

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601
 研究種目：基盤研究(A)
 研究期間：2010 ～ 2012
 課題番号：22246006
 研究課題名（和文） ミリケンビル・マイクロ4端子プローブ法の開発とモノレイヤー超伝導の探索
 研究課題名（英文） Development of Milli-Kelvin Micro-Four-Point Probe Method and Research of Monolayer Superconductors
 研究代表者 長谷川 修司 (HASEGAWA SHUJI)
 東京大学・大学院理学系研究科・教授
 研究者番号：00228446

研究成果の概要（和文）：今まで我々は10年以上にわたって、マイクロ4端子プローブ法という新しい実験手法を開発し、それらを用いて表面・モノレイヤー（単原子層）の伝導物性の研究を展開してきた。本研究では、さらにその装置性能を向上させ、ミリケルビンの超低温(0.4 K)および7 T までの強磁場中でのマイクロ4端子プローブ測定を可能とし、モノレイヤー（単原子層）超伝導の探索やモノレイヤー磁気輸送の研究に発展させる。

研究成果の概要（英文）：We have developed a novel experimental tool called ‘micro-four-point probe method’ for more than ten years, and applied it to studies on electrical conduction at crystal surfaces and monolayers. In this study, we have intended that the method is expended in the temperature range down to milli-Kelvin (0.4 K) and also with strong magnetic field (up to 7 T) so that we can explore the studies on monolayer superconductivity/surface-state superconductivity and the magneto-transport properties of surfaces/monolayers.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	30,400,000	9,120,000	39,520,000
2011年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2012年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
年度			
年度			
総計	38,200,000	11,460,000	49,660,000

研究分野：物性物理学・表面科学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・薄膜・表面界面物性

キーワード：超伝導、マイクロ4端子プローブ、モノレイヤー、表面状態超伝導、表面超構造

1. 研究開始当初の背景

結晶表面の最上層の原子配列（表面超構造）や電子状態（表面状態）は多くの場合結晶内部と異なり、表面科学の対象として多数の研究例がある。その研究のために様々な実験手法が開発されてきた。しかし、その最上原子層の電気伝導（表面状態伝導）の研究はほとんどなされて来なかった。表面直下のバルクでの電気伝導（表面空間電荷層の電気伝

導）としてしか研究されて来ず、表面最上層の表面状態に固有の伝導特性の研究は、我々の15年にわたる研究によって開拓されてきたといつてよい。現実の表面にはステップやドメイン境界など様々な欠陥があり、intrinsic なモノレイヤー伝導特性など測定できないと信じられてきたからである。しかし、我々は、端子間隔がミクロンからナノメートルの4端子プローブ法では、測定電流が表

面近傍を優先的に流れるために、表面の伝導度を感度良く測定できることを示し、表面状態伝導の検出に成功した。そのために、マイクロ4端子プローブをデンマーク工科大学と共同開発し、それを超高真空チャンバーに導入した。平成13年度に製作したマイクロ4端子プローブ装置では、室温から11 Kの温度範囲で電気伝導と RHEED(反射高速電子回折)の「その場」観測が可能であった。それによって、表面相転移に伴う電気伝導の変化、表面欠陥による表面キャリアの局在、1次元的な表面構造の電気伝導度の異方性、表面電子による近藤効果などを明らかにし、モノレイヤーでの電気伝導、つまり表面超構造の表面状態伝導を直接的に測定できることが可能となった。

2. 研究の目的

Si(111)表面上のモノレイヤーの In が吸着して形成される $\sqrt{7}\times\sqrt{3}$ 表面超構造で、走査トンネル分光法によって約 3 K 以下でエネルギーギャップが開き、超伝導が示唆された。しかし、エネルギーギャップだけでは超伝導を確定的に結論できず、電気抵抗ゼロの観測が必要である。それを実現するために本研究の提案となった。モノレイヤー超伝導が確認されれば、固体物理が教える「2次元系では超伝導などの相転移はありえない」という"常識"を覆すもので、大変重要な発見となる。シリコン結晶表面上のモノレイヤー鉛も約 2 K 以下で超伝導ギャップと思われるエネルギーギャップが開くことを発見されているので、それも本研究で確認したい。また、それらに限らず、シリコン結晶表面上のモノレイヤー金属層の超構造は300種類以上知られているので、それらを網羅的に 0.4 K まで冷却して電気抵抗を測る計画である。

