長させた膜を使用する方法に大きく分けられる。しかしながら、両方の手法とも異なる弱点があり、2 次元超伝導体の包括的な理解を妨げている。 に関して

はほとんどの研究において電気伝導測定のみが行われ、超伝導状態や SIT に強い影響を与える薄膜構造を技術的困難から決定できていない。 に関しては主に走査トンネル顕微鏡 (STM) を用いて超伝導ギャップを観測した結果のみであり、超高真空中で電気伝導測定を行うという技術的困難から、超伝導の研究において欠かすことのできない輸送特性に関する知見を得られていない。

2. 研究の目的

(1)(2) の研究課題とも、表面 2 次元系の物性を正しく理解するには、電気伝導測定と STM を組み合わせた手法による研究が必要不可欠である。吸着物質という新しい自由度をもつ表面 2 次元系を舞台に、新規な電子状態の解明と探索を行うことが本研究の目的である。

3. 研究の方法

半導体基板の劈開と蒸着による試料の作成を行ったその場で、電気伝導測定と STM を組み合わせた手法により、表面 2 次元系の電子物性を明らかにする。実験装置としては、(1) 液体ヘリウム温度での STM と電気伝導の同時測定を可能にする自作冷凍機を、(2) に対しては小型蒸着装置付きのヘリウム 3 冷凍機を用いる。ともに 14 T の強磁場領域での測定を可能にしている。

4. 研究成果

(1) まず、本研究を遂行するために、超高真空下での劈開・蒸着による試料作成およびその環境を維持したままで、極低温 (液体ヘリウム温度) ・磁場下での STM と面内電気伝導測定が可能な装置の製作・性能評価を行った。本研究により新しく構築された装置は液体ヘリウム温度で高い安定性を示し、本研究の目的達成に十分な性能を有していることが判った。また、この装置は試料基板の劈開、蒸着による試料作成をしたその場で極低温 (4.2 K) ・高磁場 (14 T) 環境下において STM と電気伝導測定を行えるものであり、世界的に見ても非常にユニークなものであ

る。

InSb 劈開表面に鉄を 0.01 原子層つけた場合の測定においては高い原子分解能で STM 像が得られた (図 1)。鉄原子は独立して吸着されており、クラスター化しているものは全体の数%以下であった。また、鉄原子は Sb 副格子の間に位置しており、黒い輪郭を持った特徴的な輝点として観測された。さらに Sb 副格子よりわずかに下側に鉄の安定サイトがあることが確認できた。STM 像から得られた鉄原子の原子密度と電気伝導測定から得られる電子濃度を比較することにより、約 1/8 の鉄原子がドナーとなり InSb 表面に電子を供給していることが判った。

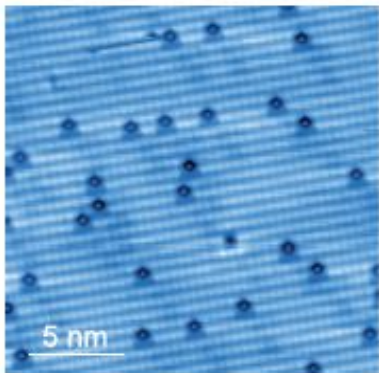


図 1 STM 像

一方、電気伝導測定に関しては同じ試料における縦抵抗率とホール抵抗の磁場依存性の測定に成功した (図 2)。縦抵抗率は明瞭なシュブニコフドハース振動を示し、ランダウ準位充填率 $\nu = 4$ と 5 で量子ホール効果が観測された。また、この系における電子移動度は約 $11 \text{ m}^2/\text{Vs}$ であり、吸着原子が誘起する 2 次元電子系で最も高い値になっている。

