

## 1.1 長谷川研究室

4月から修士課程1年生として芝崎剛豪、博士課程1年生として高瀬恵子が新しくメンバーに加わった。5月には中国科学院物理研究所から何珂が博士研究員として着任した。12月には5年間にわたって助手として活躍した松田巖が東京大学物性研究所助教授として転出した。その後任として1月から平原徹が助手に着任した。3月には、山崎詩郎と沖野泰之が博士課程を修了し、山崎は物性研究所博士研究員に、沖野は企業に就職した。また、久保敬祐は修士課程を修了して企業に就職した。博士研究員の中山泰生は千葉大学先進科学研究教育センター・助教として、何珂は物性研究所博士研究員として、保原麗は物性研究所技術補佐員として転出した。

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。おもにシリコン単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を明らかにし、3次元結晶のバルク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。そのために、表面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、表面近傍での電子励起、エレクトロマイグレーションなどの表面質量輸送現象など、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

#### ビスマス超薄膜の表面状態電気伝導

バルク Bi は半金属であり電気伝導度が低い、表面状態は非常に二次元金属になっていることが光電子分光法で明らかになったので、輸送特性においても表面状態が大きな寄与を果たしていることが予想される。そこで表面敏感なマイクロ4端子法電気伝導測定装置を用いて室温下で Bi 超薄膜の電気伝導度の膜厚依存を測定した。その結果、低膜厚 (6-10 BL) においては表面状態が確かに支配的であるが、膜厚増加とともにバルク (膜内部) の寄与が大きくなることが分かった。この方法で見積もられた表面状態電気伝導度は表面に酸素を暴露して表面状態を壊したときの電気伝導度減少分から推定される値とよい一致を示した。さらに詳細なフェルミ面とバンド構造が分かっているのでボルツマン方程式を用いて電気伝導度が計算でき、その解析からも測定された Bi の表面状態電気伝導度が妥当であることが確認できた。さらに、低膜厚で表面状態電気伝導度の温度依存性を調べたところ 300 K から 10 K まで金属的な振る舞いを示した。またその温度依存性のグラフから得られた電子格子相互作用定数の値は光電子分光のピーク幅の温度依存性から得られる電子格子相互作用定数の値と概ね一致することを明らかにした。

#### Ge ナノドット層の電気伝導

Si 結晶表面の2原子層程度を酸化させ、その上に Ge を蒸着すると、下地 Si 基板に対してエピタキシャルおよび非エピタキシャルに成長した数ナノメートルサイズの Ge ナノドットが高密度に形成され、昨年度までにそのエネルギー状態を光電子分光法で明らかにしてきた。今年度は、このナノドット層の電気伝導度を温度可変マイクロ4端子プローブ法によって測定し、そこでの電気伝導メカニズムを明らかにした。エピタキシャルドットの下には極薄 Si 酸化膜に直径 1 nm 程度の小孔が存在し、ドットと Si 基板とが「連結」しているため、閉じ込めポテンシャル障壁が低下し、その結果、熱励起によってキャリアのやり取りがこの小孔を通じて起こるため、エピタキシャルドット層の電気伝導は、非エピタキシャルドット層に比べてはるかに高いことが分かった。[東京大学物理工学教室との共同研究]

#### Si(111)-Au 表面超構造の電気伝導度とその温度依存性

1 原子層以下の Au 原子を Si(111) 表面に吸着させると吸着量や温度処理の違いによってさまざまな表面超構造が得られる。これらの Au 表面超構造の電気伝導度の温度依存性を室温から 10 K まで測定した。その結果、Au の蒸着量の増加による表面超構造の変化に応じて、電気伝導度の値は急速に上昇し、その温度依存性は冷却にしたがってホッピング伝導から弱局在型へ変化していくことがわかった。また表面超構造は一原子層の Au 膜より数桁高い電気伝導度を持つことがわかり、表面超構造特有の電子状態による電気伝導であるといえる。

