

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 12 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400313

研究課題名(和文) 精密温度制御ブレイクジャンクションによる低温量子伝導現象の探索

研究課題名(英文) Quantum transport properties in temperature controlled break junctions

研究代表者

辻井 宏之 (TSUJII, HIROYUKI)

金沢大学・学校教育系・教授

研究者番号：10392036

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：ナノコンタクトの電気伝導度や熱的特性の測定から低温量子伝導現象を探索することを目的として、温度制御したブレイクジャンクションによる金属ナノ接合の研究を行った。ニオブ細線を使った超伝導ジャンクションでは、温度制御により超伝導-常伝導のナノ接合を形成し、その性質を調べた。ジャンクションにヘリウム原子を吸着させた実験と合わせて、温度制御した単分子超伝導デバイスの研究基盤を確立することができた。

研究成果の概要(英文)：We have carried out experiments to explore anomalous phenomena in various nano-contacts with a temperature controlled break junction. In niobium superconducting junctions, normal-metal/superconductor junctions have been achieved with a heater placed in one side of the contacts. The tunnel conductance between two metallic gold electrodes is found to be influenced by absorbed helium atoms. We pursue the research of superconducting devices with molecules following these results.

研究分野：低温物理学

キーワード：ナノコンタクト 破断接合 トンネル現象 量子化コンダクタンス 低温物性

1. 研究開始当初の背景

メカニカル・ブレイクジャンクションは、破断された細線間の距離をナノスケール以下の精度でコントロールする実験技術であり、単原子コンタクトやナノワイヤの伝導現象の研究に用いられている。低温に冷却することで新奇な量子現象の観測が期待できる。また、破断する試料として様々な物質を用いることで、電気伝導度の振舞いからその物質特有の物性を知ることが可能である。さらに、間隔を制御できる微小電極として接合間に微小な物質を挟みこみ、ナノスケール導体の伝導現象を観測することも可能である。

コンダクタンス量子化の観測や単原子接合の安定的な形成など、ブレイクジャンクションによって形成される原子鎖は他の方法と比べても理想的な1次元電子系と考えられる。低次元では量子力学的な不確定性原理に起因する量子ゆらぎが重要な役割を果たすようになり、特異な量子効果が電気伝導度の温度依存性などに現れると期待できる。また、ブレイクジャンクションの両側リードの温度制御により、ナノ物質の電気伝導度と熱伝導度を同時に議論することが可能となる。次世代ナノ電子デバイスへの応用への期待から様々なナノスケール物質が研究されているが、デバイスの微小化に伴いその発熱が問題となるため、低次元物質においては、電気的性質ばかりでなく熱的特性の理解が重要であり、これらを解明するのにブレイクジャンクションは適している。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ブレイクジャンクションを利用したナノコンタクトの精密な温度制御から、1次元電子系の電気伝導度や熱的特性を測定し、低温における量子伝導現象を解明することにある。金属単原子鎖における電気伝導度の温度依存性からは、量子液体的な振舞いを検証し、その安定性やコンダクタンス量子化との関係を明らかにする。また、電気伝導度の量子化と熱伝導の関係について知見を深める。超伝導電極を持つ分子デバイスの電気伝導度の測定を温度制御しながら行い、量子効果や電子スピンへの影響を検証する。これらの実験を通して、ナノ量子デバイスの基礎研究とする。

3. 研究の方法

ブレイクジャンクションの測定を低温で行うための冷凍機は、冷却および昇温が速やかに行なうことができ、試料となる金属細線の取替えが短時間で可能となるように、液体ヘリウムベッセルに直接挿入するトップロード型とした。高真空容器中に置いた基板にサンプルとなる金属細線を取り付け低温にした後、低温においたマイクロメータヘッド

を室温部から制御し基板をたわませ、細線を破断できるようにした。ジャンクションの距離はピエゾ素子を用いて基板の曲がり調節することによりコントロールした。

細線の固定および温度計やヒーターを設置する基板は、装置からナノジャンクションへの熱流入を減少させるため、金属と非金属を貼り合わせて製作した。微小な温度計およびヒーターを接合部直近の両側リードに設置した。温度計は、チップ型抵抗器を加工することで小型化した。接合部の両端に温度差をつけるために、高抵抗のチップ型抵抗器を加工して小型ヒーターとした。これらの装置をブレイクジャンクションに設置し、ナノ接合の温度制御を行った。

