

1.1 長谷川研究室

4月から修士課程1年生として申 東潤と白井 皓寅が新しくメンバーに加わった。3月には、相谷 昌紀と福居 直哉が修士課程を修了して相谷が企業に就職していった。

当研究室では、表面物性、特に「表面輸送」をキーワードにして実験的研究を行っている。おもにシリコン結晶表面上に形成される種々の表面超構造や超薄膜を利用し、それらナノスケール低次元系に固有の電子状態や電子輸送特性、スピン状態・スピン流を明らかにし、3次元結晶の電子状態では見られない新しい現象を見出し、機能特性として利用することをめざしている。最近、ビスマス系合金結晶に表れるというトポロジカル表面状態やグラフェン、シリセン、モノレイヤー超伝導などの研究も行っている。このようなナノマテリアルの原子配列構造や原子層成長の制御・解析、表面電子状態、電子輸送特性、スピン状態、電子励起など、様々な実験手法を用いて多角的に研究を行っている。また、これらの研究のために、新しい手法・装置の開発も並行して行っている。以下に、本年度の具体的な成果を述べる。

1.1.1 表面電子輸送

Bi および Bi_2Te_3 エピタキシャル超薄膜の反弱局在効果・電子電子相互作用効果の測定

Bi や Bi_2Te_3 の低温・磁場中でのバルク伝導測定では、強いスピン軌道相互作用に起因した量子干渉効果である反弱局在効果や、クーロン遮蔽が弱まることによって生じる電子電子相互作用の多体効果によって伝導度が特徴的な変化を示すことが報告されている。一方、Bi(111) と Bi_2Te_3 (111) はそれぞれ Rashba 分裂表面状態、トポロジカル表面状態といったスピン分裂表面状態を持っており、これらの状態はベリー位相 π のために強い反弱局在効果を示すと言われている。しかし、先行研究の多くは試料の大気暴露のために表面状態は保護されておらず、表面状態の寄与は明らかになっていない。本研究では上記の効果の表面状態の寄与を明らかにする目的で、様々な膜厚の Bi(111) や Bi_2Te_3 (111) エピタキシャル超薄膜を作成し、超高真空・低温・磁場中での *in-situ* 伝導測定を行い、反弱局在効果と電子電子相互作用に特徴的な伝導度の変化を観測し、これらの効果に関するパラメータの膜厚依存性を調べた。その結果、Bi(111) の Rashba 分裂表面状態は量子効果への寄与をほとんど持たず、観測した伝導度依存性は膜内伝導由来であることを明らかにした。一方、 Bi_2Te_3 (111) では、3-6QL (1 QL = 5 原子層からなる結晶格子の単位) の薄い膜ではトポロジカル表面伝導由来の量子効果が大きく、膜厚の増加とともに膜内伝導の量子効果の寄与が増加していくことがわかった。また、位相緩和長が膜厚に比例する依存性を示しており、これは膜内伝導電子が表面状態電子に散乱されて位相緩和することを示唆している。

FIB 加工時のキャッピング保護膜

当研究室の集束イオンビーム (FIB) 複合型 4 探針 STM 装置を用いると従来は困難であった *in situ* の表面微細加工と電気伝導測定が可能となり、より多様な表面電子輸送現象をとらえられると期待できる。しかし、*in situ* FIB 加工が、不要な損傷を試料に与えることがあり、とくに表面状態や薄膜に及ぼす影響は不明であった。我々は、Si(111) 基板上に 8 QL 相当の Bi_2Se_3 (111) ピタキシャル超薄膜を作成し、FIB によってさまざまな線幅の細線に加工した。このとき、セレン層をキャッピングしてから加工した capped 試料と、キャッピング層の無い non-capped 試料を用意した。細線の 1 次元伝導度は 2 次元伝導度と線幅の積で表されるので、線幅-対-1 次元伝導度をプロットすれば 2 次元伝導度が傾きとして求まる。また、2 次元伝導度はそれとは独立に微細加工していないベタ膜領域で直線 4 探針法を使っても求められる。capped 試料では両方の方法で求めた値がほぼ一致したが、non-capped 試料では細線から求められる 2 次元伝導度が直線 4 探針法での値を下回った (図 1.1.1)。この結果は、FIB 加工中に意図せぬ Ga イオンビーム照射による損傷が細線に及んでいることを示唆すると同時に、その照射損傷がセレンキャッピング層によって軽減されることを意味しており、セレンキャッピング層が保護膜として有効であることがわかった。