#### Si(111)- $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 表面超構造の金属的伝導

$\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 表面超構造は光電子分光の測定から高い電子密度と大きなフェルミ波数を持つ表面状態を形成していることがわかっており、高い電気伝導度を持つことが予想されていた。そこで、この表面の電気伝導度の温度依存性の測定を行った結果、約  $700 \mu S/\square$  の高い電気伝導度と金属的な温度依存性が得られた。これにより、これまで4原子層程度が限界であった金属的な伝導を、特長的な電子状態を利用することで一原子層の系でも得ることに成功した。この表面上に極微量の過剰 In 原子を吸着させたりして乱れを導入すると電気伝導度は激減し絶縁体的な温度依存性となり、金属・絶縁体転移を起こすこともわかった。

## Na 吸着誘起による Si(111)7×7 表面の金属・絶縁体転移

Si(111)7×7 表面にアルカリ金属を吸着させた系は古くから盛んに研究されてきたが、最近、Na を室温で極微量吸着させることにより、この表面の金属的な表面状態 ( $s_1$ ) が抑制され、かつバンド湾曲の変化がないことが光電子分光測定により観測された。これを利用して、Na 吸着後と吸着前の表面電気伝導度の差を実測し、 $s_1$  状態のみによる電気伝導度を見積もることができる。その値は  $2 \sim 3 \mu S$  であり、Ioffe-Regel 条件との比較及び Mott のホッピングの理論から、 $s_1$  バンドによる伝導は、通常の金属的な伝導ではなく、Hopping 伝導で説明できることを提案した。

## Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Pb 表面上の Pb 超薄膜の電子輸送

厚さがフェルミ波長程度の金属超薄膜では量子井戸状態が形成される。中でも Si(111) 表面上に成長した Pb 超薄膜では様々な物理量が強い量子サイズ効果を受けることが報告されてきた。当研究室でも電気伝導や光電子分光の測定を行うことでその物性を調べてきた。今回は新たに、端子間隔が  $20 \mu m$  程度のマイクロ 4 端子を用いて 80 K で電気伝導度の膜厚依存性を測定したところ、低膜厚では半古典的な挙動から外れる振る舞いを見せた。これは過去に得た電気伝導度の振動が量子サイズ効果によることを裏付けるものであり、また光電子分光により得られた量子井戸状態のフェルミ面とバンド構造からポルツマン描像で計算した電気伝導度とも一致した。

### 1.1.2 表面ナノ構造

#### Bi 超薄膜の表面状態のスピンスピン分裂の直接観測

昨年度はシリコン表面上に形成された Bi 超薄膜の高分解能光電子分光測定を行い、その電子状態に関する予備的実験を行った。そして理論計算との比較で Bi(111) 表面状態バンドが強いスピンスピン軌道相互作用と反転対称性の破れのため Rashba 型のスピンスピン軌道分裂をしていることが示唆された。本年度は上記の事実を実験的に確認するために広島大学において Bi 超薄膜の電子状態のスピンスピン・角度分解光電子分光測定を行った。その結果、確かに表面状態バンドが波数空間でスピンスピン分裂していることを直接観測した。理論の予言通り、表面状態のスピンスピン構造は  $\Gamma$  点に対して反対称性を示し、スピンスピン偏極率としては最大で 0.5 という値が得られた。室温での測定のため分解能が十分とはいえず、理論計算との比較により予想された同一バンド内のスピンスピン偏極の変化を明確に捉えることはできなかったが、この点に関してはさらに低温で実験する予定である。[広島大学、物質材料研究機構、およびスペイン DIPC との共同研究]