3. 研究の方法

0.4 K までの超低温は 3He ガスのポンピングによって達成する。また、モノレイヤーを制御性良く作成するには超高真空環境が必要なので、超低温技術と超高真空技術を融合させる必要がある。㈱ユニソクは、すでに 0.4 K で動作する超低温型超高真空走査トンネル顕微鏡 (STM) 装置を製作・販売しているので、その融合技術を持っている。同社と共同開発した装置を図1に示す。基本的に、STMヘッドの代わりにマイクロ4端子プローブ・チップを取り付けた。マイクロ4端子プローブを試料表面へアプローチさせる方法もSTMに使われているトンネル電流によるフィードバック機構を利用した。試料近傍には超伝導マグネットが設置され、試料表面に垂直に 7 T までの磁場を印加できる。この装置の上部には試料作成のための超高真空チャンバーが備えつけられており、試料表面の清

浄化や物質のMBE蒸着およびRHEEDで構造を確認することができる。

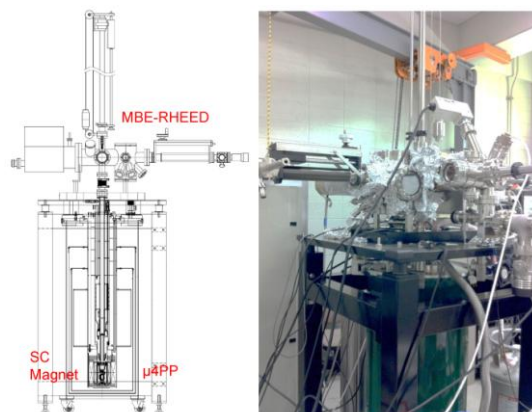


図1. 本研究で開発したミリケルビン・マイクロ4端子プローブ装置

4. 研究成果

本研究で開発したミリケルビン・マイクロ4端子プローブ装置の所期性能を達成し、さらにデータのばらつきを抑える「double configuration法」による測定コントローラも自作した結果、以下に述べる成果を得た。

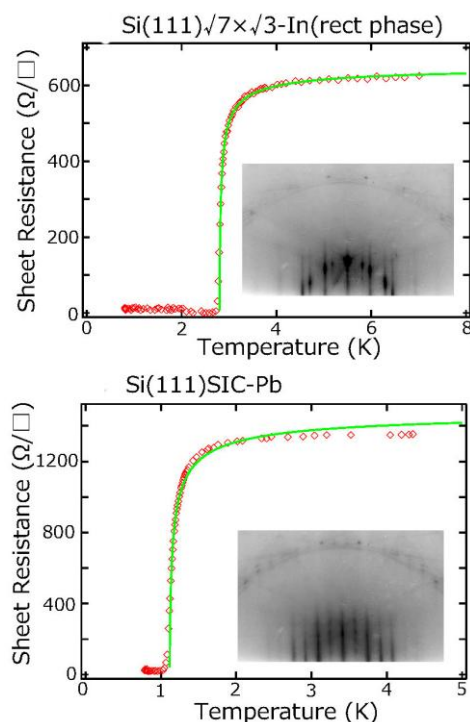


図2. 2種類の表面超構造の電気抵抗

(1) モノレイヤー・インジウム (Si(111)- $\sqrt{7}\times\sqrt{3}$ -In 表面超構造): 図2に示すように、臨界温度 2.77K で電気抵抗がゼロとなり、超伝導に転移した。この臨界温度は、走査トンネル分光実験によって超伝導ギャップが観測された約 3.5 K より低い。これは、ゼロ抵抗を生み出すグローバルなコヒーレント

超伝導状態になるには局所的な超伝導ギャップの形成温度より低温が必要であることを意味している。また、図3に示すように0.8 Kにおける de-pinning 臨界磁場は 0.33 T、上部臨界磁場は 0.43 T であり、そこから見積もられたコヒーレンス長 23 nm はバルクインジウムより 1 桁程度短いこともわかった。

