

平成22年5月26日現在

研究種目：基盤研究 (A)  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19206006  
 研究課題名 (和文) 半導体結晶上の希薄磁性表面状態の形成とスピントロニクスへの応用  
 研究課題名 (英文) Diluted magnetic surface states on semiconductor crystals and its application to spintronics  
 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) :** (1) 表面状態の磁性特性を測定するために、簡便で高性能な超高真空極低温表面光磁気カー効果測定装置を開発し、それによって、コバルト原子層の磁気特性が、基板構造に敏感に依存して変化することを発見した。(2) 非磁性物質であるビスマスやその合金 (トポロジカル絶縁体と呼ばれる物質) の表面状態が、スピン分裂していることをスピン分解光電子分光法および第1原理理論計算によって明らかにした。(3) スピン軌道相互作用の大きいビスマス薄膜での (逆) スピンホール効果を4探針STM (走査トンネル顕微鏡) 装置による表面状態電気伝導測定によって直接的に検出した。

**研究成果の概要 (英文) :** (1) We have developed an ultra-high-vacuum surface-magneto-optical Kerr effect (UHV-SMOKE) system to investigate magnetic properties of surface states. The method has revealed that the magnetic property of Cobalt atomic layers sensitively depends on the substrate structures beneath them. (2) We have revealed, by using spin-resolved photoemission spectroscopy and the first-principle calculations, that the surface states of non-magnetic materials, Bismuth and its alloys (topological insulators), are spin-split. (3) We have directly detected (inverse) spin-Hall effect on Bismuth film surfaces that have large spin-orbit interaction, by measuring surface-state transport with a four-tip STM (scanning tunneling microscope) apparatus.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	22,900,000	6,870,000	29,770,000
2008年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
2009年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
年度			
年度			
総計	37,300,000	11,190,000	48,490,000

研究分野：表面物理学

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：表面磁気光学効果, 希薄磁性表面, 表面電気伝導, 表面物性, スピントロニクス, 近藤効果, RKKY相互作用, 低次元磁性

## 1. 研究開始当初の背景

半導体結晶表面上に1原子層程度の異種原子を吸着させて原子再配列を起こさせると、特異な、しかし周期的な原子配列を持つ「表面超構造」が形成されることが知られている。その構造に特有の「表面電子状態」は、下地結晶とは全く異なる特徴を持ち、表面1, 2原子層だけに局在した究極の低次元電子系を形成する。我々は、そのような表面電子状態およびその状態での電気伝導現象を研究するため、マイクロ4端子プローブ法という独創的な手法を開発し、3次元結晶には見られない表面特有の電気伝導現象を明らかにしてきている。その研究から本研究の着想に到った2つの重要な発見があった。

第1の発見は、シリコン結晶表面上に形成された表面超構造上に、極微量(1原子層の2, 3%)の異種原子をパラパラと吸着させると、その吸着原子がドナーとなり、表面電子バンドにキャリアをドーピングして表面状態伝導度を劇的に変化させると同時に、この吸着原子と表面状態電子が相互作用し、表面キャリアの状態を変えるという現象である。そこで、この吸着原子が磁性原子であったなら、その局在スピンと表面状態キャリアのスピンの相互作用し、RKKY相互作用や近藤効果などを通して、キャリア誘起希薄強磁性状態の発現が期待できる。これは、GaAs結晶中のMnなどの微量な磁性原子によって実現されている希薄磁性半導体の表面版とでもいえるべき現象である。しかも、厚さが1, 2原子層という究極的な2次元電子系である表面電子状態では、スクリーニング効果が弱いために、このキャリア誘起希薄強磁性状態が3次元結晶に比べてさらに強く発現すると期待できる。もう一つの重要な発見は、シリコン結晶表面上に形成されたビスマス薄膜について、その内部の電子状態は量子井戸状態となってスピン縮退しているが、その表面電子状態がRashba効果によってスピン分裂しているという事実である。つまり、表面電子状態を流れる電流によってスピン偏極伝導が起こると期待できる。これは、ビスマス薄膜に限らず、スピン軌道相互作用の大きい物質の表面状態で一般的に期待できる。