## 表面自由電子系における磁性不純物の影響

Si(111)7×7 表面に Ag を加熱蒸着して得られる Si(111)  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面超構造の電子状態は、金属的な放物線バンドをもつ理想的な二次元自由電子系として知られている。この系に、微量の磁性不純物を導入した場合、RKKY 相互作用や近藤効果、希薄磁性などの観点から非常に興味深い。今年度は、その基本的な性質を調べるため、Mn をこの表面に低温で低被覆率蒸着し、その原子構造及び電子状態を、走査トンネル顕微鏡及び光電子分光測定により調べた。その結果、この表面上に Mn が単原子程度の状態で点在し、表面バンドが分裂してフェルミ波数が大きくなることが観測された。これは、Mn から電荷移動が起こり、かつ、Mn により誘起された不純物バンドとの混成のためと考えられる。

## 表面 Hume-Rothery 相

バルク固溶体の金属合金の中には、Cu-Zn 系で知られているように、電子数と原子数の割合によって結晶構造が決まるものがあり、それらは Hume-Rothery 型化合物 (電子化合物) と呼ばれている。形成にはフェルミ球とブリルアン・ゾーン境界の接触が重要であることが分かっているものの、その安定性は現在でも議論されており、最近では準結晶との密接な関係も指摘されている。今までの研究から、Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面に低温蒸着により一価の金属 (貴金属およびアルカリ金属) を  $0.1 \sim 0.2$  原子層追加蒸着することにより  $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$  周期の超構造になることが知られており、かつ、その表面群すべて単位胞あたり 3 個の電子を有することが知られていた。今回、Si(111) 清浄表面上に金原子を加熱蒸着し、その上に銀原子を追加蒸着し、その蒸着した原子の合計量が  $1.1 \sim 1.3$  原子層になるように、金原子と銀原子の割合を変えて表面群を作成し、RHEED, STM, マイクロ 4 端子電気伝導測定、および角度分解光電子分光で観測した。その結果、全ての表面において  $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$  周期が確認され、特に  $0.7 \text{ ML}$  の Ag と  $0.44 \text{ ML}$  の Au の混合によって形成された  $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$  相では、ユニットセルあたり 3 個の電子を有することが光電子分光の結果から得られた。これは、Au の代わりに Ag を追加蒸着したときでも同様の結果となり、すなわち、Hume-Rothery 則にのっとる表面群であると結論付けた。

## Si(111)-4×1-In 表面の金属・絶縁体転移における酸素原子吸着の影響

4×1-In 表面は  $m_1, m_2, m_3$  と呼ばれる 3 つの擬 1 次元金属的な表面バンドを持つ。そこに酸素や水素の吸着によって点欠陥を故意に導入し、角度分解光電子分光法を用いてこれら 3 つのバンドの変化を観測した。すると、酸素の吸着によりバンドが束縛エネルギーの深い方にシフトすることが観測され、それにつれてフェルミ波数の増加が見られた。今後

は 120 K 下の低温において見られるパイエルス絶縁相でのバンドギャップの大きさに対する気体吸着の効果を調べると共に、気体吸着による転移温度の推移をマイクロ 4 端子プローブ電気伝導測定を通して行う予定である。[韓国 Inha 大学との共同研究]

### 1.1.3 新しい装置・手法の開発

#### グリーン関数 STM 装置の開発

液体 He 温度までの低温で動作可能な独立駆動型 4 探針 STM 装置を数年かけて開発している。この装置では、STM/STS や温度可変マイクロ 4 端子電気伝導測定に加え、「多探針 STS」の利を活かして、輸送現象の本質的な特性を表す遅延グリーン関数を実空間でマッピングすることが可能である。グリーン関数測定のためには、2 本以上の探針を、試料とのトンネルコンタクトを維持した状態で電子のコヒーレント長以内まで近づけ、1 つの探針に与えられた電気刺激に対する応答を他の探針で検出する必要がある。今年度は高精度なトンネル電流検出のために測定系の改良を行い、SEM による吸収電流像を用いた多探針アプローチ法も確立した。また、実際に試料として擬 1 次元金属的表面として知られる Si(111) $4 \times 1$ -In を用い、正方配置のマイクロ 4 端子電気伝導測定を行った。その結果、表面超構造に固有の電気伝導度の異方性が実証され、その温度依存性が測定できた。そして個々の探針で原子分解能を持つ STM 像をとることに成功した。来年度は、室温から液体 He 温度までの温度範囲での各種表面や量子薄膜等の電気伝導測定を行うとともに、最終目的である実空間における遅延グリーン関数のイメージングを目指す。

#### 金属被覆カーボンナノチューブ STM 探針の開発とその応用

我々の研究室では多探針 STM の探針間隔を電子の平均自由行程程度まで近づけるという目的で、大阪大学工学部片山研究室と共同で金属被覆カーボンナノチューブ (CNT) 探針を開発してきた。昨年度は CNT 探針の作成手法を確立し、非常に高い生産性や強度・伝導度を実現することが出来たが、それらを用いた電気伝導測定結果については不十分であった。そこで、今年度は複数の CNT 探針を用いたナノメートルスケールの電気伝導測定を行った。独立駆動型 4 探針 STM 装置の内部でシリコン基板上にコバルトシリサイドナノワイヤを成長させて、それを試料として用いた。そのナノワイヤ上に PtIr 被覆 CNT 探針を接触させて、室温で 4 探針電気伝導測定を行うことに成功した。探針間隔と抵抗値の依存性は比例関係であり、一次元的な拡散伝導であった。最小探針間隔を約 30 nm 程度まで近づけたがこの関係は変わらなかった。室温でのコバルトシリサイド内部の電子の平均自由行程は 6 nm 程度であるため、妥当な結果である。コバルトシリサイドナノワイヤの測定を通じて、PtIr 被覆 CNT 探針を用いることで 30

nm 程度の領域まで再現性よく電気伝導測定が可能であることを示した。今後はより平均自由行程が長くなると考えられる半導体シリサイドナノワイヤの測定や CNT の測定、あるいは低温での測定を行う予定である。[大阪大学工学部での共同研究]

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。

- ・科研費 基盤研究 S 「グリーン関数 STM の開発とそれによるナノ電子輸送ダイナミクスの研究」(代表 長谷川修司)
- ・科研費 萌芽研究 「新しい表面電気伝導測定法の開発：電子輸送中のフェルミ面測定」(代表 松田巖)
- ・科学技術振興機構 先端計測分析技術・機器開発事業 「4 探針 STM の制御系および多機能ナノチューブ探針の開発」(代表 長谷川修司)
- ・科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 「超高密度・超微細ナノドット形成とナノ物性評価技術」(代表 市川昌和)
- ・日本学術振興会 二国間交流事業 (共同研究)(韓国) 「半導体表面上の金属ナノ構造と電気伝導」(日本側代表 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)

< 報文 >

(原著論文)

- [1] N. Nagamura, I. Matsuda, N. Miyata, T. Hirahara, S. Hasegawa, and T. Uchihashi: *Quasi-quantum-wire states in an epitaxial Ag film on a one-dimensional surface superstructure*, Physical Review Letters **96**, 256801 (Jun 2006).
- [2] T. Hirahara, T. Nagao, I. Matsuda, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, Yu. M. Koroteev, P. M. Echenique, M. Saito, and S. Hasegawa: *Role of Spin-Orbit Coupling and Hybridization Effects in the Electronic Structure of Ultrathin Bi Films*, Physical Review Letters **97**, 146803 (Oct 2006).
- [3] 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 (May 2007).
- [4] Y. Nakayama, I. Matsuda, S. Hasegawa, and M. Ichikawa: *Quantum regulation of Ge nanodot state by controlling barrier of the interface layer*, Applied Physics Letters **88**, 253102 (Jun 2006).
- [5] T. Hirahara, T. Nagao, I. Matsuda, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, Yu. M. Koroteev, and S. Hasegawa: *Quantum-well states in ultrathin Bi films from angle-resolved photoemission spectroscopy and first-principles calculations study*, Physical Review B **75**, 035422 (Jan 2007).

- [6] T. Hirahara, I. Matsuda, R. Hobara, S. Yoshimoto, and S. Hasegawa: *Direct measurement of the Hall effect in a free-electron-like surface state*, Physical Review B **73**, 235332 (Jun 2006).
- [7] C. Liu, I. Matsuda, M. D'angelo, and S. Hasegawa: *Self-Assembly of Two-Dimensional Nanoclusters: From Surface Molecules to Surface Superstructure*, Physical Review B **74**, 235420 (Dec 2006).
- [8] H. Konishi, Y. Murata, W. Wongwiriyan, M. Kishida, K. Tomita, K. Motoyoshi, S. Honda, and M. Katayama, S. Yoshimoto, K. Kubo, R. Hobara, I. Matsuda, S. Hasegawa, M. Yoshimura, J.-G. Lee and H. Mori: *High-yield synthesis of conductive carbon nanotube tips for multiprobe scanning tunneling microscope*, Review of Scientific Instruments **78**, 013703 (Jan 2007).
- [9] 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 (May 2007).
- [10] R. Hobara, S. Yoshimoto, S. Hasegawa, and K. Sakamoto: *Dynamic electrochemical-etching technique for tungsten tips suitable for multi-tip scanning tunneling microscopes*, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **5**, 94 (Apr 2007).
- (国内雑誌)
- [11] 松田巖、保原麗、長谷川修司: 単原子ステップを通過する表面自由電子, 日本物理学会誌 **62**, 91 (Feb 2007).
- [12] 中山泰生, 松田巖, 長谷川修司, 市川昌和: 極薄 Si 酸化物上 Ge ナノドットの界面構造と閉じ込めポテンシャル, 表面科学 **27**, 523 (Sep 2006).
- [13] 劉燦華、松田巖、保原麗、長谷川修司: 吸着原子誘起の局在状態と表面自由電子ガスとの相互作用, 表面科学 **27**, 702 (Dec 2006).
- [14] 長谷川修司: マルチ探針走査型トンネル顕微鏡の開発と表面電子輸送, 真空 **49**, 642 (Nov 2006).
- [15] 毛塚博史、江尻有郷、長谷川修司: 物理オリンピックへの道 -物理チャレンジ 2005 から第 37 回国際物理オリンピックへの派遣まで-, 応用物理 **76**, 71 (Jan 2007).
- [16] 長谷川修司: 物理チャレンジから物理オリンピックへ, 大学の物理教育 **12**, 50 (Jul 2006).
- [17] 長谷川修司: 国際物理オリンピック 2006, パリティ **21**, 52 (Dec 2006).
- (著書)
- [18] S. Hasegawa: *Multi-Probe Scanning Tunneling Microscopy* (Chap. II.7. in Vol. 1), in *Scanning Probe Microscopy -Electrical and Electromechanical Phenomena at the Nanoscale-*, Eds. S. Kalinin and A. Gruverman (Springer, Jan 2007).
- [19] S. Hasegawa: *Multiprobe SPM* (Chap. 12), and *Characterization of Semiconducting Materials* (Chap. 18), in *Roadmap of Scanning Probe Microscopy*, ed. S. Morita, (Springer, Nov 2006)
- [20] 小間篤、青野正和、石橋幸治、塚田捷、常行真司、長谷川修司、八木克道、吉信淳 (編): 表面物性工学ハンドブック (第 2 版) (丸善, Jan 2007).
- [21] 勝本信吾、長谷川修司 (分担執筆): ナノテクのための物理入門 (第 12 章 ナノスケール系の電子状態と電気伝導)、菅原康弘、粉川良平 編 (共立, Apr 2007) .
- (学位論文)
- [22] 山崎詩郎: 表面超構造および超薄膜での局在・非局在電子輸送 (博士論文).
- [23] 沖野泰之: *Electronic transport through atomic wires and nanowires self-assembled on silicon surfaces* (博士論文) .
- [24] 久保敬祐: 表面 HUME-ROTHERY 相の発見 (修士論文) .
- [25] 永村直佳: *Electronic and Transport Properties of Metal Quantum Films on Si Surfaces* (修士論文) .
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 招待講演
- [26] S. Hasegawa: *Electronic Transport at Monatomic Layers and Atomic Chains on Silicon Surfaces*, 中華民国物理学会年会 2007, 2007 年 1 月 24 日 (国立中央大学, 台湾) .
- [27] S. Hasegawa: *Growth and Properties of Metal Quantum Films on Silicon*, JSPS-KOSEF Asian Core Program -1st Japan-Korea Symposium on Surface Nanostructures- 2006 年 6 月 28 日 (宮城) .
- [28] S. Hasegawa: *Modes of Electronic Transport in Surface- and Nano-Structures*, International Workshop on Energy Dissipation at Surfaces 2006 年 9 月 24 日 (Schlos Eichholz, Germany) .
- [29] S. Hasegawa: *Electronic Transport at Monolayers and Atomic Chains on Silicon Surfaces The 13th International Conference on Solid Films and Surfaces*, 2006 年 11 月 9 日 (San Carlos de Bariloche, Argentina) .
- [30] S. Hasegawa: *Multi-probe SPM, Present and Future*, 14th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy, 2006 年 12 月 9 日 (伊豆熱川) .
- [31] I. Matsuda: *Two-dimensional Hume-Rothery Phase of a Metallic Monolayer on the fcc(111) Semiconductor Surface*, The 10th ISSP International Symposium on Nanoscience at Surfaces (ISSP-10), 2006 年 10 月 13 日 (物性研, 柏)
- [32] T. Hirahara: *Electronic and transport properties of low-dimensional systems on a semiconductor surface*, The 11th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation, 2007 年 3 月 9 日 (広島) .
- 一般講演

