

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25247053

研究課題名(和文)半導体表面超構造における超伝導発現と制御

研究課題名(英文)Manifestation and control of superconductivity in semiconductor surface reconstructions

研究代表者

内橋 隆(Uchihashi, Takshi)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・MANA研究者

研究者番号：90354331

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,200,000円

研究成果の概要(和文)：シリコン表面上のインジウム原子層から構成されるSi(111)-($\sqrt{7}\sqrt{3}$)-In表面超構造における超伝導現象を電気輸送測定、走査トンネル顕微鏡、および角度分解光電子分光などの実験手法によって調べた。二次元系特有の超伝導揺らぎの観測や、表面原子ステップにおけるジョセフソン超伝導渦の発見、乱れによる超伝導-金属転移の実空間観測、有機分子由来の電荷移動とスピンによる超伝導状態の制御などに成功し、大きな成果を上げた。また、ラジカル有機分子が自己組織化により作り出す異方的ディラック電子状態についても知見を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：We have studied the superconductivity of the Si(111)-($\sqrt{7}\sqrt{3}$)-In surface reconstruction, which consists of indium atomic layers on a silicon surface, through electron transport measurement, scanning tunneling microscopy, and angle-resolved photoelectron spectroscopy. Our results include the observation of superconducting fluctuations inherent in a two-dimensional system, the discovery of Josephson vortices at surface atomic steps, the real-space observation of a disorder-induced superconductor-metal transition, and the control of superconductivity using the charge transfer and spins originating from organic molecules. We have also found anisotropic Dirac-like electronic states of self-assembled radical organic molecules.

研究分野：超伝導、低温物性実験、表面科学

キーワード：超伝導 表面超構造 二次元 原子層 有機分子 電気伝導 走査トンネル顕微鏡 超高真空

1. 研究開始当初の背景

表面超構造物質は、半導体表面上に単原子レベルの金属原子が吸着してできた理想的な2次元物質である。これまで、超伝導状態の測定に必要な極低温環境と、表面超構造の研究に不可欠な超高真空環境との両立が困難だったため、表面超構造物質で超伝導が発現するかどうかは未解決の問題だった。

しかし、今世紀に入って、超高真空・極低温の環境での実験技術が大きく進歩し、半導体表面におけるナノスケール超薄膜を対象にした超伝導研究が行われるようになった。こうした中で2011年に、我々のグループは、シリコン表面にインジウム単原子層が吸着した表面超構造において超伝導が発現することを電気伝導測定によって初めて実証した。我々の実験は、電気伝導測定によって超伝導研究にとって最も重要な抵抗値ゼロなどの電子輸送特性を明らかにしたという点で、非常に重要である。また、我々の実験から巨視的なコヒーレンスが確立して系全体が一つの超伝導状態になっていることや、非常に高い密度の超伝導電流が流れ得ることが明らかになり、応用の観点からも有望であることがわかった。この研究をきっかけに、日本を中心として表面超構造物質における超伝導研究が本格的に開始されようとしていた。

2. 研究の目的

本研究は、以下の2つのテーマについて研究を行い、我々の研究成果をさらに大きく発展させることを目的にした。1) 表面超構造における2次元超伝導状態の発現機構及び、ラシュバスピンスplitした超伝導状態の解明。2) 有機分子の自己組織化を利用した超伝導状態のナノテクノロジー制御。これらの研究により、表面科学の立場から超伝導研究の発展に大きく貢献することを目指した。

3. 研究の方法

これまでに我々が極低温超高真空伝導計測装置を中心として実験を行う。本装置は、試料作製から電極の取り付け、低速電子回折装置(LEED)と室温走査トンネル顕微鏡(STM)による構造評価、最低温度1.8 Kでの電気伝導測定のすべてのプロセスを超高真空環境を破らずに行うため、信頼性の高いデータを取ることが可能である。試料は主としてシリコン基板を用い、その清浄表面に原子層レベルのインジウムなどの金属層を成長させたものを用いる。また、有機分子を真空蒸着により表面で自己組織化させた試料も用いる。

さらに、本研究では液体ヘリウムデュア型の超伝導マグネット付きクライオスタットを新規に導入して、その整備を行う。新クライオスタットは超高真空対応とし、真空を破らずに試料を挿入できるようにする。到達最低温度として1.0 K、最高磁場は5 Tを目標

