

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23686007

研究課題名(和文) スピン偏極走査ポテンシオメトリ装置の開発と微細加工した表面ラシュバ系のスピン伝導

研究課題名(英文) Development of a spin-polarized scanning tunneling potentiometry system and its application to micro fabricated surface Rashba systems

研究代表者

平原 徹(Hirahara, Toru)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：30451818

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 21,300,000円、(間接経費) 6,390,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は微小領域の電位分布測定が可能な走査トンネルポテンシオメトリ(STP)測定を行い、表面ラシュバ系の電荷・スピン伝導を検出することであった。そのために超高真空、低温、強磁場下で動作する走査トンネル顕微鏡(STM)を建設した。そしてSTP測定用の回路をこのSTM装置に組み込み、電流印加時の表面形状測定と局所電位測定が同時に行えることを実証した。具体的にはSi(111)表面上に作成できるBi(111)超薄膜に対してSTP測定を行い、電位勾配をきちんと測定できた。また表面を微細加工して非局所伝導を測定することでBi₂Se₃薄膜のスピンホール効果を測定することができた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of the present project is to perform scanning tunneling potentiometry (STP) measurements on surface Rashba systems and explore the intriguing nature of its charge/spin transport phenomena. Therefore we have newly constructed a scanning tunneling microscope (STM) and furthermore, made our own measurement system for STP measurements. We have shown that it is possible to simultaneously map the surface topography with STM while mapping the potential distribution with STP when applying electrical current through the surface. Using ultrathin Bi films formed on Si(111) substrates, we have shown that the potential gradient can be measured properly. We have additionally found a way to micro fabricate surface states in situ and measure the spin Hall effect using nonlocal transport measurements using ultrathin Bi₂Se₃ films.

研究分野：工学

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 スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

スピントロニクス的发展とともに、磁場を用いないスピン制御法が研究されている。その中で、非磁性物質でもスピン軌道相互作用と反転対称性の破れによって起こる Rashba 効果を利用することでスピンが制御可能であることが分かった。現在ではこの効果を利用して電流を流すとそれに垂直な方向に互いに逆向きのスピンの蓄積するスピンホール効果(ホール効果のスピン版)に代表されるスピン伝導の実験が半導体ヘテロ界面やバルク系で行われている。

一方結晶表面には表面 1,2 原子層に局在した究極に薄い低次元電子系である表面状態が存在する。この表面状態も反転対称性が破れており、Rashba 効果でスピン分裂したバンド構造を持つ。これらは結晶構造や構成重元素の影響で半導体界面系に比べ分裂幅が巨大で、またスピンの向きも面内・面直など様々である。申請者はこれまでこのような系に着目し、特にシリコン表面上のピスマス(Bi)超薄膜のスピン分裂した表面電子状態に関してスピン分解光電子分光で研究を行ってきた。

しかし表面 Rashba 系においてスピン分解光電子分光では多くの報告例があるが、実際にスピン伝導現象を測定した例はなかった。それはナノスケールでスピン伝導を測定する技術開発が進んでいなかったからである。申請者はこれまで所属グループが開発してきたナノスケール電気伝導測定技術を用いてこれに取り組んできた。そして一定の成果を出せたが、本質的に新しい測定技術が必要だと結論に至った。

2. 研究の目的

そこで本研究では、(1)スピン偏極走査トンネルポテンシオメトリという新しいナノスケール電気伝導測定技術を開発し、表面ラッシュバ系におけるスピンホール効果や電流誘起スピン偏極などのスピン伝導を精度よく計測する新しい方法を確率すること、さらに(2)表面系を大気に取り出すことなく微細加工して、非局所伝導を用いてスピン伝導由来の信号を得る、という2つを目標にした。

3. 研究の方法

(1)のために超高真空($\sim 10^{-10}$ torr)、低温(2K)、高磁場(8T)下で動作する走査トンネル顕微鏡(STM)装置を建設した(図1)。そして探針部分に通常の STM 探針以外に2つの電流導入プローブを付加し、電流を流しながら STM 測定ができるように改造した(図2)。さらに走査トンネルポテンシオメトリ(STP)用の測定回路を自作し、表面の形状を STM で測定しながら、同時に電流印加下でのナノスケールポテンシャルマッピングができるようにした。