(2) モノレイヤー鉛: Si(111)表面上のモノレイヤー鉛が作る表面超構造のうち、SIC(Striped Incommensurate)相と呼ばれる構造の電気抵抗を測定したところ、図2に湿しように 1.1 K で超伝導に転移することがわかった。これは走査トンネル分光法による超伝導エネルギーギャップの観測臨界温度 1.83 K より低いので、インジウムの場合と同様に、グローバルにコヒーレントな超伝導状態になるには、より低温が必要と言える。また、図3に示すように 0.8 K における de-pinning 臨界磁場は 0.03 T、上部臨界磁場は 0.11 T となり、インジウムに比べて 1 桁程度小さい。しかし、これらの値から見積もられたコヒーレンス長 33 nm はバルク鉛の値より 1 桁程度短い。

(3) モノレイヤーインジウムおよび鉛の超伝導コヒーレンス長はいずれも 20~30 nm で、バルクの値より 1 桁程度短い。これはキャリアの平均自由行程で決まっており、また、テラス幅よりはるかに短い。このことから、表面原子ステップは、超伝導電子の主な散乱体ではなく、テラス上の欠陥がコヒーレンス長を決めていると言える。また、2次元系特有

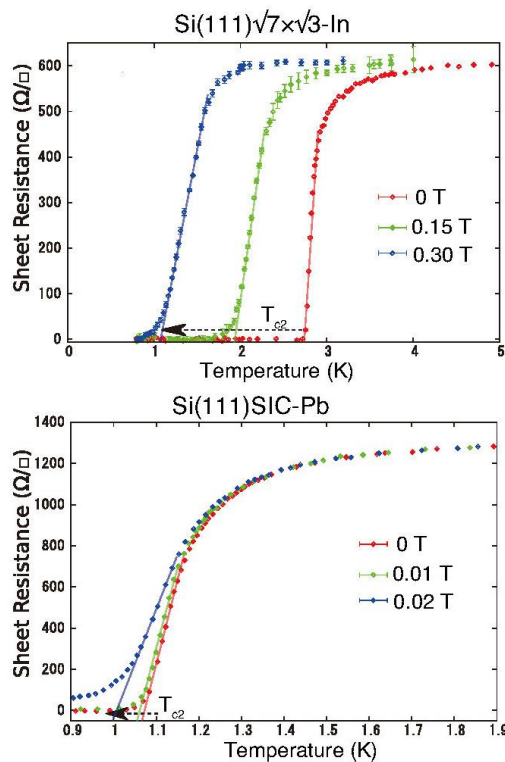


図3. 磁場印加中での電気抵抗の温度依存性

の大きなゆらぎのためにコヒーレンス長が短くなっているとも考えられるので、理論的な研究が必要であろう。

以上のように、本研究の目的であったモノレイヤー超伝導を検出し、それを特徴づける物理量を得ることができた。今後この装置を用いて、他の表面・モノレイヤ系の超伝導も探索する予定である。特に、表面超構造の超伝導は空間対称性の破れた系での超伝導として興味深い現象を示すことが理論的に予想されているので、その観点の研究も行う。

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 20 件)

① M. Yamada, T. Hirahara, and S. Hasegawa, Magnetotransport measurements of a superconducting surface state of In- and Pb-induced structures on Si(111), *Physical Review Letters*, **110**, 237001-1~5 (2013) (査読有).

② P. De Padova, P. Vogt, A. Resta, J. Avila, I. Rizado-Colambo, C. Quaresima, C. Ottaviani, B. Olivieri, T. Bruhn, T. Hirahara, T. Shirai, S. Hasagawa, M. C. Asensio, and G. Le Lay, Evidence of Dirac Fermions in Multilayer Silicene, *Applied Physics Letters* **102**, 163106-1~5 (2013) (査読有).

③ M. D'Angelo, R. Yukawa, K. Ozawa, S. Yamamoto, T. Hirahara, S. Hasegawa, M.G. Silly, F. Sirotti, and I. Matsuda, Hydrogen-induced surface metallization of SrTiO₃(001), *Physical Review Letters* **108**, 116802-1~5 (2012) (査読有).