とする。さらに試料に対する磁場の印加方向を変えることができるように、試料ホルダーの回転移動機構を装着する。また、角度分解光電子分光装置や超高真空極低温STMなどによる測定を通じて、その超伝導・常伝導での電子状態をそれぞれ波数空間および実空間で観測して、詳細な情報を得る。

4. 研究成果

(1) 表面超構造物質の超伝導転移における揺らぎの効果

表面超構造は最も理想的な二次元系の一つであり、そこでの超伝導発現には低次元系特有の揺らぎの効果が大きく働くと考えられる。Si(111)-($\sqrt{7}\times\sqrt{3}$)-In 表面超構造における超伝導転移点(T_c)付近での抵抗変化を精密に測定し、 $T > T_c$ の温度領域で超伝導転移の前駆現象があることを明らかにした(図1)。超伝導の微視的理論でのAslamazov-Larkin項とMaki-Thompson項をもちいて定量的に実験結果を説明できた。また、 $T > T_c$ の温度領域では温度とともに減少する残留抵抗があることを見いだした。電流-電圧特性の非線形性の温度変化から、Kosterlitz-Thouless(KT)が起こっていることが示唆されたが、詳細な解析は今後の課題である。

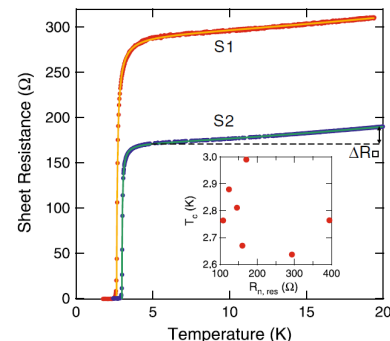


図1 Si(111)-($\sqrt{7}\times\sqrt{3}$)-In 表面超構造の面抵抗値の温度依存性と理論式によるフィッティング

(2) 表面原子ステップにおけるジョセフソン超伝導渦のSTM観測

これまでの我々の電気伝導測定による研究で、半導体基板の表面に必ず存在する原子レベルの段差(原子ステップ)がジョセフソン接合として働くことが示唆されていた。本研究で、その直接的な証拠を得ることに成功した。超伝導状態になった表面原子層物質に磁場を加えると、磁束の侵入によって超伝導電流の渦ができる。極低温STMをつかってSi(111)-($\sqrt{7}\times\sqrt{3}$)-In 表面超構造の原子ステップに補足された超伝導渦を観測したところ、渦が大きく変形して中心付近で壊れていた超伝導状態が復活することを見出した(図2)。これは、原子ステップがジョセフソン接合として働くため、超伝導電流が制限されて位相がそこで不連続に変化するためである。このような異常な超伝導渦はジョセフソン

ン渦と呼ばれる。その電子状態を直接に観測したのはこれが初めてである。実験結果は Bogoliubov-de Gennes 方程式を用いた理論解析の結果とも良く一致した。

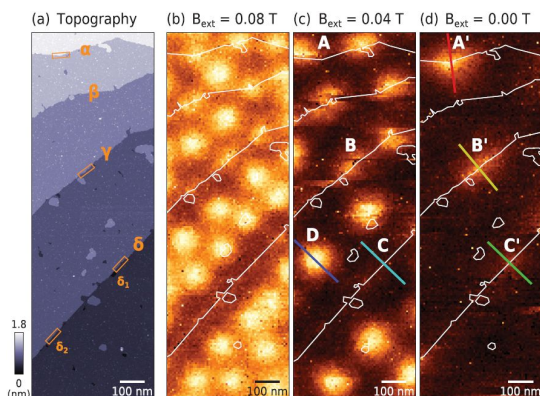


図2 Si(111)-($\sqrt{7}\times\sqrt{3}$)-In 表面超構造に発生した超伝導渦のSTM観察。最も右の像では、実線部に存在する原子ステップにそってジョセフソン渦が発生しているのが観測された。