4. 研究成果

(1) 超伝導接合の温度制御

Nb ワイヤーを用いた超伝導での実験では、ジャンクションの距離を変えながら電流電圧特性を測定した。さらに片側接点をヒーターで温度制御し、単原子の超伝導-常伝導(SN)接合の実験を試みた。接点の両側が超伝導状態のとき、微分コンダクタンスのスペクトルは超伝導-超伝導(SS)接合に特有な鐘型の曲線を示し、超伝導ギャップの2倍に相当する小さなショルダーも見られた。片側の電極を常伝導にしたとき、ディップの線幅はおよそ1/2となり、SN接合が形成されていることが示唆された。片方が常伝導であるべき温度でも接合の大きさ等によってはSS接合の振舞いを示すなど、SN接合の単原子化による影響の解明が新たな課題となった。

(2) 金接合の温度依存性と He 原子の影響

金の単原子接合では、コンダクタンス量子化の状態での温度依存性を調べた。ジャンクションのサイズを保ったまま、精密に温度を変化させたが、コンダクタンスには顕著な変化は見出せなかった。コンダクタンスの値や温度範囲を大きく変えることにより、温度の影響をさらに検証することが課題である。

接合部にヘリウム原子を挟んだ場合の変化を検証した。真空中では接合の距離に対して指数関数的なコンダクタンスの振舞いをするのに対して、ジャンクションにヘリウム原子を吸着させたとき、真空中での振舞いから逸脱し、コンダクタンスの減少が観測された。ヘリウム原子がトンネル状態での電子輸送に影響を及ぼしていることを示唆している。過去の報告ではヘリウム原子サイズ程度の接合距離で異常が現れたのに対して、それよりも短い距離でも観測された。温度や圧力などを変化させて繰り返し測定を行った結果、減少の始まる接合間距離はバイアス電圧やヘリウム圧力にある程度依存するが、むしろ接合形成ごとのサンプル依存性が大きく、

接合間距離がヘリウム原子の直径程度のとき減少の割合が最大となることが分かった。

常伝導および超伝導での実験を通して、温度を制御した単原子接合の研究環境を確立することができた。

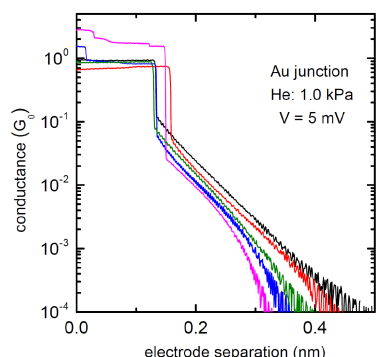


図 1. ヘリウムガス中の金接合のコンダクタンス.コンダクタンス減少は様々な接合距離の値から観測された.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

H. Kambara, Y. Obinata, K. Tenya, and H. Tsujii, "Local conductance spectra of itinerant ferromagnetic SrRuO₃ through break junction", Japanese Journal of Applied Physics 55, 093004 (2016). 査読有.
DOI: 10.7567/JJAP.55.093004

H. Takata, Y. Inagaki, T. Kawae, K. Ienaga and H. Tsujii, "Magnetic and Superconducting Properties of Vanadium Nanoconstrictions", Journal of Physics: Conference Series 592, 012137 (2015). 査読有.
DOI: 10.1088/1742-6596/592/1/012137

K. Ienaga, H. Takata, Y. Onishi, Y. Inagaki, H. Tsujii, T. Kimura, and T. Kawae, "Spectroscopic study of low-temperature hydrogen absorption in palladium", Applied Physics Letters 106, 021605 (2015). 査読有.
doi: 10.1063/1.4905729

〔学会発表〕(計 19 件)

高田弘樹, 家永紘一郎, モハメドサイフルイスラム, 稲垣祐次, 辻井宏之, 橋爪健一, 河江達也, Nb ナノコンタクトへの低温での水素吸蔵と共鳴トンネル現象の観測, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 20 日, 大阪大学(大阪府豊中市)

高田弘樹, 家永紘一郎, 上野友輔, 瀬尾優太, モハメドサイフルイスラム, 稲垣祐次, 辻井宏之, 橋爪健一, 河江達也, 金属ナノコンタクトへの低温水素吸蔵と共鳴トンネル現象の観測, 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)

大日方優輝, 神原浩, 天谷健一, 辻井宏之, SrRu_{1-x}Fe_xO₃ の微細接合における電気伝導特性, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月 15 日, 金沢大学(石川県金沢市)