さらに走査トンネル分光法 (STS) を用いた測定を行った。100nm \times 100nm を 100 点に分割し、得られた局所状態密度を空間的に平均化した微分コンダクタンスを状態密度とした。図 3 に磁場 9T におけるトンネル分光の結果を示す。測定された微分コンダクタンスには明瞭なスピン分離が観測された。このスピン分離幅から多体交換から生じる増強効果を評価すると 10meV 程度で

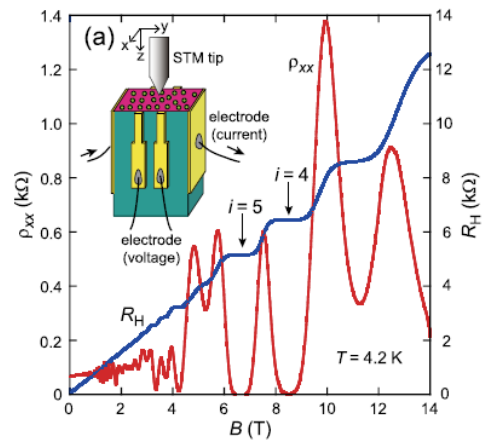


図 2 縦抵抗とホール抵抗の磁場依存性

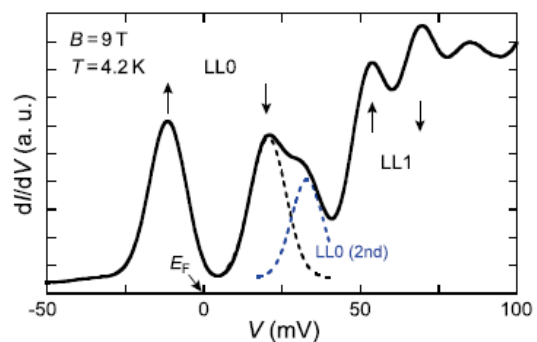


図 3 微分コンダクタンスのバイアス電圧依存性

あり、平均場近似を用いた理論計算とよい一致を示すことが判った。この結果は STM を用いて電子相関を正確の測定できることを示している。

今後、この装置を用いて単原子層磁性膜の磁気秩序状態の解明や下記する単原子超伝導体の研究を行うことが計画されている。

(2) GaAs 劈開基板上に作成された単原子層の鉛を用いた研究において、ヘリウム 3 冷凍機温度までの冷却に成功し、明瞭な超伝導転移を観測した (図 4)。さらに面内磁場を印加する実験においては、パウリ限界より一桁近い高い磁場まで超伝導状態がほとんど変化しないという驚くべき性質を発見した (図 5)。空間反転対称性のない超伝導体の理論計算と対比することにより、超伝導秩序関数が空間的に変化するヘリカル相という特異な超伝導状態が実現している可能

性が高いことが判った。今後、STM を用いて超伝導状態秩序変数の実空間での観測が望まれる。

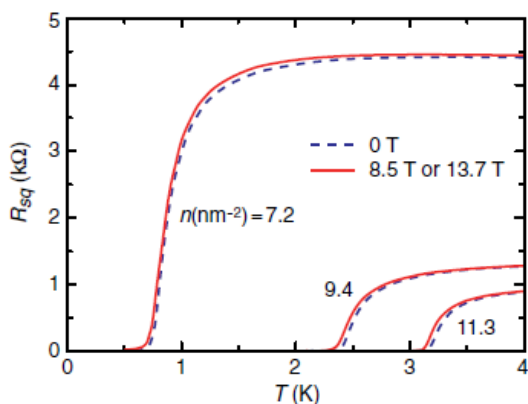


図4 電気抵抗の温度依存性

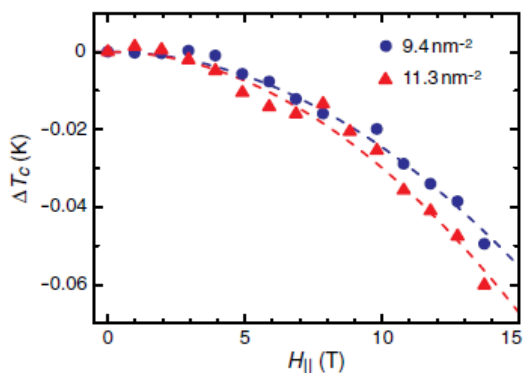


図5 超伝導転移温度の面内磁場依存性

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 7 件)