④ T. Hirahara, N. Fukui, T. Shirasawa, M. Yamada, M. Aitani, H. Miyazaki, M. Matsunami, S. Kimura, T. Takahashi, S. Hasegawa, and K. Kobayashi, Atomic and Electronic Structure of Ultrathin Bi(111) Films Grown on Bi₂Te₃(111) Substrates: Evidence for a Strain-Induced Topological Phase Transition, *Physical Review Letters* **109**, 227401-1~5 (2012) (査読有).

⑤ N. Fukui, T. Hirahara, T. Shirasawa, T. Takahashi, K. Kobayashi, and S. Hasegawa, Surface Relaxation of Topological Insulators: Influence on the Electronic Structure, *Physical Review B* **85**, 115426-1~5 (2012) (査読有).

⑥ T. Uetake, T. Hirahara, Y. Ueda, N. Nagamura, R. Hobara, and S. Hasegawa, Anisotropic conductivity of the Si(111)4×1-In surface: Transport mechanism determined by the temperature dependence, *Physical Review B* **86**, 035325-1~5 (2012) (査読有).

⑦ Y. Fukaya, I. Matsuda, M. Hashimoto, K. Kubo, T. Hirahara, W. H. Choi, H. W. Yeom, S. Hasegawa, A. Kawasuso, and A. Ichimiya, Atomic structure of two-dimensional binary

surface alloy: Si(111)- $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ superstructure, Surface Science **606**, 919~923 (2012) (査読有).

⑧ Y. Fukaya, K. Kubo, T. Hirahara, S. Yamazaki, W. H. Choi, H. W. Yeom, A. Kawasuso, S. Hasegawa, and I. Matsuda, Atomic and Electronic Structures of Si(111)- $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ Superstructure, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **10**, 310~314 (2012) (査読有).

⑨ M. Yamada, T. Hirahara, S. Hasegawa, H. Mizuno, Y. Miyatake, and T. Nagamura, Surface Electrical Conductivity Measurement System with Micro-Four-Point Probes at Sub-Kelvin Temperature under High Magnetic Field in Ultrahigh Vacuum, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **10**, 400~405 (2012) (査読有).

⑩ S. Yamazaki, Y. Hosomura, I. Matsuda, R. Hobara, T. Eguchi, Y. Hasegawa, and S. Hasegawa, Metallic Transport in a Monatomic Layer of In on a Silicon Surface, Physical Review Letters **106**, 116802-1~5 (2011) (査読有).

⑪ T. Hirahara, G. Bihlmayer, Y. Sakamoto, M. Yamada, H. Miyazaki, S. Kimura, S. Blügel, and S. Hasegawa, Interfacing 2D and 3D topological insulators: Bi(111) bilayer on Bi₂Te₃, Physical Review Letters **107**, 166801-1~5 (2011) (査読有).

⑫ N. Miyata, R. Hobara, H. Narita, T. Hirahara, S. Hasegawa, and I. Matsuda, Development of a surface magneto-transport measurement system with multi-probes and the in situ measurement of Bi nanofilms prepared on Si(111)7×7, Japanese Journal of Applied Physics **50**, 036602 (2011) (査読有).

⑬ N. Miyata, H. Narita, M. Ogawa, A. Harasawa, R. Hobara, T. Hirahara, P. Moras, D. Topwal, C. Carbone, S. Hasegawa, and I. Matsuda, Enhanced spin relaxation in a quantum metal film by the Rashba-type surface, Physical Review B **83**, 195305-1~6 (2011) (査読有).

⑭ Y. Saisyu, T. Hirahara, R. Hobara, and S. Hasegawa, Magnetic anisotropy of Co ultrathin films, Journal of Applied Physics **110**, 053902-1~6 (2011) (査読有).

⑮ T. Hirahara, Y. Sakamoto, Y. Saisyu, H. Miyazaki, S. Kimura, T. Okuda, I. Matsuda, S. Murakami, and S. Hasegawa, A topological metal at the surface of an ultrathin Bi_{1-x}Sb_x alloy film, Physical Review B **81**, 165422-1~6 (2010) (査読有).

⑯ Y. Sakamoto, T. Hirahara, H. Miyazaki, S. Kimura, and S. Hasegawa, Spectroscopic evidence of a topological quantum phase transition in ultrathin Bi₂Se₃ films, Physical Review B **81**, 165432-1~5 (2010) (査読有).