以上の2つの発見から、非磁性半導体であるシリコン結晶表面上に磁性を持つ2次元電子系を形成できると期待できる。しかも、従来の強磁性金属薄膜やシリサイド薄膜と異なり、吸着原子の量や吸着状態を制御することによって、その磁性状態をチューニングできると考えている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、非磁性半導体結晶表面上の1, 2原子層だけに形成されるさまざまな表面超構造や超薄膜を利用し、その構造に特

有な電子状態(表面電子状態)において希薄強磁性状態を発現させ、「表面スピントロニクス」なる新しい分野を開拓することにある。非磁性半導体の結晶内部ではなく、その表面電子状態のみを強磁性状態にするために、表面超構造・表面電子状態をデザイン・探索・作成し、さらにその磁性を計測する手法を確立する。特に、我々が長年かけて研究してきた表面電気伝導現象を利用し、表面での電子輸送と表面磁性状態との関係を明らかにし、さらにはその制御とスピントロニクスデバイスへの応用の可能性を探る。

## 3. 研究の方法

- (1) 極微量の磁性原子を特定の表面超構造上に吸着させ、その吸着原子と表面電子状態との相互作用によるキャリア誘起強磁性状態を実現する表面超構造や量子超薄膜を見出す。
- (2) その強磁性の発現を確認するため、超高真空極低温表面光磁気カー効果測定装置を製作する。
- (3) 上記の表面光磁気カー効果測定装置を用い、表面電子状態の磁化状態を測定するとともに、表面状態電流によるスピン・ホール効果を測定・確認する。
- (4) さらにキャリア誘起強磁性を確認するため、我々が平成18年度に作成した超高真空極低温磁場印加型マイクロ4端子プローブ法による表面電気伝導測定を行い、表面電子状態での異常ホール効果や近藤効果を発見・確認する。
- (5) さらに表面強磁性状態を確認・解析するため、シンクロトロン放射光を用いたX線磁気円二色性測定およびスピン分解角度分解光電子分光測定を行う。

## 4. 研究成果

- (1) 表面状態の磁性特性を測定するために、超高真空極低温表面光磁気カー効果測定装

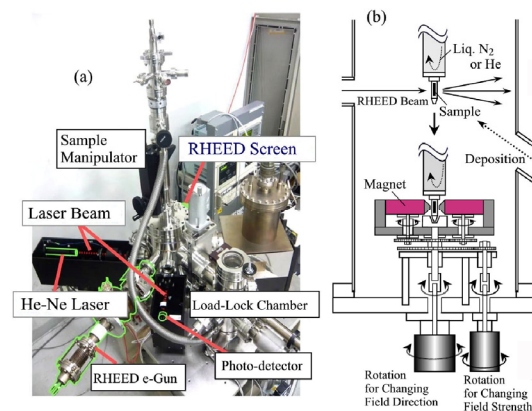


図1. 開発した超高真空極低温表面光磁気カー効果測定装置の外観写真(左)と構造の模式図(右)。永久磁石を用いて試料に磁場を印加する。

置を開発した(図1)。この装置では、偏光面の回転角の測定精度が  $100 \mu$  度、試料冷却温度 15 K、永久磁石を利用して 0.23 T までの磁場印加が可能という性能を持つ。これによって、異なる基板表面構造上でのコバルト原子層の磁気特性を測定した結果、基板構造に敏感に依存した特性が発見された(図2)。