(3) 乱れによる超伝導 - 金属転移のSTM観測

二次元系では結晶性の乱れの影響が大きく、超伝導状態は乱れによって失われて金属的または絶縁体的な状態に転移する。このような変化をSTMによって実空間において観測した。Si(111)-($\sqrt{7}\times\sqrt{3}$)-In 表面超構造の乱れの小さな島状の領域では、明瞭な超伝導ギャップと超伝導渦が観測されたが、その外の乱れの大きな領域では超伝導ギャップとは異なるブロードなギャップ構造のみが観測され、超伝導渦も観測されなかった(図3)。よって、島の内部では超伝導状態、外部では絶縁体に近い金属的状态になっている。走査トンネル分光スペクトルの解析によって乱れた領域での電子の平均自由行程を求めて超伝導転移温度の減少を見積もったところ、実験結果とコンシステントな結果を得ることができた。表面超構造とそのSTM観測は、乱れによる超伝導 - 金属転移の研究にも非常に有用である。

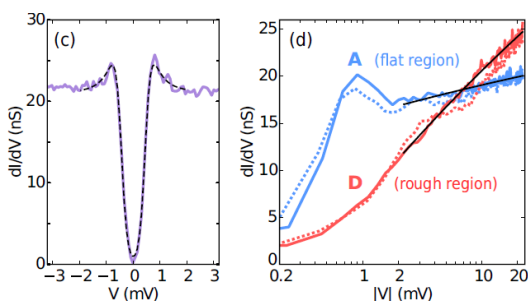


図3 Si(111)-($\sqrt{7}\times\sqrt{3}$)-In 表面超構造上で得られたSTMトンネルスペクトル。左は乱れの少ない領域で、明瞭な超伝導ギャップが観測されている。右は乱れた領域では超伝導ギャップが壊れて、絶縁体的なギャップ構造が

現れることを示している。

(4) ラジカル分子の自己組織化単分子膜

Cu(111) 表面にラジカル有機分子である BDTDA (=4,4'-bis(1,2,3,5-dithiadiazolyl)) の単分子層膜を成長させて、その配列構造と電子状態をSTMを用いて調べた。BDTDA分子はグラフェンに似た蜂の巣状構造に自己組織化し、ゼロバイアス付近でV字型を示す異常なトンネルスペクトルが観測された(図4)。第一原理計算を行ったところ、異方的なディラック電子状態の存在が示唆され、実験で観測されたV字型のスペクトルはディラック点に対応することがわかった。今後はこのようなディラック電子系が超伝導になった場合に生じる現象の解明が期待される。

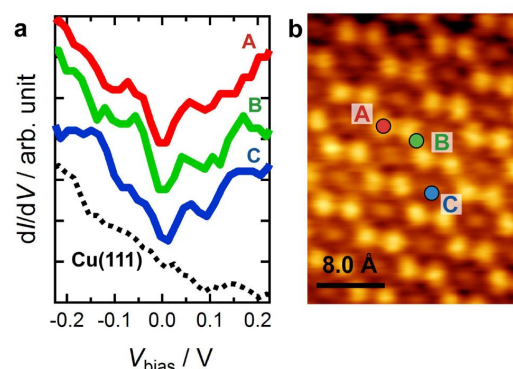


図4 BDTDA 単分子膜の蜂の巣状配列構造のSTM像と、ゼロバイアス付近でのV字型のトンネルスペクトル。

(5) フタロシアニン分子を用いた表面超構造超伝導の制御

中心に金属原子(Cu, Fe, Mn)が配位したフタロシアニン(Pc)分子をSi(111)-($\sqrt{7}\times\sqrt{3}$)-In 表面超構造に単分子層自己組織化配列させ、その超伝導に与える影響を調べた。CuPcの場合はTcが約5%上昇することがわかった。一方で、FePc, MnPcの場合はTcを抑制し、特にMnPcの場合は0.3MLの被覆率で超伝導が消滅した。第一原理計算とX線磁気円二色性測定(XMCD)の結果、Tcの上昇はインジウム超伝導層からフタロシアニン分子への電荷移動、Tcの減少は金属原子のd軌道に残ったスピンの影響であることがわかった。この結果は、有機分子の電荷とスピンを用いてこのような二次元超伝導物質を制御することが可能であることを示している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計26件)

- (1) Katsumi Nagaoka, Takashi Uchihashi, and Tomonobu Nakayama, "Observation of lateral band-bending in the edge vicinity of atomically-thin Bi insulating film formed on Si(111) surface", *Surf. Sci.* **644**, 41-45

