

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740233

研究課題名(和文)半導体表面に創製されるスピン物性と2次元超伝導

研究課題名(英文)Spin physics and two dimensional superconductivity on semiconductor surfaces

研究代表者

枡富 龍一(Masutomi, Ryuichi)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：00397027

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：試料を作成したその場で走査トンネル分光顕微鏡(STM/S)と電気伝導特性を同時に測定できる装置を用いて、吸着原子が誘起する表面2次元電子系の研究と単原子層鉛を用いた2次元超伝導体の研究を行った。表面2次元電子系の研究では吸着物質の表面形態を明らかにした上で、走査トンネル分光法により空間的に平均化された状態密度の観測に成功した。また、空間反転対称性が破れた単原子層鉛を用いた研究においては面内磁場依存性から超伝導秩序関数が空間変調したヘリカル相が実現されていることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：An adsorbate-induced two-dimensional electron system (2DES) and superconductivity in one-atomic-layer Pb films at cleaved surfaces of InSb and GaAs are investigated by a low-temperature scanning tunneling microscope and spectroscopy combined with transport measurements in magnetic fields up to 14 T. We observed not only a STM image of Fe atoms at an InSb surface but also the spatially-averaged density of states in an adsorbate-induced 2DES. Moreover, we measured the parallel magnetic field dependence of the superconducting transition temperature T_c for a monolayer Pb film. The reduction in T_c is only a few % in magnetic fields up to 14 T, which is one order of magnitude higher than that of the Pauli limit. The observed weak parallel magnetic field dependence of T_c is explained in terms of an inhomogeneous superconducting state (helical state) predicted for 2D metals with a large Rashba spin splitting.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性

キーワード：表面・界面

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 (surface morphology) 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(i)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、(ii)近年実現された半導体表面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。(i) 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(薄膜構造の観察は試料作成を行った“その場”で行わなければならない、特殊な技術が必要である)。(ii)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。

本研究では電気伝導測定と STM を組み合わせた装置を開発し、表面形態と電気輸送特性の両面から2次元超伝導体の物理を明らかにする。試料には単原子層鉛の2次元超伝導体を使用する。この系では単原子層鉛が半導体基板と真空に挟まれているため、鉛の強いスピン軌道相互作用により特異な2次元超伝導状態が期待される。

2. 研究の目的

電気伝導測定と STM を組み合わせた手法により、(1)半導体劈開表面上の吸着物質の構造や表面形態を観測により理解した上で、吸着物質が表面2次元電子系の電気輸送特性に与える影響を解明する。また、(2)半導体表面に作成された単原子層鉛の薄膜構造を決定した上で、2次元超伝導体の面内磁場依存性を測定して、空間反転対象性が破れた2次元超伝導体に実現する特異な電子状態を明らかにすることが本研究の目的である。

3. 研究の方法

その場での劈開・蒸着のより創成された表面2次元系の電子物性と超伝導状態を電気伝導測定と SPM を組み合わせた手法により明らかにすることが本研究の課題である。実験装置としては、(i) 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した冷凍機、(ii) 小型蒸着装置付きヘリウム3冷凍機が必要である。したがって、平成23年度には上述の装置の作成と試験運

転・性能評価を行う。さらに、平成24年度前半に吸着原子が誘起する2次元電子系の研究(1)、平成24年度後半と平成25年度に2次元超伝導体(2)の研究を行う。

4. 研究成果

(1)平成23年度は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を製作・性能評価を行った。今回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(4.2K)・高磁場(14T)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。さらに、2次元超伝導体の研究に関しては、14Tの垂直・平行磁場下で0.3Kまで冷却可能なヘリウム3冷凍機を準備した。

(2)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。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。

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。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=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×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。ゼロ磁場のスペクトルにおいて $V=-50\text{mV}$ と -10mV の位置に立ち上がりが見られた。これは第一サブバンドと第2サブバンドのバンド端に相当するものである。磁場の増加とともにスピン分離を伴ったランダウ準位が観測された。磁場10Tおけるランダウ準位の間隔から求められる有効質量は $0.018m_e$ (m_e :自由電子の質量)、ランダウの g 因子は36であり、バルクのInSbのそれら($m^*=0.014m_0$, $|g|=51$)と若干違いが見られた。この要因はバンドの非放物線性による寄与が大きい。