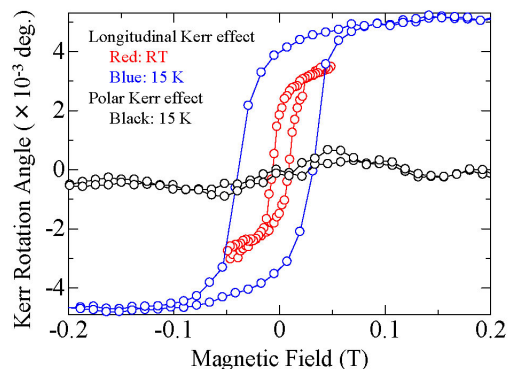


図2. Ag(111)表面上に成長させた2原子層Coの磁化特性。縦カー効果(青と赤線)は大きな信号が出ているが、極カー効果(黒線)では信号強度がない。磁化が平面内に寝ていることを意味している。

(2) 非磁性物質であるビスマスやその合金(トポロジカル絶縁体と呼ばれる物質  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{Sb}_{1-x}$ )の表面状態が、スピン分裂していることをスピン分解光電子分光法および第1原理理論計算によって明らかにした(図3)。

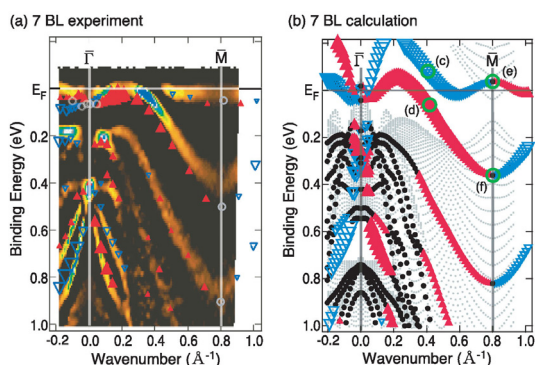


図3. Bi(111)表面状態のバンド分散(左が実験結果、右が計算結果)。赤がスピナップ、青がスピンドウンを示す。Gamma点に対して対称にスピンの向きが変わっていることがわかる。これが、ラッシュバ効果によるスピン分裂を意味している。

(3) スピン軌道相互作用の大きいビスマス薄膜での(逆)スピンホール効果を4探針STM装置による表面状態電気伝導測定によって直接的に検出することに成功した。この効果が無い場合には、4探針抵抗測定において、グリーンの相反定理が成り立つが、この効果のためにそれが破れることを利用した。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計35件)

- ① 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, 印刷中(査読有)。
- ② S. Hasegawa, Quasi-One Dimensional Metals on Semiconductor Surfaces with Defects, J. Phys.: Cond. Matter **22**, 084026-1~8 (2010)(査読有)。
- ③ 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  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  alloy film, Phys. Rev. B **81**, 165422-1~4 (2010)(査読有)。
- ④ Y. Sakamoto, T. Hirahara, H. Miyazaki, S. Kimura, and S. Hasegawa, Spectroscopic evidence of a topological quantum phase transition in ultrathin  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  films, Phys. Rev. B **81**, 165432-1~4 (2010)(査読有)。
- ⑤ S. Yamazaki, I. Matsuda, H. Okino, H. Morikawa, and S. Hasegawa, Localization and Hopping Conduction at Glass and Crystal Phases of Monatomic Au Layers on Silicon Surface, Phys. Rev. B **79**, 085317-1~5 (2009)(査読有)。
- ⑥ Y. Kitaoka, T. Tono, S. Yoshimoto, T. Hirahara, S. Hasegawa, and T. Ohba, Direct detection of grain boundary scattering in damascene Cu wires by nanometer-scale four-point probe resistance measurements, Appl. Phys. Lett. **95**, 052110-1~3 (2009)(査読有)。
- ⑦ 平原徹, 松田巖, 山崎詩郎, 長谷川修司, ビスマス量子薄膜における表面状態による電気伝導, 表面科学 **30**, 374~379 (2009)(査読有)。
- ⑧ K. He, T. Hirahara, T. Okuda, S. Hasegawa, A. Kakizaki, and I. Matsuda, Spin-polarization of quantum well states in Ag films induced by Rashba effect at surface, Physical Review Letters **101**, 107604-1~4 (2008)(査読有)。
- ⑨ T. Hirahara, T. Komorida, A. Sato, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, K. He, I. Matsuda, and S. Hasegawa, Manipulating quantum-well states by surface alloying: Pb on ultrathin Ag films, Physical Review B **78**, 035408-1~5 (2008)(査読有)。
- ⑩ C. Liu, I. Matsuda, S. Yoshimoto, T. Kanagawa, and S. Hasegawa, Electronic Transport of Au-Adsorbed  $\text{Si}(111)-\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag Surface: Metallic Conduction and Localization, Physical Review B **78**, 035326-1~6 (2008)(査読有)。