⑰ H. Morikawa, K. S. Kim, H. W. Yeom, Y. Kitaoka, T. Hirahara, and S. Hasegawa, Conductance transition and interwire ordering of Pb nanowires on Si(557), Physical Review B **82**, 045423-1~5 (2010) (査読有).

⑱ Y. Niinuma, Y. Saisyu, T. Hirahara, R. Hobara, S. Hasegawa, H. Mizuno, and T. Nagamura, Development of an UHV-SMOKE system using permanent magnets, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **8**, 298~302 (2010) (査読有).

⑲ T. Hirahara, Y. Sakamoto, Y. Takeichi, H. Miyazaki, S. Kimura, I. Matsuda, A. Kakizaki, S. Hasegawa, Anomalous transport in an n-type topological insulator ultrathin Bi₂Se₃ film, Physical Review B **82**, 155309-1~5 (2010) (査読有).

⑳ I. Matsuda, K. Kubo, T. Hirahara, S. Yamazaki, W. H. Choi, H. W. Yeom, H. Narita, Y. Fukaya, M. Hashimoto, A. Kawasuso, S. Hasegawa, and K. Kobayashi, Electron compound nature in a surface atomic layer of two-dimensional hexagonal lattice, Physical Review B **82**, 165330-1~6 (2010) (査読有).

[学会発表] (計 43 件) (主たる発表)

① 長谷川修司, 物質最表面での新機能の発現, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会シンポジウム「機能性ナノ材料は持続可能社会をいかに支えるか」, 2013 年 3 月 27 日 (神奈川工科大学, 本厚木).

② 白井皓寅、平原徹、長谷川修司, シリセン吸着 Ag 超薄膜の量子井戸の研究, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 27 日 (広島大学, 東広島).

③ 相谷昌紀、平原徹、長谷川修司, ビスマス超薄膜の超高真空・低温・強磁場における電気伝導測定, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 26 日 (広島大学, 東広島).

④ S. Hasegawa, Topological and superconducting surface states, Workshop of DFG- and NOW- Research Units FOR 1700, FOR 1162 and FOM on Physics at the borderline between 1D and 2D, 2013 年 2 月 14 日 (Bad Honnef, Germany).

⑤ 長谷川修司, 非磁性物質表面でのスピン分裂とスピン輸送, 第 20 回大阪電気通信大学エレクトロニクス基礎研究所シンポジウム「スピントロニクス材料の新しい展開」, 2013 年 1 月 11 日 (大阪電通大駅前キャンパス).

⑥ T. Hirahara, Comprehensive study of topological phase transitions using ultrathin films, Energy Materials Nanotechnology (EMN) West Meeting, 2013 年 1 月 7 日 (Houston, USA).

⑦ 山田学、平原徹、保原麗、長谷川修司, 表

面状態超伝導の観測, 平成 24 年度東北大学通研プロジェクト研究会, 2012 年 12 月 14 日(茂庭荘, 宮城) .

⑧ 相谷昌紀, 平原徹, 長谷川修司, Bi 超薄膜の低温・磁場中での表面電気伝導測定, 第 32 回表面科学学術講演会, 2012 年 11 月 21 日(東北大学).

⑨ S. Hasegawa, Surface nanomaterials: Low dimensional, spin-split, and superconducting, The 2nd International School on Surface Science: Technologies and Measurements on Atomic Scale, 2012 年 10 月 6 日(Sochi, Russia).

⑩ M. Yamada, T. Hirahara, R. Hobara, S. Hasegawa, Surface-state superconductivity measured by a UHV sub-kelvin micro-four-point-probe system under high magnetic field, The 10th Japan-Russia Seminar on Semiconductor Surfaces (JRSSS10), 2012 年 9 月 26-28 日(東京大学, 本郷)

⑪ 福居直哉, 平原徹, 長谷川修司, 集束イオンビームによる in situ 微細加工を施した表面の電位伝導特性, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 18 日(横浜国立大学).

⑫ 長谷川修司, 多探針測定技術による半導体・ナノワイヤの電気計測とロードマップ, 学振ナノプローブテクノロジー 167 委員会第 67 回研究会, 2012 年 7 月 18 日(NIMS, 筑波).