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。

(3)GaAs 劈開基板上に作成された単原子層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。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。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。

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 9件)

Ryuichi Masutomi, Naotaka Toriyama, Tohru Okamoto, Low-Temperature Scanning Tunneling Microscopy and Transport Measurements on Adsorbate-Induced

Two-Dimensional Electron Systems, AIP Conference Proceedings, 査読有, 1566巻, 2013, 291-292
DOI: 10.1063/1.4848400

Takayuki Sekihara, Ryuichi Masutomi, Tohru Okamoto, Two-dimensional superconducting state of monolayer Pb films grown on GaAs(110) in a strong parallel magnetic field, Phys. Rev. Lett., 査読有, 111 巻, 2013, 057005(1-5)
DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.057005

T. Sekihara, R. Masutomi, T. Okamoto, Magnetic-field-independent superconductivity of ultrathin Pb films on cleaved GaAs surface, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, 456巻, 2013, 012034(1-5)
DOI: 10.1088/1742-6596/456/1/012034

R. Masutomi, T. Chiba, K. Sasaki, I. Yasuda, A. Sekine, K. Sawano, Y. Shiraki, T. Okamoto, Temperature, electron density and in-plane magnetic field dependence of cyclotron relaxation time in the two-dimensional metallic phase, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, 456巻, 2013, 012027(1-5)
DOI: 10.1088/1742-6596/456/1/012027

Tasuku Chiba, Ryuichi Masutomi, Kentarou Sawano, Yasuhiro Shiraki, and Tohru Okamoto, In-plane magnetic field dependence of cyclotron relaxation time in a Si two-dimensional electron system, Phys. Rev. B, 査読有, 86 巻, 2012 045310(1-3)
DOI: 10.1103/PhysRevB.86.045310

Ryuichi Masutomi, Kohei Sasaki, Ippei Yasuda, Akihito Sekine, Kentarou Sawano, Yasuhiro Shiraki, and Tohru Okamoto, Metallic Behavior of Cyclotron Relaxation Time in Two-Dimensional Systems, Phys. Rev. Lett., 査読有, 106 巻, 2011, 196404(1-4)
DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.196404

T. Okamoto, T. Mochizuki, M. Minowa, K.

Komatsuzaki, R. Masutomi, Magnetotransport in adsorbate-induced two dimensional electron systems on cleaved InAs surfaces, J. Appl. Phys. 査読有, 109巻, 2011, 102416(1-4)
DOI: 10.1063/1.3578263

R. Masutomi, K. Sasaki, I. Yasuda, A. Sekine, K. Sawano, Y. Shiraki, T. Okamoto, Cyclotron resonance in the two-dimensional metallic phase of Si quantum wells, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, 334 巻, 2011, 012057(1-5)
DOI: 10.1088/1742-6596/334/1/012057

R. Masutomi, K. Sasaki, I. Yasuda, A. Sekine, K. Sawano, Y. Shiraki, T. Okamoto, Cyclotron Resonance of Two Dimensional Electrons near the Metal-Insulator Transition, AIP Conference Proceedings, 査読有, 1399 巻, 2011, 277-278
DOI: 10.1063/1.3666361

(学会発表) (計 4 件)

Ryuichi Masutomi and Tohru Okamoto, STM/STS and transport measurements in adsorbate-induced two-dimensional electron systems, International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology (ISANN 2013), December 8-13, 2013, Hawaii, USA

栢富龍一、一ノ宮弘樹、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、2013年9月25-28日、徳島大学

R. Masutomi, N. Toriyama, T. Okamoto, Low-Temperature Scanning Tunneling Microscopy and Transport Measurements on Adsorbate-Induced Two-Dimensional Electron Systems, 31th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2012), July 29 to August 3, 2012, Zurich, Switzerland

R. Masutomi, T. Chiba, K. Sasaki, I. Yasuda,
A. Sekine, K. Sawano, Y. Shiraki and T.
Okamoto, Temperature, electron density and
in-plane magnetic field dependence of
cyclotron relaxation time in the
two-dimensional metallic phase, 20th
International Conference on High Magnetic
Fields in Semiconductor Physics, July 22 to
July 27, 2012, Chamonix, France

(図書)(計 0 件)

(産業財産権)

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

枅富 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

(2)研究分担者

()

研究者番号:

(3)連携研究者

()

研究者番号: