

1.1 長谷川研究室

4月から修士課程1年生として植竹智哉、最首祐樹と坂本裕介が、12月から日本学術振興会外国人招へい研究者としてSandhya Chandolaが新しくメンバーに加わった。3月には、永村直佳が博士課程を修了し、小森田拓と東野剛之が修士課程を修了した。

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。最近は、ピ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などの研究も開始した。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、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 薄膜におけるスピンホール効果の検出

スピン軌道相互作用の強いBiにおいては大きなスピンホール効果が期待され、スピントロニクスデバイスへの応用上注目を集めている。スピンホール効果が起こる系に電流を流すと電子のスピンと電流の両方に垂直な方向にスピン流が生じ、試料の端にスピンの蓄積される。ここで誘起したスピンは磁性体電極を用いて逆スピン効果を利用して電位差として検出できる。

そこでSi(111)-7×7上にBi薄膜を作成し、4探針STMに磁性体を被覆したカーボンナノチューブ探針を用いて4端子法により電気伝導測定を行った。得られた抵抗値の探針の位置依存性からスピンホール効果の寄与の検出に成功した。得られた結果からスピンホール伝導度(スピン流と電場の比)を $2.4 \times 10^4 (\Omega\text{m})^{-1}$ 、スピンホール角(スピンホール伝導度と電気伝導度の比)を 3×10^{-2} と見積もった。

トポロジカル絶縁体 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ 超薄膜の表面電子構造と輸送特性

スピン軌道相互作用が強い物質において、バルク状態ではバンドギャップが開いて絶縁体であるが、エッジ(表面)に金属的な状態が形成されるというトポロジカル絶縁相が発現することがあり、昨今理論的に話題になっている。しかし実験的には単結晶バルクを用いると十分低温においてもバルク状態に、起源が不明の金属成分が残っているために、トポロジカルな性質を担っている表面状態のみの特性を評価

することに成功した例はない。本研究ではトポロジカル絶縁体を超薄膜にして、その表面状態の性質を測定できないかと考え、 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ 合金をシリコン表面上に成長させた。電子回折及び内殻光電子分光の結果から $x < 0.32$ ならばエピタキシャルな単結晶超薄膜が約30Åから成長可能ながかった。その表面電子状態はバルク単結晶の場合と同じでトポロジカル絶縁体の実現要件を満たすことが分かった。また $\text{Bi}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}$ 膜に関して電気伝導測定を行った結果、240Åの薄膜は絶縁体的な温度依存性を示したが、98Åの膜は150Kで絶縁体金属転移が見られ、29Åの膜は室温から低温まで金属伝導であった。これは膜が薄くなるにつれてバルク状態の寄与が減少し、最も薄い膜では電気伝導がほとんど表面のみで起こっていることを意味する。このようにトポロジカル絶縁体の表面状態の特性評価に新たな手段を提案することができた。

サファイア基板上のグラフェンの電気伝導測定

次世代のデバイス材料としてナノマテリアルであるグラフェンが近年世界中で注目を集めている。このようなナノメートルスケールの系では基板結晶表面の1原子高さ程度のステップによる電子散乱が電気伝導に支配的に寄与すると考えられる。今後のナノテクノロジー発展において、このステップを横切るときの電気伝導度測定が重要となる。本研究ではサファイア基板上のグラフェンの電気伝導を測定し、グラフェン電気伝導に対してステップが与える影響を解析することを目的としている。試料はサファイア(1102)面上に機械的剥離法を用いてグラフェンを作成した。サファイア上のグラフェンは基板表面に密着したものとなり、基板のステップ/テラス構造を反映した形状をとる。そのため、ステップと平行・垂直方向で電気伝導度に異方性が生じ、4探針STMを用いてステップの影響を測定出来ると期待され、予備的な結果を得た。(横浜国立大学との共同研究)

エピタキシャル金属超薄膜の異方的輸送特性

半導体基板上に作成された、膜厚が数nm程度のエピタキシャルな金属超薄膜は、量子サイズ効果を示すことが知られている。我々は以前、等方的なシリコン基板上に作成された異方的表面超構造Si(111)4×1-Inによって、その上に成長させた銀薄膜の量子化準位を擬1次元的になるように制御できることを、角度分解光電子分光を用いて発見した。本年度はこの系について4探針電気伝導度の探針間隔依存性、温度依存性、膜厚依存性を、別項で述べるように改良に取り組んできた低温型独立駆動4探針STM装置で測定した。

その結果、擬1次元的金属量子薄膜について、輸送特性においても有意な異方性を検出した。電気伝導度の異方性には、大きく分けて緩和時間の異方性とバンド構造の異方性の2つの起源が考えられる。前者は薄膜内部の周期的積層欠陥やランダムな欠陥、

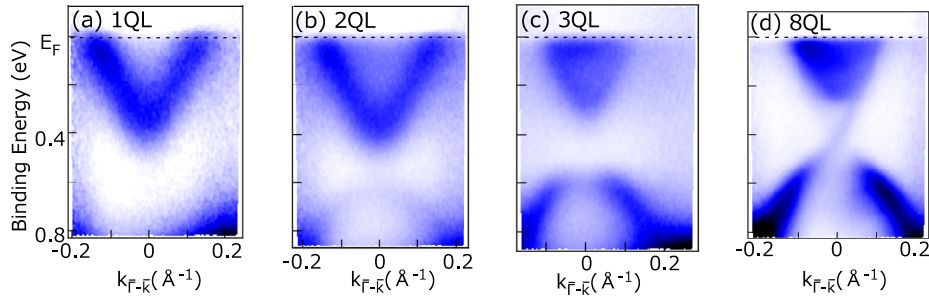


図 1.1.1: 角度分解光電子分光法によって測定された Bi_2Se_3 薄膜のバンド分散. 膜厚がそれぞれ、(a) 1 QL, (b) 2 QL, (c) 3 QL, (d) 8 QL である。1 QL = 9.5 \AA で結晶格子の単位胞の厚さを意味する。(d) では、価電子バンドと伝導バンドをつなぐ交差した直線的な 2 本のバンドが見える。これがディラックコーンと呼ばれる表面状態である [6]。

表面界面散乱に依るものであり、後者は角度分解光電子分光で測定可能な量子井戸状態のフェルミ面やバンド分散関係の異方性で説明できる。今回の測定の結果、輸送特性の異方性は後者のバンド構造の異方性に依る所が大きいことが判明し、当初の目的通り、界面構造を変化させることで、結果的に薄膜量子井戸の輸送特性も制御できることを示した。

1.1.2 表面ナノ構造

トポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 超薄膜の電子構造

近年トポロジカル絶縁体というバルクにはバンドギャップがあるが表面には金属的な電子状態が存在する物質が注目を浴びている。とくに Bi_2Se_3 は単一ディラックコーンの表面状態を持つとされ、バルク単結晶については盛んに研究がなされている。しかし Bi_2Se_3 薄膜についての報告はまだ少なく、トポロジカル絶縁体の特異な表面状態の物性を評価するためにも薄膜状の試料を作成することは重要である。また膜厚を薄くすることで量子サイズ効果により異なる物性が見られる可能性もある。そこで本研究では、 $\text{Si}(111)$ 表面上に Bi_2Se_3 薄膜をエピタキシャルに作成し、角度分解光電子分光法およびスピン分解光電子分光法により、そのバンド分散を測定した。その結果、図 1.1.1(d) に示すように、厚さ約 80 (8 QL (quintuple layer)) の薄膜ではバルク単結晶のものと同様のスピン偏極した単一ディラックコーンが観測された。しかし厚さ 30 \AA 以下の薄膜 (Fig. 1.1.1(a)-(c)) ではそれとは異なるバンド構造であり、effective four-band model に基づく解析から、厚さ 30 \AA (3 QL) の薄膜は二次元量子スピンホール相にあるが、厚さが 20 \AA (2 QL) 以下の薄膜は trivial な絶縁体であることが分かった。今後はドーピングによるフェルミ準位制御を行い、表面電気伝導度を測定する予定である。

キャリアドーブしたモット絶縁体表面

前年度までにマイクロ 4 端子電気伝導測定により $\text{Si}(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Sn}$ 表面が電子相関の強いモット絶縁体表面であることが示唆されていた。さらにこの表面に Na を吸着したり、Sn 原子を In 原子で置換した表面においてはキャリアフィリング制御により電子相関の変調で一部金属伝導が復活するものの、低温においては強い局在が起きることが明らかになった。今年度は実際にキャリアドーブした表面をより詳細に調べるために光電子分光測定と STM 観察を行った。Na 吸着によりバンド底がより高エネルギー側にシフトし、In 置換によりバンドは全体的に低エネルギー側にシフトすることが分かり、それぞれ予想されたとおり電子ドーブとホールドーブが起きていることが確認された。また STM 観察ではドーブしていない表面に比べて欠陥密度が増加しており、電気伝導で観測されたキャリア局在の描像ともよく一致することが明らかになった。

Bi 超薄膜の作成

近年、量子スピンホール系に関心が高まっている。2 原子層厚の Bi についてトポロジカルナンバールを計算することにより、Bi 薄膜が量子スピンホール系の候補となり得、そのエッジ状態を利用することにより、これまでと全く違ったスピンの生成が期待できると理論的に予想されている。本研究では、実際に 2 原子層 Bi が作成可能か検証することを目的とした。実験では薄膜生成に適切と考えられた $\text{Si}(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Au}$ 表面上に Bi を室温蒸着することで試料を作成し、低温 STM で観察した。その結果、 $6 \times 6\text{-Au}$ 上にパッチ状に Bi 原子の層が作成されることが判明した。薄膜内での原子の配列は $\text{Bi}(012)$ 面の正方格子を単位格子とし、それぞれ表面に垂直な軸に対してランダムに回転をした繊維構造となっていた。今後は、作成条件の最適化を行うことにより良質の 2 原子層 Bi 超薄膜生成が期待される。

SMOKE 装置による Co 薄膜磁気異方性の評価

記録媒体への応用をはじめとして、磁性薄膜の磁気異方性は非常に重要な物性の一つである。Si(111) 基板上の 7×7 と $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面、および Ag 薄膜をテンプレートとし、それらの上に Co 薄膜を作成し、表面磁気光学 Kerr 効果測定を行った。 7×7 と $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面上に作成した Co 薄膜がシリサイド形成によって磁性が損なわれるのに対し、Ag 膜上の Co 薄膜は大きな磁化と強い磁気異方性を持つことが分かった。容易化軸は面内である。この性質は室温と低温 (80 K, 15 K) とともに見られた。また、Co の膜厚がちょうど hcp 構造における 1 BL (bilayer) の時に磁気異方性が最も顕著になることから、この性質は Co 薄膜の構造に由来することが示唆される。今後は、STM による Co 薄膜の Morphology 観察と合わせて、Co 薄膜と格子不整合の小さいテンプレートによって薄膜の磁化特性を変調することを目指す。

1.1.3 新しい装置・手法の開発

グリーン関数 STM 装置の改良

当研究室では、約 7 K までの低温で動作可能な独立駆動型 4 探針 STM 装置を開発している。本年度も引き続き、表面超構造と薄膜の 4 探針電気伝導測定に特化したセットアップを進めてきた。具体的には、(1) 動作安定性の向上のために、探針からの信号線のコンタクト部をばね状のものからピン型にするなど、STM ステージに大幅な改良を加えた。さらにセットアップ前に液体窒素温度でのピエゾユニット動作確認を可能にする機構を確立した。(2) 寒剤の持ちを良くし、最低到達温度で測定できる時間を増やすために、輻射を防ぐシールドを追加した。寒剤の流量による温度調節ができるフロー式冷却に対応するために熱アンカーも導入した。(3) 2 次電子検出器の代わりにマイクロチャンネルプレートを導入し、SEM の分解能を向上させた。(4) 金属超薄膜など低抵抗の試料を測定するために、差動増幅回路を導入するなどヘッドアンプの改良を行った。

以上の改良により、別項に述べたように半導体表面超構造上のエピタキシャル金属超薄膜の輸送特性を測定することに成功した。今後は 4 探針が自由に動くからこそ可能な、異方的表面超構造や各種ナノ構造体といった低次元系の、in situ における温度依存電気伝導度測定を行っていく予定である。

極低温 4 探針 STM 実証機の開発

上述のように、7 K までの 4 探針 STM はすでに稼働中であるが、より低温、とくに 4 K 以下での極低温での動作と、装置稼働率の向上、さらには集束イオンビーム (FIB) による加工、原子間力顕微鏡 (AFM) との複合による更なる先端的な応用計測手法の確立、また、長年の夢である遅延グリーン関数の実空間マッピングとモノレイヤー超伝導の検出を狙い、極低温

型 4 探針 STM 実証機の開発を行っている。本年度は特に以下の項目について重点的に開発を行った。(1) STM ユニットの小型・軽量・高剛性化、(2) 寒剤保持時間の増加、最低到達温度の改善、(3) 制御電子回路の低雑音化・高速化、(4) STM 室、試料準備室、導入室、排気系などの一連の真空装置の設計・製作。その結果、到達温度 1.8 K を達成し、原子分解能 STM 像もルーチン的に得ることが可能となった。今後は、更に、(5) FIB の設置・統合、(6) 統合型制御ソフトウェアの開発を行う。

今年度の研究は下記の研究費補助のもとで行われた。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 「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」(代表 長谷川修司)
- ・日本学術振興会 日中韓フォーサイト事業「サブ 10 nm ワイヤ; その新しい物理と化学」(日本側代表 長谷川修司)
- ・科学技術振興機構先端計測分析技術・機器開発事業 プロトタイプ実証・実用化プログラム「マルチプローブ顕微鏡プローバースystem」(代表 長村俊彦)

< 報文 >

(原著論文)

- [1] 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*, Applied Physics Letters **95**, 052110 (Aug, 2009).
- [2] T. Hirahara, T. Komorida, Y. Gu, F. Nakamura, H. Izuchi, H. Morikawa, and S. Hasegawa: *Insulating conduction in Sn/Si(111): Possibility of a Mott insulating ground state and metallization/localization induced by carrier doping*, Physical Review B **80**, 235419 (Dec, 2009) (selected as Editors' Suggestions).
- [3] T. Shibusaki, N. Nagamura, T. Hirahara, H. Okino, S. Yamazaki, W. Lee, H. Shim, R. Hobara, I. Matsuda, G. S. Lee, and S. Hasegawa: *Phase transition temperatures determined by different experimental methods: Si(111) 4×1 -In surface with defects*, Physical Review B **81**, 035314 (Jan, 2010).
- [4] A. Nishide, A. A. Taskin, Y. Takeichi, T. Okuda, A. Kakizaki, T. Hirahara, K. Nakatsuji, F. Komori, Y. Ando, and I. Matsuda: *Direct mapping of the spin-filtered surface bands of a three-dimensional quantum spin Hall insulator*, Physical Review B **81**, 041309(R) (Jan, 2010) (selected as Editors' Suggestions).
- [5] 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, 印刷中 (2010)(selected as Editors' Suggestions).

- [6] Y. Sakamoto, T. Hirahara, H. Miyazaki, S. Kimura, and S. Hasegawa: *Spectroscopic evidence of a topological quantum phase transition in ultrathin Bi_2Se_3 films*, Physical Review B, 印刷中 (2010).
- (総説)
- [7] S. Hasegawa: *Quasi-One Dimensional Metals on Semiconductor Surfaces with Defects*, J. Physics: Condensed Matter **22**, 084026 (Feb, 2010).
- (国内雑誌)
- [8] 平原徹: ビスマス超薄膜の電子構造: Rashba 効果と量子サイズ効果及びその協奏, 真空 **52**, 582-588 (Nov, 2009).
- [9] 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 (Jul, 2009).
- (プロシーディングス)
- [10] Y. Kitaoka, S. Yoshimoto, T. Hirahara, S. Hasegawa, T. Ohba: *Nanometer-scale Four-Point Probe Resistance Measurements of Cu Wires Using Carbon Nanotube Tips*, Advanced Metallization Conference 2009, Eds. M. Naik, R. Shaviv, T. Yoda, and K. Ueno, Materials Research Society, pp. 295-299 (2009).
- (著書)
- [11] 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, Sep, 2009).
- (その他)
- [12] アンドリュウ・クレランド (長谷川修司 訳): ナノスケールの振動板を使って量子現象をみる, パリティ **24**(7), pp. 37 (丸善, Jul, 2009).
- [13] 長谷川修司: 物理はおもしろくないが, 研究はおもしろい, パリティ **24**(9), pp. 48 (丸善, Sep, 2009).
- (学位論文)
- [14] 小森田拓: 表面状態へのキャリアドーピング (修士論文).
- [15] 東野剛之: 磁性体被覆カーボンナノチューブ探針を用いた電気伝導測定 (修士論文).
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 招待講演
- [16] S. Hasegawa: *Towards Diluted Magnetic Surfaces*, TJSPS-KOSEF Asian Core Program The 7th Japan-Korea Symposium on Surface Nanostructures, 2009 年 7 月 15 日 (宮城).
- [17] 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).
- [18] 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).
- [19] 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).
- [20] S. Hasegawa: *Surface States of Rashba Spin-Split Type and Topological Insulators*, The 3rd Yonsei-Tokyo Joint Symposium on Condensed Matter Physics, 2010 年 2 月 12 日 (Yonsei Univ, Korea).
- [21] 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 $BiSb$ alloy film*, Korean Vacuum Society (The 8th Korea-Japan Symposium on Surface Nanostructures), 2010 年 2 月 19 日 (Hyundai Seongwoo Resort, Korea).
- [22] S. Hasegawa: *Surface States of Rashba Spin-Split Type and Topological Insulators*, The 2nd Nanyang Technological University-University of Tokyo Joint Workshop, 2010 年 2 月 22 日 (東京大).
- 一般講演
- [23] T. Komorida, T. Hirahara, Y. Gu, H. Morikawa, S. Hasegawa: *Mott insulating ground state and metallization/localization induced by carrier doping on a surface superstructure*, A3 Foresight Summer School and Workshop, 2009 年 8 月 30 日 (Yangpyeong, 韓国).
- [24] 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).
- [25] T. Hirahara, T. Komorida, Y. Gu, H. Morikawa, S. Hasegawa: *Mott insulating ground state and metallization/localization induced by carrier doping on a surface superstructure*, The 10th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-10), September 24, 2009 年 9 月 24 日 (Granada, Spain).
- [26] 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 2nd UVSOR Workshop on Low-Energy Photoemission of Solids using Synchrotron Radiation (LEPES 09), 2009 年 10 月 3 日 (岡崎).
- [27] T. Uetake, N. Nagamura, R. Hobar, T. Hirahara, S. Hasegawa, and T. Nagamura: *Development of a Low-Temperature Four-Tip STM and Application to Nanoscale Surface Conductivity Measurements*, Annual Meeting of A3 Foresight Program Seminar, 2009 年 11 月 16 日 (松島).
- [28] 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*, Annual Meeting of A3 Foresight Program Seminar, 2009 年 11 月 16 日 (松島).
- [29] 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 11th International Conference on Electronic Spectroscopy and Structure (ICESS-11), 2009 年 10 月 8 日 (奈良).
- [30] 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)
- [31] N. Nagamura, R. Hobar, T. Uetake, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *Electronic and Transport Properties of Low-dimensional Systems Prepared on Si(111) Surfaces*, The 3rd Yonsei-Tokyo Joint Symposium on Condensed Matter Physics, 2010 年 2 月 12 日 (Yonsei Univ., Korea).
- [32] N. Nagamura, R. Hobar, T. Uetake, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *Electronic and Transport Properties of Low-dimensional Systems Prepared on Si(111) Surfaces*, The 2nd Nanyang Technological University-University of Tokyo Joint Workshop, 2010 年 2 月 22 日 (東京大).
- **Symposium on Surface and Nano Science 2010 (SSNS '10)**, 2010 年 1 月 15-18 日 (雫石)
- [33] Y. Saisyu, T. Hirahara, Y. Niinuma, R. Hobar, S. Hasegawa: *Development of UHV-SMOKE system and application to surface magnetization characterization*.
- [34] T. Uetake, N. Nagamura, R. Hobar, T. Hirahara, S. Hasegawa, and T. Nagamura: *Development of a low-temperature four-tip STM and application to nanoscale surface conductivity*.
- [35] 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*.
- [36] T. Hirahara, T. Komorida, Y. Gu, F. Nakamura, H. Idzuchi, H. Morikawa, and S. Hasegawa: *A Mott-insulator surface and its metallization by carrier doping*.
- (国内会議)
- 招待講演
- [37] 長谷川修司: 4 探針型走査トンネル顕微鏡によるナノ計測, 第 7 回プローブ顕微鏡による表面分析研究会 (科学技術交流財団), 2009 年 10 月 30 日 (常滑, 愛知).
- 一般講演
- [38] 永村直佳, 長谷川修司: シリコン表面で展開される低次元系の物理, グローバル COE 第 2 回 RA キャンプ, 2009 年 7 月 2 日 (河口湖, 山梨).
- [39] 長谷川修司, 平原徹, 坂本祐介: トポロジカル絶縁体の表面, 平成 21 年度東北大学通研共同プロジェクト研究会「」半導体サイエンスと半導体テクノロジーの融合 技術を先導する半導体サイエンスを目指して, 2009 年 10 月 17 日 (仙台).
- 日本物理学会 2009 年秋季大会, 2009 年 9 月 26-29 日 (熊本大学)
- [40] 平原徹, 坂本祐介, 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.
- [41] 小森田拓, 平原徹, Yan Gu, 守川春雲, 長谷川修司: キャリアドーピングしたモット絶縁体表面の電気伝導.
- [42] 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.
- [43] 宮田伸弘, 成田尚司, 平原徹, 小河愛美, 長谷川修司, 松田巖: 強磁場下独立駆動型多端子装置による Bi/Ag 超薄膜の反局在効果の研究.
- [44] 長谷川修司, 鈴木亨, 江尻有郷, 山田達之輔, 種村雅子, 興治文子, 田中忠芳, 近藤一史, 増子寛, 呉屋博, 榎本成巳, 大山光晴, 小林雅之: 第 5 回全国物理コンテスト・物理チャレンジ 2009 報告 I. 第 1 チャレンジ.
- [45] 向田昌志, 浅井吉蔵, 江尻有郷, 北原和夫, 毛塚博史, 近藤泰洋, 真梶克彦, 杉山忠男, 鈴木亨, 田中忠芳, 中屋敷勉, 並木雅俊, 長谷川修司, 原田勲, 光岡薫, 山田達之輔: 第 40 回国際物理オリンピック (メキシコ大会) 報告.
- [46] 並木雅俊, 北原和夫, 二宮正夫, 有山正孝, 江尻有郷, 原田勲, 長谷川修司, 波田野彰, 光岡薫, 金信弘, 杉山忠男, 鈴木亨, 坪井健司: 第 5 回全国物理コンテスト・物理チャレンジ 2009 報告 IV. 全体報告.
- (社) 日本表面科学会 第 29 回表面科学学術講演会, 2009 年 10 月 27-29 日 (船堀, 東京)
- [47] 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.

- [48] 東野剛之、北岡佑介、平原徹、長谷川修司: カーボンナノチューブ探針を用いた FeSi_2 ナノワイヤの電気伝導測定.
- [49] 永村直佳, 保原麗, 植竹智哉, 平原徹, 長谷川修司: 低温型独立駆動 4 探針 STM 装置の現状と表面の輸送特性測定.
- [50] 坂本裕介、平原徹、最首祐樹、宮崎秀俊、木村真一、奥田太一、松田巖、村上修一、長谷川修司: BiSb 合金超薄膜上のトポロジカル金属.
- [51] 小森田拓、平原徹、Yan Gu、守川春雲、長谷川修司: キャリアドーピングしたモット絶縁体表面の電気伝導.
- 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 20-23 日 (岡山大学)
- [52] 平原徹, 坂本裕介, 最首祐樹, 宮崎秀俊 A, 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.
- [53] 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_2Se_3 超薄膜の電子構造.
- [54] 永村直佳, 保原麗, 植竹智哉, 平原徹, 長谷川修司: 低温型独立駆動 4 探針 STM による $\text{Si}(111)4 \times 1$ -In 上 Ag 薄膜の輸送特性測定.
- [55] 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.
- [56] 有山正孝, 並木雅俊, 二宮正夫, 北原和夫, 長谷川修司, 原田勲, 江尻有郷: 物理チャレンジ・オリンピックの 5 年間で振り返り展望を語る.
- [57] 江尻有郷, 毛塚博史, 光岡薫, 長谷川修司, 浅井吉蔵, 向田昌志, 真梶克彦, 中屋敷勉: 第 41 回国際物理オリンピック日本代表訓練研修: 実験問題.
- (セミナー)
- [58] 長谷川修司: 不純物吸着原子: キャリアドーピングと近藤効果, 大阪大学大学院電気電子情報工学専攻 森田研究室セミナー, 2009 年 4 月 28 日 (大阪大).
- [59] 長谷川修司: ナノワールドで起こっていること 最先端のナノサイエンス・ナノテクノロジー, 河合塾エンリッチ講座, 2009 年 6 月 29 日 (河合塾本郷校).
- [60] 長谷川修司: 電子線ホログラフィと 4 探針型走査トンネル顕微鏡によるデバイスの評価, コベルコ科研 セミナー, 2009 年 7 月 29 日 (神戸).
- [61] T. Hirahara and S. Hasegawa: *Electron transport measurements at the surface ?from nanowires, surface superstructures to ultrathin films-*, University of Duisburg, 2010 年 1 月 5 日.
- (講義等)
- [62] 長谷川修司: ナノ物理とナノエレクトロニクス, 大阪大学大学院電気電子情報工学専攻量子電子デバイス工学コース「先端集積エレクトロニクス工学特論」, 2009 年 4 月 28 日 (大阪大).
- [63] 長谷川修司: ナノサイエンス・ナノテクノロジー概論、ナノ電子輸送の基礎, 山梨大学工学部電気電子システム工学科 特別講義, 2009 年 7 月 24 日 (山梨大).
- [64] 長谷川修司: 兵庫県立大学理学部集中講義「表面科学」2009 年 8 月 19-21 日.
- [65] 長谷川修司: ナノワールドを見る 1 個 1 個の原子や分子を覗いて触って並べる, 防衛大学校 応用物理学科 課外講演, 2009 年 11 月 13 日 (防衛大学校).
- [66] 長谷川修司、平原徹、坂本裕介 (TA)、植竹智哉 (TA): 物理学実験 I (3 年生) 電子回折, 2009 年度冬学期 (本郷).
- [67] 長谷川修司、溝川貴: 現代物理実験学 I (学部 3 年生講義) 2009 年度夏学期 (本郷).
- [68] 長谷川修司、小森文夫: 物性物理学特論 (表面物理学) (学部 4 年生・大学院共通講義) 2009 年度冬学期 (本郷).

1 Hasegawa Group

Research Subject: Experimental Surface/Nano Physics

Members: Shuji HASEGAWA and Toru HIRAHARA

Topics in our research group are (1) electronic/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 and nano-scale phases. Peculiar atomic arrangements and surface electronic states, characteristic of the surface superstructures and ultra-thin films, on semiconductor surfaces, are our platforms for studying physics of atomic-scale low-dimensional systems by using ultrahigh vacuum experimental techniques such as electron diffraction, scanning electron microscopy, scanning tunneling microscopy/spectroscopy (STM/S), photoemission spectroscopy, *in-situ* 4-point-probe conductivity measurements with four-tip STM and monolithic micro-4-point probes, and surface magneto-optical Kerr effect measurements. Main results in this year are as follows.

(1) Surface electronic transport: Spin Hall effect of strong spin-orbit-interaction materials. Surface electronic states and their conductivity of topological insulators. Transport property of graphene. Metal-insulator transitions, hopping conduction, and a Mott insulator in surface states. Kondo effect in surface-state transport.

(2) Surface phases, ultra-thin films, and phase transitions: 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.

(4) Construction of new apparatuses: Green's-function STM (low-temperature four-tip STM), Magneto-optical Kerr effect apparatus. Magneto-resistance with micro-four-point probes apparatus.

- [1] 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*, Applied Physics Letters **95**, 052110 (Aug, 2009).
- [2] T. Hirahara, T. Komorida, Y. Gu, F. Nakamura, H. Izuchi, H. Morikawa, and S. Hasegawa: *Insulating conduction in Sn/Si(111): Possibility of a Mott insulating ground state and metallization induced by carrier doping*, Physical Review B **80**, 235419 (Dec, 2009) (selected as Editors' Suggestions).
- [3] T. Shibusaki, N. Nagamura, T. Hirahara, H. Okino, S. Yamazaki, W. Lee, H. Shim, R. Hobara, I. Matsuda, G. S. Lee, and S. Hasegawa: *Phase transition temperatures determined by different experimental methods: Si(111)4 × 1-In surface with defects*, Physical Review B **81**, 035314 (Jan, 2010).
- [4] A. Nishide, A. A. Taskin, Y. Takeichi, T. Okuda, A. Kakizaki, T. Hirahara, K. Nakatsuji, F. Komori, Y. Ando, and I. Matsuda: *Direct mapping of the spin-filtered surface bands of a three-dimensional quantum spin Hall insulator*, Physical Review B **81**, 041309(R) (Jan, 2010) (selected as Editors' Suggestions).
- [5] 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, in press (2010).
- [6] 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, in press (2010).
- [7] S. Hasegawa: *Quasi-One Dimensional Metals on Semiconductor Surfaces with Defects*, J. Physics: Condensed Matter **22**, 084026 (Feb, 2010).
- [8] Y. Kitaoka, S. Yoshimoto, T. Hirahara, S. Hasegawa, T. Ohba: *Nanometer-scale Four-Point Probe Resistance Measurements of Cu Wires Using Carbon Nanotube Tips*, Advanced Metallization Conference 2009, Eds. M. Naik, R. Shaviv, T. Yoda, and K. Ueno, Materials Research Society, pp. 295-299 (2009).

第I部

2008年度 物理学教室全般に関する報告

第1章 2008年度に開講された学部講義概要

1.0.1 現代実験物理学 I : 長谷川修司, 溝川貴司

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> 1. X線 <ul style="list-style-type: none"> 1.1 X線の発見、 1.2 特性X線と連続X線、Moseleyの法則、 1.3 Thomson散乱とCompton散乱、 1.4 X線回折 1.5 X線研究の拡がり; CT, リソグラフィ、宇宙X線 2. 電子 <ul style="list-style-type: none"> 2.1 粒子性と波動性 2.2 電子回折と顕微鏡 2.3 Aharonov-Bohm効果 2.4 トンネル効果とSTM 3. 多様な実験手法 <ul style="list-style-type: none"> 3.1 顕微鏡 3.2 分光法 | <ul style="list-style-type: none"> 3.3 伝導 4. 磁場を利用する実験技術 <ul style="list-style-type: none"> 4.1 磁場の発生 4.2 SQUIDとMEG 4.3 NMRとMRI 5. 電磁波を利用する実験技術術 <ul style="list-style-type: none"> 5.1 光源技術 5.2 ポンプ・プローブ分光 5.3 X線散乱 6. 粒子線を利用する実験技術 <ul style="list-style-type: none"> 6.1 電子線散乱 6.2 光電子分光 6.3 中性子散乱 6.4 μSR |
|--|---|

1.0.2 物性物理学特論 (大学院「表面物理学」共通) : 長谷川修司, 小森文夫、

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> 1. 概論 ナノサイエンス・ナノテクと表面 2. 表面構造 <ul style="list-style-type: none"> 2.1 表面超構造と相転移 2.2 回折法 2.3 顕微鏡法 2.4 動的過程 3. 表面電子状態 <ul style="list-style-type: none"> 3.1 表面電子状態 3.2 (逆)光電子分光法 3.3 トンネル分光法 3.4 光電子分光によるバンド分散・原子結合状態測定 3.5 時間分解測定 2. 走査トンネル顕微鏡 | <ul style="list-style-type: none"> 4.1 走査トンネル顕微鏡の原理 4.2 表面原子構造観察 4.3 局所電子状態測定 4.4 表面バンドの観測 4.5 表面電子定在波 5. 表面電子輸送 <ul style="list-style-type: none"> 5.1 表面空間電荷層の2次元電子系 5.2 表面電子バンドの2、1次元電子系 5.3 原子マニピュレーション 6. 表面超薄膜磁性 <ul style="list-style-type: none"> 6.1 磁気モーメントと相転移 6.2 強磁性超薄膜 6.3 表面ナノ強磁性体 |
|---|--|