- (2016). [DOI:10.1016/j.susc.2015.09.008] 査読有り
- (2) 内橋 隆、「表面超構造超伝導体—実験的検証とジョセフソン渦の観測—」日本物理学会誌 71 巻 3 号 164-169 頁 (2016). 査読有り
- (3) Masayuki Yamamoto, Rie Suizu, Sudipta Dutta, Puneet Mishra, Tomonobu Nakayama, Kazuyuki Sakamoto, Katsunori Wakabayashi, Takashi Uchihashi, and Kunio Awaga, "Self-assembled honeycomb lattice in the monolayer of cyclic thiazyl diradical BDTDA (=4,4'-bis(1,2,3,5-dithiadiazolyl)) on Cu(111) with a zero-bias tunneling spectra anomaly", **Sci. Rep.** 5, 18359(1-7) (2015). [DOI:10.1038/srep18359] 査読有り
- (4) Takashi Uchihashi, "Engineering topological superconductors using surface atomic-layer/molecule hybrid materials", **Nanotechnology** 26, 344004(1-8) (2015). [DOI: 10.1088/0957-4484/26/34/344004] 査読有り
- (5) Shunsuke Yoshizawa, Howon Kim, Yukio Hasegawa, and Takashi Uchihashi, "Disorder-induced suppression of superconductivity in the Si(111)-($\sqrt{7}\times\sqrt{3}$)-In surface: scanning tunneling microscopy study", **Phys. Rev. B** 92, 041410(R)(1-5) (2015). [DOI: 10.1103/PhysRevB.92.041410] 査読有り
- (6) Puneet Mishra, Jonathan P. Hill, Saranyan Vijayaraghavan, Wim Van Rossom, Shunsuke Yoshizawa, Maricarmen Grisolia, Jorge Echeverria, Teruo Ono, Katsuhiko Ariga, Tomonobu Nakayama, Christian Joachim, and Takashi Uchihashi, "A Current-driven Supramolecular Motor with In-situ surface Chiral Directionality Switching", **Nano Lett.** 15, 4793-4798 (2015). [DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b01908] 査読有り
- (7) Shunsuke Yoshizawa, Howon Kim, Takuto Kawakami, Yuki Nagai, Tomonobu Nakayama, Xiao Hu, Yukio Hasegawa, and Takashi Uchihashi, "Impact of Surface Conditions on the Superconductivity of Si(111)-($\sqrt{7}\times\sqrt{3}$)-In", **e-J. Surf. Sci. Nanotech.** 13, 151-154 (2015). [DOI: 10.1380/ejsnt.2015.151] 査読有り
- (8) 吉澤 俊介、内橋 隆「シリコン表面金属原子層の超伝導と量子渦」固体物理 50 巻 6 号 323-332 頁 (2015). 査読有り
- (9) 内橋 隆、吉澤 俊介「シリコン表面超構造における超伝導輸送現象」表面科学 36 巻 3 号 112-117 頁 (2015). [DOI: 10.1380/jssj.36.112] 査読有り
- (10) S.D. Stolwijk, K. Sakamoto, A.B. Schmidt, P. Kruger, and M. Donath, Spin texture with a twist in momentum space for TI/Si(111), **Phys. Rev. B** 91, 245420(1-6) (2015). [doi: 10.1103/PhysRevB.91.245420] 査読有り
- (11) Takuto Kawakami, Yuki Nagai, Shunsuke Yoshizawa, Howon Kim, Tomonobu Nakayama, Yuki Hasegawa, Takashi Uchihashi, and Xiao Hu, "Excitation spectrum of Josephson vortices on surface superconductor", **J. Phys.: Conf. Ser.** 568, 022022(1-5) (2014). [DOI: 10.1088/1742-6596/568/2/022022] 査読有り
- (12) Shunsuke Yoshizawa, Howon Kim, Takuto Kawakami, Yuki Nagai, Tomonobu Nakayama, Xiao Hu, Yukio Hasegawa, and Takashi Uchihashi, "Imaging Josephson Vortices on the Surface Superconductor Si(111)-($\sqrt{7}\times\sqrt{3}$)-In using a Scanning Tunneling Microscope", **Phys. Rev. Lett.** 113, 247004(1-5) (2014). [DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.247004] 査読有り
- (13) Shunsuke Yoshizawa and Takashi Uchihashi, "Superconducting Phase Transition of the Si(111)-($\sqrt{7}\times\sqrt{3}$)-In surface: Solution of Tc discrepancy", **J. Phys. Soc. Jpn.** 83, 065001(1-2) (2014). [DOI: 10.7566/JPSJ.83.065001] 査読有り
- (14) 内橋 隆、プニート・ミシュラ「スピン偏極走査トンネル顕微鏡—探針が測定に及ぼす影響を中心に—」J. Vac. Soc. Jpn. vol.57, pp.324-331 (2014). [DOI: 10.3131/jvsj.2.57.324] 査読有り
- (15) S.D. Stolwijk, K. Sakamoto, A.B. Schmidt, P. Kruger, and M. Donath, Thin line of a Rashba-type spin texture: Unoccupied surface resonance of TI/Si(111) along Γ -M, **Physical Review B** 90, 161109(R)-1-5 (2014). [DOI:10.1103/PhysRevB.90.161109] 査読有り
- (16) Takashi Uchihashi, Puneet Mishra, and Tomonobu Nakayama, "Resistive phase transition of the superconducting Si(111)-($\sqrt{7}\times\sqrt{3}$)-In surface", **Nanoscale Res. Lett.** vol. 8, pp.167(1-7) (2013) [DOI: 10.1186/1556-276X-8-167]. 査読有り
- (17) K. Sakamoto, T.-H. Kim, T. Kuzumaki, B. Muller, Y. Yamamoto, M. Ohtaka, J.R. Osiecki, K. Miyamoto, Y. Takeichi, A. Harasawa, S.D. Stolwijk, A.B. Schmidt, J. Fujii, R.I.G. Uhrberg, M. Donath, H.W. Yeom, and T. Oda, "Valley spin polarization by using the extraordinary Rashba effect on silicon" **Nature Communications** 4, 2073-1-6 (2013) [DOI: 10.1038/ncomms3073] 査読有り

{ 学会発表 } (計 69 件)

(1) S. Yoshizawa, T. Uchihashi,

- "Berezinskii-Kosterlitz-Thouless transition in atomic-layer superconductor on silicon surface", MANA International Symposium 2016, Tsukuba International Congress Center (Tsukuba, Japan), 2016年03月09-11日.
- (2) Takashi Uchihashi, "Surface Sensitive Atomic-Layer Superconductors", MANA International Symposium 2016, Tsukuba International Congress Center (Tsukuba, Japan), 2016年03月09-11日.
- (3) Takashi Uchihashi, "Surface Atomic Layer Superconductors on Silicon: Experimental Demonstration, Josephson vortices, and Molecular Control", CEMS Topical Meeting on Emergent 2D Materials, Wako, Japan, Dec. 11-12, 2015. (invited)
- (4) Takashi Uchihashi, "Surface Superconductors with Atomic Steps, Disorder, and Organic Molecules", The 15th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-15), Hiroshima, Japan, November 15-20, 2015. (invited)
- (5) T. Uchihashi, S. Yoshizawa, S. Vijayaraghavan, T. Nakayama, H. Kim, Y. Hasegawa, Y. Takagi, and T. Yokoyama, "Tuning of the Surface Superconductor Si(111)-($\sqrt{7}\times\sqrt{3}$)-In with Self-assembled Magnetic Molecules", The 31st European Conference on Surface Science (ECOSS-31), Barcelona, Spain, 2015/08/31 - 2015/09/04.
- (6) Takashi Uchihashi, "Surface Superconductors on Silicon: Atomic-Step Josephson Junctions and Molecular Hybrid Materials", Workshop MANA-DIPC "Nanostructures and Complex Functional Materials", San Sebastian, Spain, Aug. 27-28, 2015. (invited)
- (7) T. Uchihashi, S. Yoshizawa, T. Nakayama, H. Kim, Y. Hasegawa, T. Kawakami, Y. Nagai, and X. Hu, "Josephson Vortices on a Surface Atomic-Layer Superconductor Observed with a Scanning Tunneling Microscope", EP2DS21/ MSS17, Sendai, Japan, 2015/07/27 - 2015/07/31.
- (8) Takashi Uchihashi, "Surface Atomic-layer Superconductors on Silicon: Atomic-step Josephson Junctions and Molecular Control", NIMS Conference 2015, Tsukuba, Japan, July 14-16, 2015. (invited)
- (9) Takashi Uchihashi, "Surface Atomic-layer Superconductors on Silicon: Electron Transport, STM, and Control with Molecules", 11th Japan-France Workshop on Nanomaterials, Rennes, France, May 27-29, 2015. (invited)
- (10) Takashi Uchihashi, "Atomic layer superconductors on silicon and intrinsic lateral Josephson junctions", 2015 EMN Meeting on Quantum Technology, Beijing Xijiao Hotel, Beijing, China, Apr. 14-17, 2015. (invited)
- (11) S. Yoshizawa, "Observation of Josephson vortices in surface atomic-layer superconductor by scanning tunneling microscopy", 28th International Symposium on Superconductivity (ISS2015), Tower Hall Funabori (Tokyo, Japan), 2015年11月16-18日. (invited)
- (12) S. Yoshizawa, H. Kim, T. Kawakami, Y. Nagai, T. Nakayama, X. Hu, Y. Hasegawa, T. Uchihashi, "Scanning tunneling microscopy of superconducting vortices trapped at atomic steps of Si(111)-($\sqrt{7}\times\sqrt{3}$)-In", 31st European Conference on Surface Science (ECOSS-31), International Convention Center of Barcelona (Barcelona, Spain), 2015年08月31日-09月04日.
- (13) S. Yoshizawa, H. Kim, T. Kawakami, Y. Nagai, T. Nakayama, X. Hu, Y. Hasegawa, T. Uchihashi, "Scanning Tunneling Spectroscopy of Josephson Vortices in the Surface Superconductor Si(111)-($\sqrt{7}\times\sqrt{3}$)-In", Materials and Mechanisms of Superconductivity 2015 (M2S 2015), Geneva International Conference Center (Geneva, Switzerland), 2015年08月23-28日.
- (14) S. Yoshizawa, S. Vijayaraghavan, H. Kim, Y. Hasegawa, T. Nakayama, T. Uchihashi, "Superconducting characteristics of Si(111)-($\sqrt{7}\times\sqrt{3}$)-In covered with self-assembly monolayers of transition-metal phthalocyanines", Materials and Mechanisms of Superconductivity 2015 (M2S 2015), Geneva International Conference Center (Geneva, Switzerland), 2015年08月23-28日.
- (15) S. Yoshizawa, H. Kim, T. KAWAKAMI, Y. Nagai, T. Nakayama, X. Hu, Y. Hasegawa, T. Uchihashi, "Josephson vortices in atomic-layer superconductor probed by scanning tunneling microscopy", NIMS Conference 2015, Tsukuba International Congress Center (Tsukuba, Japan), 2015年07月14-16日.
- (16) Kazuyuki Sakamoto, Peculiar Electronic Structure of Heavy Element Alloy Formed on a Semiconductor Surface, the 15th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-15), 2015年11月 (invited)
- (17) T. Uchihashi, "Observation and Control of Superconductivity in Silicon Surface Reconstructions", The 7th SRC Winter Workshop on Topological Matter and 11th Surface NanoScience Workshop, Phoenix Park Resort, Pyeongchang, Korea, Feb. 14-16, 2015. (invited)
- (18) T. Uchihashi, "Molecular control of superconducting properties of the Si(111)-($\sqrt{7}\times\sqrt{3}$)-In surface", Symposium on Surface and Nano Science 2015 (SSNS'15), New Furano Prince Hotel, Furano, Japan,