岡本徹、柘富龍一、単原子層超伝導と空間反転対称性の破れ、固体物理、査読有、52 巻、2017、97-103、

<http://www.agne.co.jp/kotaibutsuri/>

柘富龍一、岡本徹、走査トンネル顕微鏡と電気抵抗測定で探る量子ホール効果、東京大学低温センター(平成 27 年度年報)、査読無、2017、6-12、

<http://www.crc.u-tokyo.ac.jp/publication/annualreport/ar2015.html>

Ryuichi Masutomi, Tohru Okamoto, Adsorbate-induced quantum Hall system probed by scanning tunneling spectroscopy combined with transport measurements, Appl. Phys. Lett., 査読有、106巻、2015、251602(1-4)、DOI:10.1063/1.4922990

Takayuki Sekihara, Takahiro Miyake, Ryuichi Masutomi, Tohru Okamoto, Effect of Parallel Magnetic Field on Superconductivity of Ultrathin Metal Films Grown on a Cleaved GaAs Surface, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有、88巻、2015、064710(1-5)、DOI:10.7566/JPSJ.84.064710

岡本徹、柘富龍一、劈開表面における電子輸送現象、表面科学、査読有、36 巻、2015、118-123、DOI:10.1380/jsssj.36.118

Ryuichi Masutomi, Tohru Okamoto, Simultaneous study by scanning tunneling spectroscopy and transport measurements in adsorbate-induced two-dimensional systems, Journal of Physics: Conference Series, 査読有、568巻、2014、052020(1-5)、DOI:10.1088/1742-6596/568/5/052020

T. Sekihara, T. Miyake, H. Ichinomiya, R. Masutomi, T. Okamoto, Two-dimensional superconductivity with broken inversion symmetry in one-atomic-layer metal films on cleaved GaAs surface, JPS Conference Proceedings, 査読有、3巻、2014、015023(1-6)、DOI: 10.7566/JPSCP.3.015023

[学会発表](計 7 件)

庭田正人、柘富龍一、岡本徹、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おける超伝導転移温度の上昇、日本物理学会、2017 年 3 月 17-20 日、大阪大学(大

阪府・豊中市)

庭田正人、枘富龍一、岡本徹、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、第 8 回低温センター研究交流会、2017 年 2 月 23 日、東京大学(東京都・文京区)

R. Masutomi、Adsorbate-induced quantum Hall system probed by scanning tunneling spectroscopy combined with transport measurements、EMN Spring Meeting、2016 年 3 月 8-11 日、Taipei(China)

枘富龍一、岡本徹、Adsorbate-induced quantum Hall system probed by scanning tunneling spectroscopy combined with transport measurements、第 7 回低温センター研究交流会、2016 年 2 月 23 日、東京大学(東京都・文京区)

枘富龍一、岡本徹、吸着原子が誘起する 2 次元電子系における走査トンネル分光顕微鏡と電子輸送特性の同時測定、日本物理学会、2014 年 9 月 7-10 日、中部大学(愛知県・春日井市)

R. Masutomi、T. Okamoto、Adsorbate-induced quantum Hall system and superconductivity in one-atomic-layer with Rashba spin-orbit coupling、27th International Conference on Low Temperature Physics、2014 年 8 月 6-13 日、Buenos Aires(Argentina)

R. Masutomi、In situ STM/STS and transport studies in adsorbate-induced two-dimensional electron systems、Collaborative Conference on Materials Research、2014 年 6 月 23-27 日、Incheon/Seoul(South Korea)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

枘富 龍一(MASUTOMI, Ryuichi)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号:00397027