⑬ T. Hirahara, Charge and Spin Transport at Nonmagnetic Surfaces, International Conference of Young Researchers on Advanced Materials (ICYRAM), 2012 年 7 月 3 日(Singapore).

⑭ 山田学, 平原徹, 保原麗, 長谷川修司, In, Pb モノレイヤー超伝導体の超伝導転移および臨界磁場測定, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 25 日(関西学院大学).

⑮ T. Hirahara, Ultrathin films of topological insulators, The first SRC Winter Workshop on Topological Matter, 2012 年 1 月 30 日(Phoenix Park, Korea).

⑯ M. Yamada, T. Hirahara, R. Hobara, S. Hasegawa, Monolayer superconductivity measured by a UHV sub-Kelvin micro-four-point-probe system under high magnetic field, Symposium on Surface and Nano Science (SSNS), 2012 年 1 月 10 日(雫石).

⑰ 平原徹: トポロジカル絶縁体超薄膜の電子状態と輸送特性, 第 31 回表面科学学術講演会, 2011 年 12 月 16 日(船堀, 東京).

⑱ 福居直哉, 保原麗, 東野剛之, 植竹智哉, 上田洋一, 永村直佳, 平原徹, 長村俊彦, 長谷川修司, FIB 複合型低温独立駆動 4 探針 STM の開発, 第 31 回日本表面科学会学術講演会, 2011 年 12 月 14 日(船堀, 東京).

⑲ S. Hasegawa, Electronic and spin transport at surfaces—Strong Electron-Phonon-/Spin-Orbit-Couplings Materials—, The 6th International Symposium on Surface Science (ISSS-6), 2011 年 12 月 14 日(船堀, 東京).

⑳ 山田学, 平原徹, 保原麗, 長谷川修司, モノレイヤー超伝導の検出—In/Si(111)—, 平成 23 年度通研共同プロジェクト研究「ナノスケールのゆらぎ・電子相関制御に基づく新規ナノデバイス」, 2011 年 10 月 21 日(仙台).

㉑ S. Hasegawa, Charge and spin transports at surfaces of strong electron-phonon-/spin-orbit coupling materials, AVS 58th International Symposium & Exhibition, 2011 年 10 月 31 日(Nashville, USA) .

㉒ T. Hirahara, Ultrathin films of topological insulators, The 15th International Conference on Thin Films, 2011 年 10 月 8 日(京都).

㉓ S. Hasegawa, Charge and spin transports at surfaces of strong electron-phonon-/spin-orbit coupling materials, The 11th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces, and Nanostructures (ACSIN-11), 2011 年 10 月 4 日(St. Petersburg, Russia) .

㉔ 山田学, 平原徹, 保原麗, 長谷川修司, 高磁場下サブケルビン・マイクロ 4 端子プローブ装置の開発, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 25 日(富山大学).

㉕ 平原徹, ラッシュバ・トポロジカル表面系の輸送特性, 日本物理学会 2011 年秋季大会シンポジウム「多彩な表面系における電子輸送現象」, 2011 年 9 月 24 日(富山大学).

㉖ 平原徹, G. Bihlmayer, 坂本裕介, 山田学, 宮崎秀俊, 木村真一, S. Bluegel, 長谷川修司, 三次元トポロジカル絶縁体上への二次元量子スピンホール相単一 Bi バイレイヤーの成長, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 24 日(富山大学).

㉗ 東野剛之, 平原徹, 長谷川修司, ビスマス超薄膜の表面状態における電流誘起スピン偏極の測定, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 24 日(富山大学).

㉘ 植竹智哉, 平原徹, 永村直佳, 上田洋一, 保原麗, 長谷川修司, Si(111)-4 × 1-In 表面の異方的表面電気伝導度の温度依存性, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 24 日(富山大学).

㉙ S. Hasegawa, Surface nanomaterials—Structures and properties—, Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials, 2011 年 8 月 22 日(Vladivostok, Russia) .

⑩ S. Hasegawa, Electronic and spin transport at surfaces and nanostructures, 2011 International Workshop on Nanomaterials & Nanodevices, 2011 年 7 月 3 日、Institute of Physics (北京, 中国) .

⑪ S. Hasegawa, Electronic and spin transport at surfaces and nanostructures measured by four-tip STM, International Workshop on Atomic Scale Interconnection Machines, 2011 年 6 月 28 日 (IMRE, Singapore) .