高田弘樹, 家永紘一郎, 梶原裕太, モハメドサイフルイスラム, 稲垣祐次, 辻井宏之, 橋爪健一, 大塚哲平, 河江達也, Nb ナノコンタクト中水素原子の共鳴トンネル現象の観測, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月 14 日, 金沢大学(石川県金沢市)

高田弘樹, 家永紘一郎, 梶原裕太, モハメドサイフルイスラム, 稲垣祐次, 辻井宏之, 橋爪健一, 河江達也, 電気伝導測定を用いた金属ナノコンタクト中水素の共鳴トンネル現象の観測, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月 13 日, 金沢大学(石川県金沢市)

M.S. Islam, H. Takata, Y. Ueno, Y. Inagaki, H. Tsujii, K. Hashizume, T. Kawae, Effects of hydrogen and deuterium in vanadium constrictions, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月 13 日, 金沢大学(石川県金沢市)

高田弘樹, 家永紘一郎, 上野友輔, モハメドサイフルイスラム, 川崎洋輔, 稲垣祐次, 辻井宏之, 橋爪健一, 大塚哲平, 河江達也, V ナノコンタクトへの低温での水素・重水素吸蔵現象と電気伝導特性変化, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 22 日, 東北学院大学(宮城県仙台市)

高田弘樹, 家永紘一郎, モハメドサイフルイスラム, 稲垣祐次, 辻井宏之, 橋爪健一, 大塚哲平, 河江達也, 金属ナノコンタクトへの低温水素注入による電子状態制御, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 21 日, 東北学院大学(宮城県仙台市)

M.S. Islam, H. Takata, Y. Ueno, Y. Inagaki, H. Tsujii, K. Hashizume, T. Kawae, Impurity effects of hydrogen and deuterium in superconducting V nanoconstrictions, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 19 日, 東北学院大学(宮城県仙台市)

大日方優輝, 神原浩, 天谷健一, 辻井宏之, SrRuO₃ ブレーク接合における電気伝導特性, 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)

辻井宏之, 高田恵里, 西村安紀子, 水上周, 神原浩, 河江達也, ヘリウム吸着原子による金ナノギャップ電極のトンネル電流への影響, 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)

上野友輔, 高田弘樹, 家永紘一郎, モハメドサイフルイスラム, 稲垣祐次, 辻井宏之, 橋爪健一, 大塚哲平, 河江達也, 液体水素温度における金属ナノコンタクトへの水素吸蔵現象と電気伝導特性変化, 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)

高田弘樹, 家永紘一郎, 上野友輔, モハメドサイフルイスラム, 稲垣祐次, 辻井宏之, 橋爪健一, 大塚哲平, 河江達也, 液体水素温度における V, Nb ナノコンタクトへの水素吸蔵現象の研究, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月 17 日, 関西大学 (大阪府吹田市)

高田弘樹, 家永紘一郎, 上野友輔, Md. Saiful Islam, 川崎洋輔, 稲垣祐次, 辻井宏之, 橋爪健一, 大塚哲平, 河江達也, 液体水素温度における金属ナノコンタクトへの水素・重水素吸蔵現象の研究, 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)

川崎洋輔, 高田弘樹, Islam Saiful, 西村直人, 稲垣祐次, 家永紘一郎, 辻井宏之, 橋爪健一, 大塚哲平, 河江達也, 低温における金属内への水素および重水素の吸蔵・拡散現象の研究, 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)

上野友輔, 高田弘樹, 家永紘一郎, 川崎洋輔, Md.Saiful Islam, 稲垣祐次, 辻井宏之, 橋爪健一, 大塚哲平, 河江達也, 超伝導ナノコンタクトに対する水素不純物効果の研究, 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)

高田弘樹, 家永紘一郎, 稲垣祐次, 辻井宏之, 橋爪健一, 大塚哲平, 河江達也, 金属バナジウムへのトンネル効果による水素吸蔵現象, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月 10 日, 中部大学 (愛知県春日井市)

高田弘樹, 家永紘一郎, 稲垣祐次, 辻井宏之, 橋爪健一, 大塚哲平, 河江達也, 液体水素温度における量子トンネルによる金属への水素吸蔵実験, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月 9 日, 中部大学 (愛知県春日井市)

上野友輔, 高田弘樹, 家永紘一郎, 稲垣祐次, 辻井宏之, 河江達也, 超伝導ナノコンタクトにおけるジョセフソン効果のサイズ依存性, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月 10 日, 中部大学 (愛知県春日井市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

辻井 宏之 (TSUJII, Hiroyuki)
金沢大学・学校教育系・教授
研究者番号: 10392036