(2)に関しては、収束イオンビーム複合型独立駆動型4探針 STM 装置(FIB-4tip STM)を

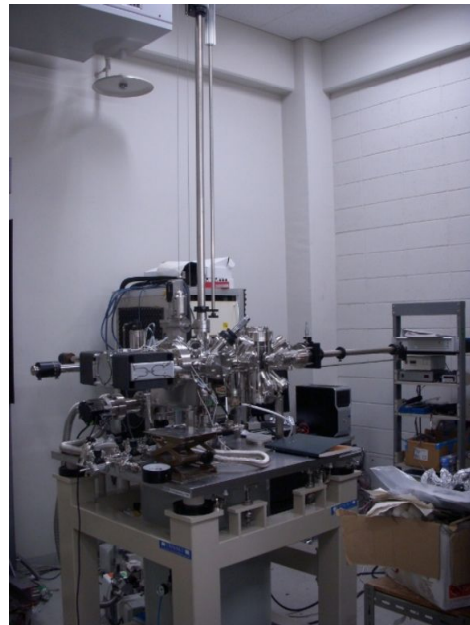


図1 建設した超高真空、強磁場印可能な低温走査トンネルポテンシオメトリ測定装置。



図2 開発した電流導入プローブ付きの STM 探針ホルダー。

用いて、 Bi_2Se_3 薄膜を作成後、Se キャップによって表面を保護した状態で FIB によって試料形状をホールバーへ微細加工した後、Se キャップを飛ばして清浄表面を回復し、4 探針 STM で非局所電気伝導測定を行った。ホールバー細線の太さ依存性とプローブ間隔依存性を精度良く測定することでスピン伝導由来のシグナルの検出を目指した。

4. 研究成果

図1で建設した STM/STP 装置を用いてシリコン表面上のピスマス(Bi)薄膜に関して STM/STP 同時測定を行った。図3(a)は電流プローブに+1V 印加して電流を流しながら得られた STM 像と STP 像である。間に水色の線の部分のラインプロファイルを示しているが、直線的な電位勾配が見られている。図3(b)は符号反転して電流プローブに-1V 印加した状態で得られた像であるが、STM のトポグラフィ像は変化しないが、STP の電位勾配は反転している。よって作成した STP 測定用回路でナノスケール電気伝導測定が行えることが確認できた。

上記装置開発とは別にスピン感性を持つ磁性探針開発を行った。しかし相次ぐ装置トラブルにより磁性探針を用いた STM/STP 測定には至らなかった。今後これにより、表面ラッシュバ系に期待されるスピンホール効

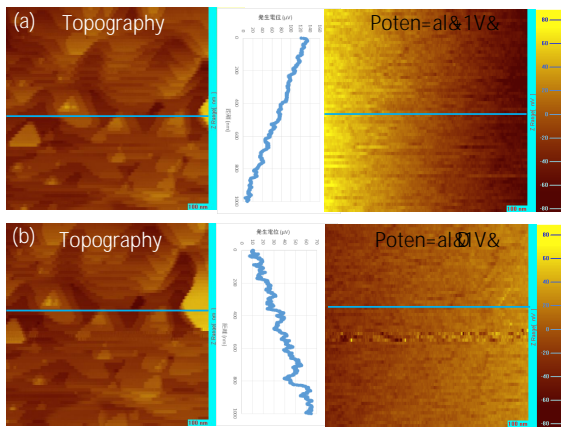


図3 (a)電流導入プローブの両端に+1Vを印加した状態で測定されたSTM像(左)とSTP像(右)。間に電位勾配のラインプロファイルを示している。(b)(a)と同じだが、プローブ両端に-1V印加した状態で測定されたもの。試料はSi(111)表面上のBi(111)超薄膜である。

果・電流誘起スピン偏極を測定していく予定である。

上記実験とは別にFIB-4tip STMで試料表面を微細加工して、非局所電気伝導測定を用いてスピンホール効果の検出を試みた。図4(a)に本実験の模式図を示す。電流をホールバーの左側に流すとスピンホール効果によって垂直方向にスピン流が流れる。するとそのスピン流が逆スピンホール効果によって

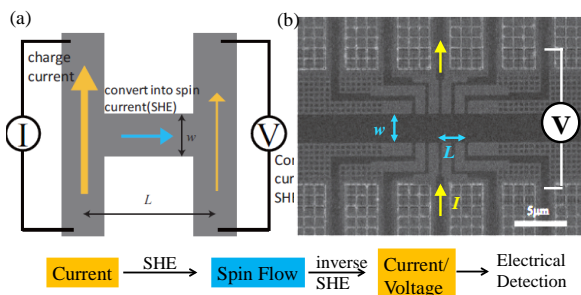


図4 (a)本実験で目指すスピンホール効果測定の模式図。電流をホールバーの左側に流すとスピンホール効果によって垂直方向にスピン流が流れる。するとそのスピン流が逆スピンホール効果によって電流(電圧)に変換される。よってIV非局所測定でスピンホール効果が測定できる。(b)実際に微細加工された試料のSEM像。測定に用いた試料はSi(111)表面上のBi₂Se₃(111)超薄膜である。

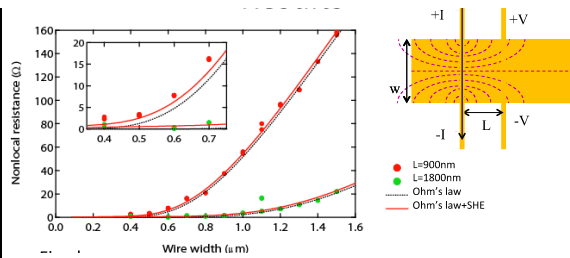


図5 ワイヤー幅を変えた場合に測定された非局所伝導。プローブ間隔が900nmの場合には、拡大図にあるように細線幅が細いとき、スピンホール効果を入れたフィッティングが必要であった。右側はオームの法則による拡散伝導の模式図を示している。

電流(電圧)に変換される。よってIV非局所伝導測定でスピンホール効果が測定できる。図4(b)に実際に微細加工されたBi₂Se₃超薄膜のホールバー構造を示す。プローブを接触させるためのパッドもついている。この図で細線の幅(w)とプローブ間隔(L)を変えて非局所抵抗を測定し、スピンホール効果の寄与を見積もった。その結果が図5に示してある。残念ながらスピンホール効果よりも、有限の細線幅による通常の拡散的伝導の寄与が大きいが、拡大図にあるように細線幅が細いときはスピンホール効果の寄与を入れないとデータをうまくフィッティングできないことが分かった。よってスピンホール効果を測定できており、スピンホール角(0.13)とスピン拡散長(1.14 μm)を見積もることができた。これは室温で行ったものだが、液体窒素や液体ヘリウム冷却によってこれらのパラメータがどう変化するか今後調べるつもりである。

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10件)

1. T. Tono, T. Hirahara, and S. Hasegawa, "In situ transport measurements on ultrathin Bi(111) films using a magnetic tip: Possible detection of current-induced spin polarization in the surface states", *New Journal of Physics* **15**, 105018 (2013) 査読有.
DOI: 10.1088/1367-2630/15/10/105018
2. M. Aitani, Y. Sakamoto, T. Hirahara, M. Yamada, H. Miyazaki, M. Matsunami, S. Kimura, and S. Hasegawa, "Fermi level tuning of topological insulator thin films", *Jpn. Jour. Appl. Phys.* **52**, 110112 (2013) 査読有.
DOI: 10.7567/JJAP.52.110112
3. M. Yamada, T. Hirahara, and S. Hasegawa,

- “Magnetoresistance measurements of a superconducting surface state of In-induced and Pb-induced structures on Si(111)”, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 237001 (2013) 査読有.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.237001
4. P. De Padova, P. Vogt, A. Resta, J. Avila, I. Razado-Colambo, C. Quaresima, C. Ottaviani, B. Olivieri, T. Bruhn, T. Hirahara, T. Shirai, S. Hasegawa, M. C. Asensio, and G. Le Lay, “Evidence of Dirac fermions in multilayer silicene”, *Appl. Phys. Lett.* **102**, 163106 (2013) 査読有.
DOI: 10.1063/1.4802782
 5. T. Shirasawa, J. Tsunoda, T. Hirahara, and T. Takahashi, “Structure of Bi/Bi₂Te₃ heteroepitaxial film studied by x-ray crystal truncation rod scattering”, *Phys. Rev. B* **87**, 075449 (2013) 査読有.
DOI: 10.1103/PhysRevB.87.075449
 6. 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”, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 227401 (2012) 査読有.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.227401
 7. N. Fukui, T. Hirahara, T. Shirasawa, T. Takahashi, K. Kobayashi, and S. Hasegawa, “Surface Relaxation of Topological Insulators: Influence on the Electronic Structure”, *Phys. Rev. B* **85**, 115426 (2012) 査読有.
DOI: 10.1103/PhysRevB.85.115426
 8. 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”, *Phys. Rev. B* **86**, 035325 (2011) 査読有.
DOI: 10.1103/PhysRevB.86.035325
 9. 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”, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 166801 (2011) 査読有.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.166801
 10. Y. Saisyu, T. Hirahara, R. Hobara, and S. Hasegawa, “Magnetic anisotropy of Co ultrathin films”, *Journal of Applied Physics* **110**, 053902 (2011) 査

読有.