⑫ 坂本裕介、平原徹、宮崎秀俊、木村真一、長谷川修司, Bi₂Se₃ 超薄膜における量子トポロジカル相転移、平成 22 年度表面科学会放射光表面科学部会シンポジウム、2010 年 12 月 10 日 (東京工業大学) .

⑬ S. Hasegawa, T. Tono, Y. Sakamoto, and T. Hirahara, Spin transport at surfaces with strong spin-orbit coupling, RIEC International Symposium and The 9th Japan-Korea Symposium on Surface Nanostructures, 2010 年 11 月 16 日 (宮城).

⑭ T. Hirahara, Ultrathin films of topological insulators, JSPS A3 Foresight Program Autumn School for Young Scientist, 2010 年 11 月 10 日 (京都).

⑮ 平原徹, ビスマス量子薄膜における表面状態による電気伝導、第 30 回表面科学学術講演会奨励賞受賞記念講演、2010 年 11 月 5 日 (大阪大学) .

⑯ 東野剛之、平原徹、長谷川修司, ビスマス超薄膜におけるスピンホール効果の in situ 測定、日本物理学会 2010 秋季大会、2010 年 9 月 25 日 (大阪府立大学).

⑰ S. Hasegawa, Nano Transport with Four-Tip Scanning Tunneling Microscope, National Conference on Nano, Surface and Graphene Sciences and Technologies 2010, 2010 年 9 月 11 日 (南京大, 中国) .

⑱ S. Hasegawa, Electronic and Spin Transport at Surfaces and nanostructures, 18th International Vacuum Congress, 2010 年 8 月 24 日 (北京, 中国).

⑲ S. Hasegawa, Spin-Split Surface States due to Rashba Effect and Topological Insulators, Spin-Polarized Scanning Tunneling Microscopy 3 Conference, 2010 年 8 月 20 日 (ソウル国立大, 韓国).

⑳ S. Hasegawa, Surface States of Rashba Spin-Split Type and Topological Insulators, The Workshop 2010 on "Electronic, transport, and optical properties of low-dimensional systems" (WS10-ETO LDs), 2010 年 6 月 1 日 (Valencia, Spain).

㉑ T. Hirahara, Y. Sakamoto, Y. Saisyu, H. Miyazaki, S. Kimura, T. Okuda, I. Matsuda, S. Murakami, S. Hasegawa, A topological

metal at the surface of an ultrathin BiSb alloy film, International vacuum congress (IVC-18), 2010 年 7 月 25 日 (北京)

㉒ R. Hobara, N. Nagamura, T. Takeshi, U. Tomoya, U. Yoichi, T. Hirahara, S. Hasegawa, and T. Nagamura, Development of Ultra-Low Temperature Four tip STM in combination with FIB, SSSJ-A3 Foresight Joint Symposium on Nanomaterials and Nanostructures, 2010 年 7 月 5 日 (東京大).

㉓ T. Hirahara and S. Hasegawa, Surface states of Rashba-spin-split type and topological insulators, Korean Physical Society Meeting, 2010 年 4 月 21 日 (Daejeon, 韓国).

[図書] (計 3 件)

① S. Hasegawa, T. Hirahara, Y. Kitaoka, S. Yoshimoto, T. Tono, and T. Ohta, Nanometer-Scale Four-Point Probe Resistance Measurements of Individual Nanowires by Four-Tip STM, in Atomic Scale Interconnection Machines, ed. Christian Joachim, pp. 153~165 (Springer 2012).

② S. Hasegawa, Reflection High-Energy Electron Diffraction, in Characterization of Materials, ed. Elton N. Kaufmann, 1925~1938 (Wiley 2012).

③ 長谷川修司, 電子的・電気的特性 (第 3 章) in 表面物性の基礎 (現代表面科学シリーズ) 日本表面科学会編集 (共立 2012).

[その他]

ホームページ等

<http://www-surface.phys.s.u-tokyo.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 修司 (HASEGAWA SHUJI)
東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号：00228446

(2) 研究分担者

平原 徹 (HIRAHARA TORU)
東京大学・大学院理学系研究科・助教
研究者番号：30451818