- ⑪ T. Hirahara, K. Miyamoto, A. Kimura, Y. Niinuma, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, T. Nagao, I. Matsuda, S. Qiao, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, and S. Hasegawa, Origin of the surface-state band-splitting in ultrathin Bi Films: From a Rashba effect to a parity effect, *New Journal of Physics* **10**, 083038-1~8 (2008) (査読有).
- ⑫ Y. Kakefuda, K. Narita, T. Komeda, S. Yoshimoto, and S. Hasegawa, Self-assembled Nanowire Arrays of Gold Nanoparticles, *Applied Physics Letters* **93**, 163103-1~3 (2008) (査読有).
- ⑬ 長谷川修司, 半導体結晶表面上の擬1次元金属, *真空* **51** (No. 7), 453~459 (2008) (査読有).
- ⑭ S. Yoshimoto, Y. Murata, K. Kubo, K. Tomita, K. Motoyoshi, T. Kimura, H. Okino, R. Hobara, I. Matsuda, S. Honda, M. Katayama, and S. Hasegawa, Four-Point Probe Resistance Measurements Using PtIr-Coated Carbon Nanotube Tips, *Nano Letters* **7**, 956~960 (2007) (査読有).
- ⑮ I. Matsuda, C. Liu, T. Hirahara, M. Ueno, T. Tanikawa, T. Kanagawa, R. Hobara, S. Yamazaki, S. Hasegawa, and K. Kobayashi, Electron-phonon interaction and localization of surface-state carriers in a metallic monolayer, *Physical Review Letters* **99**, 146805-1~4 (2007) (査読有).
- ⑯ Y. Nakayama, S. Yamazaki, H. Okino, T. Hirahara, I. Matsuda, S. Hasegawa, and M. Ichikawa, Electrical conduction of Ge nanodot arrays formed on an oxidized Si surface, *Applied Physics Letters* **91**, 123104-1~3 (2007) (査読有).
- ⑰ T. Hirahara, I. Matsuda, S. Yamazaki, N. Miyata, T. Nagao, and S. Hasegawa, Large surface-state conductivity in ultrathin Bi films, *Applied Physics Letters* **91**, 202106-1~3 (2007) (査読有).
- ⑱ H. Okino, I. Matsuda, S. Yamazaki, R. Hobara, and S. Hasegawa, Transport in Defective Quasi-One-Dimensional Arrays of Chains of Gold Atoms on a Vicinal Silicon Surfaces, *Physical Review B* **76**, 035424-1~5 (2007) (査読有).
- ⑲ T. Hirahara, K. Miyamoto, I. Matsuda, T. Kadono, A. Kimura, T. Nagao, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, S. Qiao, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, and S. Hasegawa, Direct Observation of Spin Splitting in Bismuth Surface States, *Physical Review B* **76**, 153305-1~5 (2007) (査読有).
- ⑳ R. Hobara, N. Nagamura, S. Hasegawa, I. Matsuda, Y. Yamamoto, K. Ishikawa, and T. Nagamura, Variable-Temperature Independently-Driven Four-Tip Scanning Tunneling Microscope, *Review of Scientific Instruments* **78**, 053705-1~4 (2007) (査読有).
- ㉑ S. Hasegawa, Surface One-Dimensional Structures, *Chinese Journal of Physics* **45**, 385~411 (2007) (査読有).
- [学会発表] (計 72 件)
- ① 最首祐樹, 平原徹, 保原麗, 長谷川修司, シリコン上コバルト薄膜の磁気光学 Kerr効果測定, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 22 日 (岡山大学).
- ② 平原徹, 坂本裕介, 最首祐樹, 宮崎秀俊, 木村真一, E. Krasovskii, E.V. Chulkov, 長谷川修司, BiSb合金超薄膜表面状態の光電子分光スペクトルの偏光依存性, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 21 日 (岡山大学).
- ③ 坂本裕介, 平原徹, 長谷川修司: シリコン表面上のトポロジカル絶縁体Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>超薄膜の電子構造, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 22 日 (岡山大学).
- ④ Y. Saisyu, T. Hirahara, Y. Niinuma, R. Hobara, S. Hasegawa: Development of UHV-SMOKE system and application to surface magnetization characterization, Symposium on Surface and Nano Science 2010 (SSNS' 10), 2010 年 1 月 16 日 (雫石).
- ⑤ 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, The 449. Wilhelm and Else Heraeus Seminar on "Rashba and related spin-orbit effects in metals", 2010 年 1 月 7 日 (Physikzentrum Bad Honnef, Germany)
- ⑥ S. Hasegawa, Nano-Measurements by Four-Tip STM}, The 7th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '09, 2009 年 12 月 11 日 (Maui, Hawaii, USA).
- ⑦ 最首祐樹, 平原徹, 新沼優人, 長谷川修司, 永久磁石を用いた超高真空中表面磁化測定装置の開発, 日本表面科学会 第 29 回表面科学学術講演会, 2009 年 10 月 28 日 (船堀, 東京).
- ⑧ T. Hirahara, Y. Kitaoka, T. Tono, S. Yoshimoto, T. Ohba, and S. Hasegawa, Direct detection of grain boundary scattering in damascene Cu wires by nanoscale four-point probe resistance measurements, IUPAC The 5th International Symposium on Novel Materials and Synthesis (NMS-V), 2009 年 10 月 20 日 (上海, 中国).
- ⑨ 平原徹, 坂本裕介, 奥田太一, 松田巖, 長



- 谷川修司, BiSb合金超薄膜の電子状態及び輸送特性, 日本物理学会 2009 秋季大会, 2009 年 9 月 27 日 (熊本大学).
- ⑩ 高瀬恵子, 芝崎剛豪, 平原徹, 長谷川修司, 希薄磁性表面での抵抗異常: 近藤効果と RKKY 相互作用の競合, 日本物理学会 2009 秋季大会, 2009 年 9 月 27 日 (熊本大学).
- ⑪ S. Hasegawa, Quantum Transport with a Four-Tip Scanning Tunneling Microscope, The 10th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces, and Nanostructures (ACSIN-10), 2009 年 9 月 23 日 (Granada, Spain).
- ⑫ T. Tono, Y. Kitaoka, S. Yoshimoto, T. Hirahara, T. Ohba, S. Hasegawa, Nanometer-scale four-point probe resistance measurements of nanowires using carbon nanotube tips, A3 Foresight Summer School and Workshop, 2009 年 8 月 31 日 (Yangpyeong, 韓国).
- ⑬ 平原徹, ビスマス超薄膜のスピン偏極表面電子状態、電気伝導特性に関する研究, 日本物理学会第 64 回年次大会 第 3 回領域 9 若手奨励賞受賞記念講演、立教大学 2009 年 3 月 28 日.
- ⑭ 長谷川修司, 多探針 STM と ナノエレクトロニクス, 第 49 回真空に関する連合講演会, 2008 年 10 月 29 日 (松江).
- ⑮ 新沼優人, 平原徹, 長谷川修司, SMOKE 装置の開発と Gd/In/Si(111) 金属表面の磁性研究, 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 30 日 (立教大学).
- ⑯ T. Hirahara, The Rashba and quantum size effects in ultrathin Bi films, Deutsche Physical Gesellschaft Spring Meeting, 2009 年 3 月 27 日 (Dresden, Germany).
- ⑰ S. Hasegawa, Electronic Transport on Surfaces and Nanowires Measured by Microscopic Four-Point Probes, Joint Symposium by Nanyang Technological University and University of Tokyo, 2009 年 2 月 20 日 (Nanyang Tech. Univ., Singapore).
- ⑱ S. Hasegawa, Kondo effect in transport on Co/Si(111)  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In surface, Korean Vacuum Society (The 6th Korea-Japan Symposium on Surface Nanostructures), 2009 年 2 月 11 日 (Hyundai Seongwoo Resort, Korea).
- ⑲ Y. Niinuma, T. Hirahara, and S. Hasegawa, Gd adsorption on a nearly-free-electron surface superstructure; Structure and magnetic properties, The 16th International colloquium on Scanning Probe Microscopy, 2008 年 12 月 10 日 (熱川).
- ⑳ K. Takase, T. Shibusaki, T. Hirahara, S. Hasegawa, Detection of Kondo effect in Co/Si(111)  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In Surface by surface-sensitive conductivity measurements, International Symposium on Surface Science and Nanotechnology (ISSS-5), 2008 年 11 月 12 日、早稲田大学.
- ㉑ Y. Kitaoka, S. Yoshimoto, T. Hirahara, S. Hasegawa, and T. Ohba, Nanometer-scale Four-Point Probe Resistance Measurements of Cu Wires Using Carbon Nanotube Tips, H Advanced Metallization Conference 2008: 18th Asian Session, 2008 年 10 月 9 日 (東京大学、本郷).
- ㉒ 平原徹, 新沼優人, 長谷川修司: 超高真空低温型表面磁気光学カー効果測定装置の開発, 日本物理学会 2008 秋季大会, 2008 年 9 月 22 日 (岩手大学).
- ㉓ 高瀬恵子, 平原徹, 長谷川修司: 磁性体吸着した金属表面 Si(111)- $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In の電気伝導, 日本物理学会 2008 秋季大会, 2008 年 9 月 22 日 (岩手大学).
- ㉔ S. Hasegawa, Carrier Localization and Transport at Metallic Atomic Wires and Monolayers on Silicon Surfaces, The 14th International Conference on Solid Films and Surfaces, 2008 年 7 月 1 日 (Trinity College, Dublin, Ireland).
- ㉕ S. Hasegawa, The Art and Science of Multi-tip Nanoprobes, Brookhaven National Laboratory Workshop "Electrical Nanoprobes" (2008 NSLS/CFN User's Meeting), 2008 年 5 月 19 日 (Brookhaven National Laboratory, USA).
- ㉖ 平原徹, Bi 超薄膜における Rashba 効果と量子サイズ効果, 日本物理学会第 63 回年次大会領域 9 領域 3 合同シンポジウム「反対称性の破れた表面におけるスピンと軌道」, 2008 年 3 月 24 日 (近畿大学).
- ㉗ 新沼優人, 平原徹, 長谷川修司, In/Si(111) 金属表面超構造への Gd 吸着, 日本物理学会第 63 回年次大会, 2008 年 3 月 24 日 (近畿大学).
- ㉘ S. Hasegawa, Transport at Atomic Wires on Silicon Surfaces, German Physical Society Spring Meeting, 2008 年 2 月 26 日 (Tech. Univ. Berlin, Germany).
- ㉙ S. Hasegawa, Making non-magnetic surfaces ferromagnetic, Korean Vacuum Society, 2008 年 2 月 15 日 (Dankook University, Korea).
- ㉚ S. Hasegawa, Four-tip scanning tunneling microscope for measuring transport in nanostructures, SPIE Conference on Device and Process Technologies for Microelectronics, MEMS, Photonics, and Nanotechnology IV, (Conference 6800), 2007 年 12 月 6 日 (Canberra, ACT Australia).
- ㉛ T. Hirahara, K. Miyamoto, I. Matsuda, T. Kadono, A. Kimura, T. Nagao, G. Bihlmayer,