- Jan. 14-18, 2015.
- (19) T. Uchihashi, "Atomic Layer Superconductors on Silicon Surface – Towards Engineering Exotic 2D Materials", The 7th International Symposium on Surface Science (ISSS-7), Matsue, Japan, Nov. 2-6, 2014. (invited)
- (20) T. Uchihashi, "Atomic Layer Superconductors on Silicon Surface – New Frontier of Low Dimensional Materials", 10th International Conference on New Theories, Discoveries and Applications of Superconductors (New3SC-10), Chongqing, China, Oct. 26-29, 2014. (invited)
- (21) 内橋隆, 「半導体表面超構造における超伝導」, 日本物理学会 2014 年秋季大会、中部大学春日井キャンパス (春日井市), 2014 年 9 月 7-10 日. (invited)
- (22) T. Uchihashi, "Mechanical Rotations of Chiral Molecular Dimers Induced by Scanning Tunneling Microscope", 2nd International Workshop on Spin Mechanics, Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai, Japan, Jun. 21-24, 2014. (invited)
- (23) T. Uchihashi, "Hybrid 2D Superconductor made of Monatomic Indium Layer and Organic Molecules", E-MRS 2014 Spring Meeting, Lille, France, May 26-30, 2014.
- (24) Takashi Uchihashi, "Monatomic Surface Superconductor: Challenge for Creating New Two-dimensional Materials", International Workshop "TOPOLOGY in the New Frontiers of Materials Science", Tsukuba, Japan, Apr. 1-2, 2014. (invited)
- (25) T. Uchihashi, "Surface Superconductors on Silicon Revealed by Electron Transport Measurements and Scanning Tunneling Microscopy", NSC-NIMS workshop "New Opportunities of Advanced Metrology", Tsukuba, Japan, Feb.27-28, 2014. (invited)
- (26) T. Uchihashi, "Current-driven Rotation of Chiral Supramolecules on a Metal Surface", The Symposium on Surface and Nano Science 2014 (SSNS'14), Furano, Japan, Jan. 15-18, 2014.
- (27) T. Uchihashi, "Surface Superconducting Materials and Topological Nanoarchitectonics", Swiss-Japanese Nanoscience Workshop, Tsukuba, Japan, Nov. 26-28, 2013. (invited)
- (28) 内橋 隆 「表面超構造における超伝導の発見と今後の展望」, 第 4 回真空・表面科学若手研究会、筑波大学 (つくば市), 2013 年 11 月 29 日 ~ 30 日(invited)
- (29) 内橋 隆 「シリコン表面超構造の超伝導 - 表面科学と低温物性のクロスオーバー」, 2013 年真空・表面学術合同講演会、つくば国際会議場 (つくば市)

- 2013 年 11 月 26 日 ~ 28 日(invited)
- (30) 内橋 隆 「シリコン表面上金属原子層の超伝導」, 応用物理学会超伝導分科会第 47 回研究会, 国際超電導産業技術研究センター (東京都), 2013 年 7 月 5 日. (invited)
- (31) T. Uchihashi, "Superconducting Surface Materials and Molecular Control", NIMS Conference 2013, Tsukuba, Japan, Jul. 1-3, 2013. (invited)
- (32) T. Uchihashi, "Spin-driven Molecular Motors and Gears", International Symposium Single Molecular Machines and Motors, Toulouse, France, Jun. 19-20, 2013. (invited)
- (33) Kazuyuki Sakamoto, "Valley filter by peculiar Rashba spin", Collaborative Conference on 3D & Materials Research (CC3DMR) 2013, Jun.24~28, 2013 Jeju, Korea (invited)

〔図書〕(計 3 件)

- (1) Takashi Uchihashi and Teruo Ono, "The Einstein-de Haas Effect and its Application to Spin-Driven Molecular Motors", in *Single Molecular Machines and Motors* edited by G. Rapenne and C. Joachim, pp.95-107 (Springer, 2015).
- (2) 内橋隆, 中山知信, 青野正和 (分担執筆) 「超伝導現象と高温超伝導体」第 3 編第 2 章 3 節 467-474 頁「金属原子一層の超伝導特性」エヌ・ティー・エス (共著) (2013)
- (3) 内橋隆, 現代表面科学シリーズ 6 「問題と解説で学ぶ表面科学」第 4 章 表面実験・工学の周辺 4.3 最近の話題: p.175 「固体表面で超伝導は実現するか?」日本表面科学会 (2013)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内橋 隆 (UCHIHASHI, Takashi)
物質・材料研究機構国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・MANA 研究者
研究者番号: 90354331

(2) 研究分担者

坂本 一之 (SAKAMOTO, Kazuyuki)
千葉大学 融合科学研究科・教授
研究者番号: 70261542