〔学会発表〕(計 43 件)

1. 平原徹:「ビスマスはトポロジカル物質か?」, 科研費基盤研究 A「固体中のディラック電子」第 3 回研究会、2013 年 12 月 27 日、(赤穂温泉) 招待講演.
2. 平原徹:「シリセンに関する実験の現状」, 日本物理学会 2013 年度秋季大会、2013 年 09 月 27 日、(徳島大学) 招待講演.
3. 中村友謙, 保原麗, 長谷川修司, 平原徹: 「低温強磁場下で動作する走査トンネルポテンシオメトリ装置の開発」, 日本物理学会 2013 年秋季大会、日本物理学会 第 69 回年次大会、2014 年 3 月 28 日(東海大学).
4. 白井皓寅, 白澤徹郎, 平原徹, 高橋敏男, 長谷川修司:「多層シリセンの構造解析」, 日本物理学会 2013 年秋季大会、日本物理学会 第 69 回年次大会、2014 年 3 月 28 日(東海大学).
5. 一ノ倉聖, 平原徹, 鈴木拓, 長谷川修司: 「スピン偏極イオン散乱分光法を用いた Bi 超薄膜における電流誘起スピン偏極の検証」, 日本物理学会 2013 年秋季大会、日本物理学会 第 69 回年次大会、2014 年 3 月 28 日(東海大学).
6. 福居直哉, 平原徹, 長谷川修司: 「in situ FIB 加工微細構造を用いた Bi₂Se₃ のスピンホール効果測定」, 日本物理学会 2013 年秋季大会、日本物理学会 第 69 回年次大会、2014 年 3 月 30 日(東海大学).
7. 山田学, 平原徹, 保原麗, 長谷川修司: 「Si 結晶表面上の In および Pb モノレイヤー超伝導」, 第 5 回東京大学低温センター研究交流会、2014 年 2 月 24 日(東京大学).
8. 平原徹, 松波雅治, 羽尻哲也, 木村真一, 長谷川修司, 小林功佳: 「ビスマス超薄膜における半金属半導体転移の検証」, 日本物理学会 2013 年秋季大会、2013 年 09 月 25 日、(徳島大学).
9. 申東潤, 平原徹, 長谷川修司: 「Si(111) 上の希薄磁性表面の電気伝導」, 日本物理学会 2013 年秋季大会、日本物理学会 2013 年秋季大会、2013 年 09 月 26 日(徳島大学).
10. 福居直哉, 平原徹, 長谷川修司: 「Bi₂Se₃ 超薄膜でのスピンホール効果検出の試み」, 日本物理学会 2013 年秋季大会、2013 年 09 月 26 日(徳島大学).
11. T. Hirahara, “Ultrathin materials”, 8th Japanese-French Frontiers of Sciences Symposium (JFFoS), 2014 年 1 月 25 日(Metz, France).
12. T. Hirahara, “Ultrathin films of topological insulators”, IMS workshop on Advanced Spectroscopy of Correlated Materials (ASCM 13), 2013 年 8 月 2 日(Okazaki, Aichi, Japan)、