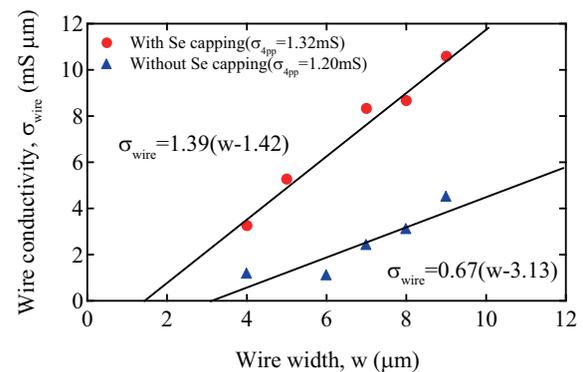


図 1.1.1: セレンキャップ層あり (丸印) と無し (三角印) で加工した Bi_2Se_3 細線について、加工後にキャップ層を除去したあと測定した 1 次元伝導率と線幅との関係。

Bi_2Se_3 超薄膜上に FIB を用いて作成した H 型構造の非局所抵抗測定

Bi_2Se_3 に代表されるトポロジカル絶縁体の表面状態はスピン偏極したディラックコーンを持つ。スピン偏極したバンド構造に電場をかけることでスピン-電流変換がおこる「スピンホール効果」が表れることが予言されている。そこで、 Bi_2Se_3 (111) エピタキ

シャル超薄膜の表面状態に由来するスピホール効果を H 型構造 (図 1.1.2 挿入図) の非局所抵抗を室温で測定することで検出することを試みた。得られた非局所抵抗をオームの法則に従う伝導に由来する成分とスピホール効果に由来する成分の和であると仮定してフィッティングを行った (図 1.1.2)。非局所抵抗は通常のオームの法則に従う成分のみではほぼ矛盾なく説明できた。スピホール効果の定量的な議論を行うには、より微細な H 型構造での測定や極低温での実験が必要と思われるので、現在その実験を準備している。

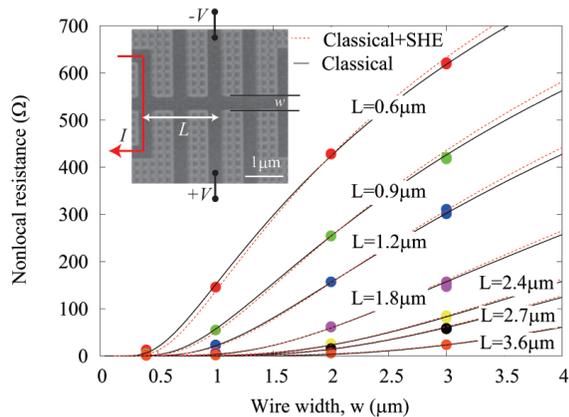


図 1.1.2: H 型構造における非局所抵抗の線幅依存性。非局所抵抗の電極配置と線幅 w 、プローブ間隔 L の定義は、図中に挿入した FIB-SIM(走査イオン顕微鏡) 像に示す。

Si(110) 2×5 -Au 表面の 1 次元伝導

Si(110) 2×5 -Au 表面超構造は、Au 原子が一定方向にワイヤ状に並んだ構造を持ち、角度分解光電子分光からも擬 1 次元金属的な電子状態を持つことが知られている。他の擬 1 次元金属的表面と比べると原子鎖間の相互作用が弱いので、より 1 次元性が強く表れることが期待される。そこで Si(110) 2×5 -Au において直線 4 端子法による電気伝導測定を行うと、端子の間隔を数 $10 \mu\text{m}$ 程度以下に狭くすると抵抗値に異方性が観測され、さらに抵抗値が端子の間隔に依存する結果が得られた。これは他の擬 1 次元系の場合のように異方的な伝導度を持つ 2 次元系としては理解できないことを意味し、電気伝導に 1 次元に近い性質が表れていると思われる。浸透理論によりこの伝導を理解できると考えられるが、より微小な探針間隔や温度依存性の測定を行ってメカニズムを解明する予定である。

1.1.2 表面ナノ構造

シリセン吸着 Ag 超薄膜の量子井戸の研究

六方格子の構造を持つシリコン単原子層であるシリセンはグラフェンに類似した性質を持つと言われている。最近では Ag(111) 単結晶上で成長することが報告されており、ディラックコーンらしきバンド分散も観測されている。しかし、Ag 単結晶上は導電性が高いため、シリセンの輸送特性を直接測定することは困難だと思われる。そこで、シリセンに対する基板の影響を最小化するために、Ag(111) 超薄膜上のシリセン作製を試みた。シリセンの成長を確認する方法として電子回折による構造観測と角度分解光電子分光法 (ARPES) による電子状態の確認を行った。先行研究では LEED による観測しかなされておらず、シリセンの正確な膜厚制御に課題があったが、RHEED を用いることでシリセンの成長をモニターし膜厚コントロールが可能になった。また、Ag 超薄膜は電子の膜厚方向の閉じ込めによって生じる量子井戸状態 (QWS) を有し、薄膜の表面上に他の原子が吸着することで薄膜/真空の界面の変化が QWS のエネルギーシフトが起こることが報告されている。本研究では Ag(111) 超薄膜上のシリセン成長を RHEED モニターにより制御して 2 層シリセンを作製し、角度分解光電子分光法 ARPES で電子状態を測定した。その結果、Ag 超薄膜の量子井戸状態 (QWS) がシリセン作製前後でエネルギーシフトしていることが観測された。そこで、Ag 薄膜の量子井戸状態の膜厚依存性を調べ、位相シフト量子化則に基づいた面内分散から、Ag 薄膜/真空界面における位相シフトの変化が QWS のエネルギーシフトを引き起こしていたことが分かった。以上から、Ag(111) 超薄膜上シリセンの成長を RHEED モニターと Ag 薄膜/真空界面における位相シフトにより確認した。今後はシリセンの構造解析を行うために RHEED と LEED から得られる構造を対応させることが求められる。

多層シリセンのバンド構造測定

Ag(111) 表面上に成長した単原子層のシリセンのバンド分散がディラック電子のような直線的なものであることが昨年報告された。そこで本研究では単原子層ではなく二層のシリセンを Ag(111) 表面に作成し、フランスの放射光施設ソレイユにおいて、角度分解光電子分光測定でバンド分散を決定した。二層シリセンは理想的なシリセンに対して $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 構造をとるため、ディラックコーンがそれに従って折り返されることが期待される。実際に測定されたバンド分散では Γ 点近傍で明確なディラックコーンが観測された (図 1.1.3)。今後はさらにシリセンの層数を増やし、ディラックコーンが層数の増加とともにどのように変化していくかを検証していく。さらに電気伝導測定を行い、その輸送特性を明らかにしていく。(フランスマルセイユ大学、イタリア CNR との共同研究)

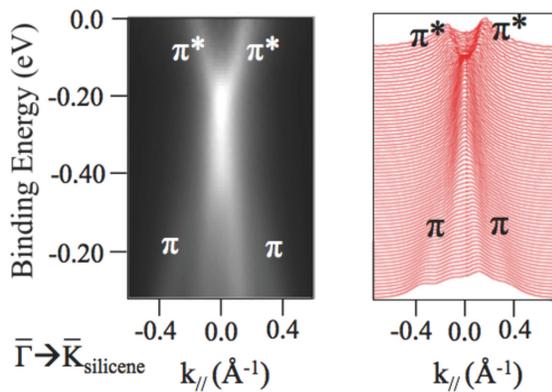


図 1.1.3: 二層シリセンで観測されたディラックコーン型のバンド分散 (左: グレースケール像、右: スペクトル線表示)。

ビスマス超薄膜における半金属-半導体転移の検証

ビスマスは、バルク状態はフェルミ面の小さな半金属であり、それに比べて表面状態はフェルミ面の大きな金属である。これまで角度分解光電子分光によって表面状態のバンド構造がよく調べられていたが、バルクバンドに関する報告例はほぼ皆無であった。特にフェルミ準位をよぎっているバルクの電子・ホールバンドが、200 Å 程度の厚さの超薄膜になったときには量子閉じ込め効果によってフェルミ面を横切らなくなる半金属-半導体転移が 1960 年代に理論的に予言されていたが、はっきりとした実験的な証拠は見つかっていなかった。そこで本研究ではこれまでと違って、バルク敏感の低エネルギーの直線偏光励起光を用いて Bi(111) エピタキシャル超薄膜 (厚さ 100 Å) の角度分解光電子分光測定を行った。その結果、偏光が s 偏光の場合にバルクのホールバンドが明瞭に観測された。そのホールバンドの頂点はフェルミ準位より 50 meV 下にあり、確かにフェルミ準位をよぎっていない。これはバルクバンドが半導体になったことを示唆しているが、今後膜厚を変えさらにバルク電子バンドの検出も試み、半金属-半導体転移の確固たる証拠を得たいと考えている。

1.1.3 新しい装置・手法の開発

超高真空低温強磁場下における走査トンネル顕微鏡の開発

昨年度に引き続いて超高真空 (10^{-11} Torr)・極低温 (~ 2.5 K) 下で動作する走査トンネル顕微鏡の開発を行った。まず、試料面直に 8 T の磁場が印加可能な超伝導磁石を導入した。さらにロックイン増幅器を用いた回路を導入し、走査トンネル分光イメージングができるようになった。これを用いて Ag(111) 表面における分光イメージングを行い、表面での定

在波を観察することに成功した。本装置は伝導現象における微小領域でのスピン依存のポテンシャルマップピングができるように通常の STM 探針の他に二つ電極が STM のピエゾについている。しかしこの部分が探針ホルダーとの間の摩擦で摩耗し使用不可能になる事故が発生し、約半年間装置が使用不能になった。この問題に対策を施し、材質を変えることで同じ事故が起きないように設計し直した。来年度は実際にポテンショメトリ測定ができるように測定回路を作成し、スピン偏極探針と合わせて研究を進めていく。

今年度の研究は下記の研究費補助のもとで行われました。記して感謝いたします。

- ・日本学術振興会 科研費 基盤研究 A 「ミリケルビン・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」(代表 長谷川修司)
- ・日本学術振興会 科研費 挑戦的萌芽研究 「ナノスケール伝導用スピンプローブの開発とそれによる表面ラシュバ系のスピン流の研究」(代表 平原徹)
- ・日本学術振興会 科研費 若手研究 (A) 「スピン偏極走査ポテンショ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」(代表 平原徹)

< 受賞等 >

- [1] 白井皓寅: 表面科学技術者資格認定 (公益社団法人日本表面科学会、2012 年 7 月)

< 報文 >

(原著論文)

- [2] 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 (Nov, 2012).
- [3] 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 (Jul, 2012).
- [4] 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 (Jul, 2012).
- [5] 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 (Jul, 2012).

- [6] 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*, Appl. Phys. Lett, in press (2013).
- (総説)
- (国内雑誌)
- (著書)
- [7] 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*, pp. 153-165, in Atomic Scale Interconnection Machines, ed. Christian Joachim (Springer 2012).
- [8] S. Hasegawa (分担執筆): *Reflection High-Energy Electron Diffraction*, pp. 1925-1938, in Characterization of Materials, ed. Elton N. Kaufmann (Wiley 2012).
- [9] 長谷川修司 (分担執筆): 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, Oct 2012).
- [10] S. Hasegawa: "The Image is My Life.", in "In Memory of Akira Tonomura: Physicist and Electron Microscopist" (World Scientific, 2013), in press.
- (その他)
- [11] 平原徹: "トポロジカル絶縁体" キーワード, 理学部ニュース 2013年3月号.
- (学位論文)
- [12] 福居直哉: 集束イオンビーム複合型4探針走査トンネル顕微鏡装置を用いた薄膜のその場微細加工および電気伝導測定 (修士論文).
- [13] 相谷昌紀: ビスマス超薄膜およびトポロジカル絶縁体超薄膜の輸送特性 (修士論文).
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 招待講演
- [14] 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).
- [15] 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).
- [16] 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)
- [17] 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).
- 一般講演
- [18] T. Hirahara, M. Aitani, and S. Hasegawa: *In situ Magnetotransport measurements of ultrathin Bi films on Si(111)*, Symposium on Surface and Nano Science 2013, 2013年1月17日 (蔵王).
- [19] N. Fukui, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *In Situ Fabrication and Transport Measurements of Surface Nanostructures with a For-tip STM Combined with FIB*, International Conference of Young Researchers on Advanced Materials 2012, 2012年7月3日 (Singapore).
- [20] M. Aitani, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *In situ magnetotransport measurements of ultrathin Bi films*, The Yonsei-Todai Joint Workshop 2013, 2013年2月19日 (東京大学 本郷).
- [21] N. Fukui, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *Micro-fabrication of ultrathin films by focused ion beam and in situ electric conduction measurement by 4-tip STM*, The Yonsei-Todai Joint Workshop 2013, 2013年2月19日 (東京大学 本郷).
- **The 10th Japan-Russia Seminar on Semiconductor Surfaces (JRSSS10)**, 2012年9月26-28日 (東京大学, 本郷)
- [22] T. Hirahara and S. Hasegawa: *Ultrathin Bi films: Electronic structure and topological properties*.
- [23] M. Yamada, T. Hirahara, R. Hobar, S. Hasegawa: *Surface-state superconductivity measured by a UHV sub-kelvin micro-four-point-probe system under high magnetic field*.
- [24] T. Tono, Y. Ueda, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *Measurements of non-integer dimensional transports in Si(110)-2×5 Au*.
- [25] M. Aitani, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *Magnetotransport measurements of ultrathin Bi films on Si(111)*.
- [26] N. Fukui, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *The Surface-State Conduction of a Microstructure Fabricated by Focused Ion Beam*.
- [27] T. Shirai, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *Study of the Quantum-Well States in Ultrathin Ag Films covered with Silicene*.
- (国内会議)
- 招待講演
- [28] 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).

- [29] 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「スピントロニクスマテリアルの新しい展開」, 2013 年 1 月 11 日 (大阪電通大 駅前キャンパス).
- [30] 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「機能性ナノマテリアル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).
- [31] 長谷川修司: 物理オリンピックのシステム, 日本物理学会 第 68 回年次大会シンポジウム「物理オリンピックと日本の物理教育」, 2013 年 3 月 28 日 (広島大学, 東広島).
- [32] 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).
- [33] 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).
- [34] 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).
- 一般講演
- [35] 平原徹: ビスマス超薄膜の電子状態 - 基板の影響とトポロジカルな物性, UVSOR シンポジウム, 2012 年 11 月 10 日 (岡崎コンファレンスセンター).
- [36] 東野剛之、上田洋一、平原徹、長谷川修司: Si(110) 2×5 -Au における非整数次元伝導の測定, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 18 日 (横浜国立大学).
- [37] 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).
- [38] 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).
- [39] 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).
- [40] 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, 第 32 回表面科学学術講演会, 2012 年 11 月 21 日 (東北大学).
- [41] 山田学、平原徹、保原例、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).
- [42] 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).
- [43] 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).
- [44] 平原徹: 非磁性体表面のスピン偏極電子, 東京大学理学部物理学科ランチトーク, 2012 年 4 月 27 日 (東京大本郷).
- [45] 長谷川修司: 多探針走査プローブ顕微鏡によるナノ領域の電気計測, JEITA (社) 電子情報技術産業協会 半導体部会研究会, 2012 年 7 月 27 日 (JEITA 大手センタービル, 東京).
- [46] 長谷川修司: トポロジカル絶縁体とその表面の物性, (株) デンソー基礎研究所, 2012 年 8 月 22 日 (デンソー基礎研, 愛知).
- [47] 長谷川修司: トポロジカル絶縁体とその表面の物性表面での電子・スピン輸送, JST-ERATO 中嶋プロジェクト 第 7 回中嶋ナノクラスター集積制御セミナー, 2012 年 12 月 21 日 (慶應大学理工学部矢上キャンパス, 神奈川).
- (講義等)
- [48] 長谷川修司: 表面の特性基礎, (公社) 日本表面科学会 第 53 回表面科学基礎講座, 2012 年 7 月 11 日 (山上会館, 東京大学).
- [49] 長谷川修司: ナノワールドのイメージング, 理学系研究科共通科目「理学クラスター講義 II」「イメージング」, 2012 年 7 月 17 日 (小柴ホール, 東京大学).
- [50] 長谷川修司、平原徹、白井皓寅 (TA)、申東潤 (TA): 物理学実験 I (3 年生) 電子回折, 2012 年度冬学期 (本郷).
- [51] 長谷川修司: 理科教育 (教育学部) 2012 年度夏学期 (本郷).
- [52] 長谷川修司: 実験データの解析, 物理オリンピック日本委員会 IPhO2013 日本代表選手候補者冬合宿, 2012 年 12 月 24 日 (八王子セミナーハウス, 東京).
- [53] 長谷川修司、興治文字: 実験・実習: 大気圧を測ろう, 平成 24 年度女子中高生夏の学校 2012, 2012 年 8 月 10 日 (国立女性教育会館, 埼玉).
- [54] 長谷川修司: 実験課題レポートの書き方、および大気圧測定実験物理オリンピック日本委員会プレチャレンジ, 2012 年 5 月 20 日 (秋田県立秋田高等学校, 秋田); 2012 年 12 月 20 日 (大阪星光学院, 大阪); 2013 年 2 月 22 日 (福井県教育研究所, 福井); 2013 年 3 月 16 日 (栃木県立宇都宮高等学校, 栃木).
- [55] 長谷川修司: 模擬授業 at 本郷, 2012 年 11 月 27 日 (栃木県立宇都宮高等学校); 2012 年 11 月 13 日 (群馬県立前橋高等学校); 2012 年 8 月 9 日 (神奈川県立湘南高等学校); 2012 年 8 月 3 日 (茨城県立土浦第一高等学校).

(セミナー)

1 Hasegawa Group

Research Subject: Experimental Surface/Nano Physics

Members: Shuji HASEGAWA and Toru HIRAHARA

Surfaces of materials are platforms of our research where rich physics is expected due to the low-dimensionality and symmetry breakdown. (1) Electronic/spin/mass transports, (2) atomic/electronic structures, (3) phase transitions, (4) electronic excitations, (5) spin states and magnetism, and (6) epitaxial growths of coherent atomic/molecular layers/wires on semiconductor surfaces, topological surfaces, and nano-scale phases such as surface superstructures and ultra-thin films. We use various kinds of ultra-high vacuum experimental techniques such as electron diffraction, scanning electron microscopy, scanning tunneling microscopy/spectroscopy (STM/S), photoemission spectroscopy, *in-situ* four-point-probe conductivity measurements with four-tip STM and monolithic micro-four-point probes, and surface magneto-optical Kerr effect measurements. Main results in this year are as follows.

(1) Surface electronic transport: Control of surface electronic states and their conductivity of topological insulators by using FIB patterning techniques. Spin Hall effect, effects due to anti-weak localization and electron-electron interaction at strong spin-orbit coupling material surfaces. Anisotropic transport on a quasi-one-dimensional metallic surface.

(2) Surface phases, ultra-thin films, and phase transitions: Silicene, semi-metal-to-semiconductor transition in Bi ultrathin films, 2D topological materials. Topological phase transition. Order-disorder phase transition, charge-density-wave transition, Mott transition on various metal-induced surface superstructures of Si. Quantum-well state in ultra-thin metal films. Rashba effect in surface state and hybridization with quantum-well states in thin films.

(3) Surface magnetism: Monolayer ferromagnetic surfaces. Diluted magnetic surface states. Kondo effect and RKKY interaction in surface states.

(4) Construction of new apparatuses: Low-temperature strong-magnetic-field scanning tunneling microscope and scanning tunneling potentiometry. Micro-four-point probes apparatus at mK under strong magnetic field.

- [1] 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 (Nov, 2012).
- [2] T. Uetake, T. Hirahara, Y. Ueda, N. Nagamura, R. Hobarra, 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 (Jul, 2012).
- [3] 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)-√21 × √21 Superstructure*, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **10**, 310 (Jul, 2012).
- [4] 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 (Jul, 2012).
- [5] 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, in press (2013).
- [6] 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*, pp. 153-165, in Atomic Scale Interconnection Machines, ed. Christian Joachim (Springer, 2012).
- [7] S. Hasegawa: *Reflection High-Energy Electron Diffraction*, pp. 1925-1938, in *Characterization of Materials*, ed. Elton N. Kaufmann (Wiley, 2012).
- [8] S. Hasegawa: "The Image is My Life.", in *Memory of Akira Tonomura: Physicist and Electron Microscopist* (World Scientific, 2013), in press.