- E. V. Chulkov, S. Qiao, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, S. Hasegawa, Direct observation of spin splitting in surface states of non-magnetic Bi, The 9th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-9), 2007年11月15日(東京大).
- ③② K. Takase, I. Matsuda, T. Hirahara, and S. Hasegawa, STM observation and photoemission spectroscopy of Mn adsorbed Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface, The 9th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-9), 2007年11月13日(東京大).
- ③③ K. He, T. Hirahara, I. Matsuda, and S. Hasegawa, Spin-splitting States of Bi-Ag Ordered Surface Alloy on Ag Quantum Well Films, The 9th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-9), 2007年11月13日(東京大).
- ③④ Y. Niinuma, T. Hirahara, S. Hasegawa, Gd adsorption on In-induced metallic surface superstructures on Si(111), The 9th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-9), 2007年11月12日(東京大).
- ③⑤ S. Hasegawa, Four-Tip Scanning Tunneling Microscope for Measuring Transport in Nanostructures, The 54th International AVS Symposium, 2007年10月16日(Seattle, USA).
- ③⑥ 高瀬恵子, 中山泰生, 奥田太一, 原沢あゆみ, 松田巖, 平原徹, 長谷川修司: Mn吸着したSi(111)  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag表面のSTMおよび光電子分光測定 II, 日本物理学会第62回年次大会, 2007年9月22日(北海道大).
- ③⑦ Ke He, 平原徹, 松田巖, 長谷川修司, Spin-splitting state of Bi/Ag ordered surface alloy on Ag quantum-well films, 日本物理学会第62回年次大会, 2007年9月22日(北海道大学).
- ③⑧ 山崎詩郎, 松田巖, 沖野泰之, 守川春雲, 長谷川修司, 低温における金蒸着シリコン表面の電気伝導度の比較, 日本物理学会第62回年次大会, 2007年9月22日(北海道大学).
- ③⑨ T. Hirahara, K. Miyamoto, I. Matsuda, T. Kadono, A. Kimura, T. Nagao, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, S. Qiao, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, S. Hasegawa, Direct observation of spin splitting in surface states of non-magnetic Bi, JSPS-NSFC-KOSEF A3 Foresight Program on Sub-10nm Wires; New Physics and Chemistry, 2007年7月22日(北京).
- ④⑩ S. Hasegawa, Electronic Transport at Monolayers and Atomic Chains on Silicon Surfaces, The 17th International Vacuum Congress (IVC-17), 13th International Conference on Surface Science (ICSS-13), International Conference on Nanoscience and Technology 2007 (ICN+T 2007), 6th Nordic Conference on Surface Science (NCSS-6), 22nd Nordic Semiconductor Meeting (NSM-22) and 4th Swedish Vacuum and Materials Science Meeting (SVM-4), 2007年7月4日(Stockholm, Sweden).
- [図書] (計3件)
- ① 長谷川修司, 振動・波動(講談社基礎物理学シリーズ2)(講談社サイエンティフィック, 2009).
- ② 長谷川修司, 見えないものをみる—ナノワールドと量子力学—, (UTフィジックス・シリーズ), (東京大学出版会, 2008).
- ③ 長谷川修司, マルチプローブ計測(第13章), 「走査プローブ顕微鏡—正しい実験とデータ解析のために必要なこと—」(重川秀実・吉村雅満・河津章編) 実験物理学シリーズ(第6巻), (共立出版, 2008).
- [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