- 招待講演.
13. N. Fukui, T. Hirahara, and S. Hasegawa, "The modification of ultra thin films and in situ electrical conduction measurements using a four-tip STM combined with FIB", 2013 年 9 月 13 日 (Paris, France).
 14. T. Hirahara, "Topological quantum phase transitions in ultrathin films", The 14th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-14), 2013 年 7 月 4 日 (Gyeongju, Korea) 招待講演.
 15. D. Y. Shin, T. Hirahara, and S. Hasegawa, "Electrical Conductivity of a Dilute Magnetic Surface Superstructure on Si(111)", The 14th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-14), 2013 年 7 月 2 日 (Gyeongju, Korea)
 16. N. Fukui, T. Hirahara, and S. Hasegawa, "In situ FIB Etching and Conduction Measurement of Microstructures on a Topological Insulator Thin Film", The 14th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-14), 2013 年 7 月 5 日 (Gyeongju, Korea)
 17. M. Yamada, T. Hirahara, R. Hobara, and S. Hasegawa, "Surface-State Superconductivity", The 14th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-14), 2013 年 7 月 4 日 (Gyeongju, Korea)
 18. 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・強磁場中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).
 19. 平原徹, 「放射光で拓く表面物質科学の新展開」、所長招聘研究会「2020 年の光分子科学を語る」、2013 年 1 月 23 日 (分子科学研究所)、招待講演.
 20. 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), 招待講演.
 21. 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).
 22. 福居直哉、平原徹、長谷川修司: 集束イオンビームによるその場表面微細加工と電気伝導測定, 第 32 回表面科学学術講演会, 2012 年 11 月 20 日 (東北大学).
 23. 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).
 24. 平原徹, 「ビスマスおよびビスマス系化合物超薄膜の実験的研究」、科研費基盤研究 A 「固体中のディラック電子」第 1 回研究会, 2012 年 7 月 25 日 (東京大本郷)、招待講演.
 25. 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, Singapore), 招待講演.
 26. 平原徹, 「非磁性体超薄膜のスピン偏極表面電子状態」、UVSORIII における低エネルギー光電子分光の新展開, 2012 年 6 月 21 日 (分子科学研究所)、招待講演.
 27. 平原徹、福居直哉、白澤徹郎、山田学、相谷昌紀、宮崎秀俊、松波雅治、木村真一、高橋敏男、小林功佳、長谷川修司: 「Bi₂Te₃ 上の Bi 超薄膜の電子状態と表面構造解析」日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 24-27 日 (関西学院大学).
 28. 相谷昌紀, 平原徹, 坂本裕介, 山田学, 宮崎秀俊, 松波雅治, 木村真一, 長谷川修司: 「Pb ドープによるトポロジカル絶縁体 Bi₂Te₃ 超薄膜の電子状態制御と電気伝導度」日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 24-27 日 (関西学院大学).
 29. 福居直哉, 平原徹, 白澤徹郎, 高橋敏男, 小林功佳, 長谷川修司: 「Bi₂Te₃ 超薄膜および 1 BL Bi の LEED-IV 構造解析」日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 24-27 日 (関西学院大学).
 30. T. Hirahara, G. Bihlmayer, Y. Sakamoto, M. Yamada, H. Miyazaki, S. Kimura, S. Bluegel, and S. Hasegawa: Interfacing 2D and 3D topological insulators: Bi(111) bilayer on Bi₂Te₃, APS March meeting, 2012 年 2 月 28 日 (Boston, USA).
 31. 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, 東京大学物性研究所短期研究会「トポロジカル絶縁体の表面電子状態」、2012 年 2 月 24 日 (東大物性研).
 32. T. Hirahara, "Ultrathin films of topological insulators", The first SRC Winter Workshop on Topological Matter, 2012 年 1 月 30 日 (Phoenix Park, Korea)、招待講演.
 33. T. Hirahara: Ultrathin films of topological insulators, Symposium on

- Surface and Nano Science (SSNS) 2012, 2012 年 1 月 11 日 (Shizukuishi, Japan).
34. 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)、招待講演.
 35. T. Tono, T. Hirahara, and S. Hasegawa: "In situ measurements of current induced spin polarization in ultrathin bismuth films" The 6th International Symposium on Surface Science (ISSS-6), 2011 年 12 月 11-15 日 (Funaobori, Tokyo) .
 36. 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, UVSOR ユーザーミーティング, 2011 年 11 月 18 日(岡崎コンファレンスセンター)、招待講演.
 37. T. Hirahara, "Ultrathin films of topological insulators", The 15th International Conference on Thin Films, 2011 年 10 月 8 日 (Kyoto, Japan) 、招待講演.
 38. 平原徹: ラシュバ・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)、招待講演.
 39. 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 23-26 日(富山大学).
 40. 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 23-26 日(富山大学).
 41. 平原徹: 非磁性体表面の磁性現象, 物性若手夏の学校分科会 2011 年 8 月 3 日(ホテルエバー富士), 招待講演.
 42. T. Tono, T. Hirahara, and S. Hasegawa: In situ measurements of current induced spin polarization in ultrathin bismuth films, The 13th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-13), 2011 年 7 月 4 日 (Prague, Czech Republic).
 43. T. Hirahara, Y. Sakamoto, M. Yamada, H. Miyazaki, Y. Takeichi, S. Kimura, I. Matsuda, A. Kakaizaki, S. Hasegawa: Ultrathin Films of Topological Insulators, The 13th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI13), 2011 年 7 月 4 日 (Prague, Czech Republic).

〔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
<http://www.geocities.jp/thirathara/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平原 徹 (HIRAHARA, Toru)
東京大学・理学(系)研究科(研究院)・助教
研究者番号: 30451818