- [33] Y. Nakayama, I. Matsuda, S. Yamazaki, S. Hasegawa, and M. Ichikawa: *Electronic Structure and Electric Conductivity of Ge Nanodots with Controlling Barrier*, The 24th European Conference on Surface Science, 2006年9月6日 (Paris, France) .
- **2006 MRS Fall Meeting**, 2006年11月26-30日 (Boston, USA)
- [34] R. Hobarra, N. Nagamura, S. Yoshimoto, I. Matsuda and S. Hasegawa: *Development of a Low Temperature 4 Probe STM and Electrical Conductivity Measurement of One Dimensional Surface Super Structure.*
- [35] S. Yoshimoto, K. Kubo, H. Okino, R. Hobarra, I. Matsuda, Y. Murata, M. Kishida, H. Konishi, S. Honda, H. Okado, M. Katayama, and S. Hasegawa: *Four-Terminal Conductivity Measurement Using PtIr-Coated Carbon Nanotube STM Tips,*
- [36] N. Nagamura, I. Matsuda, T. Uchihashi, T. Hirahara, N. Miyata, C. Ohbuchi, and S. Hasegawa: *Quantum well states of ultra-thin Ag films prepared on one dimensional atomic array.*
- **The 10th ISSP International Symposium on Nanoscience at Surfaces (ISSP-10)** , 2006年10月11-13日 (物性研, 柏)
- [37] T. Hirahara, T. Nagao, I. Matsuda, G. Bihlmayer, Yu. M. Koroteev, E. V. Chulkov, P. M. Echenique, M. Saito, S. Hasegawa: *Role of Spin-Orbit Coupling and Hybridization Effects in the Electronic Structure of Ultrathin Bi Films.*
- [38] H. Okino, I. Matsuda, R. Hobarra, Z. He, P.A. Bennett, and S. Hasegawa: *Resistance of silicide nanowires epitaxially grown on Si(110).*
- [39] N. Miyata, I. Matsuda, K. Horikoshi, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *Oscillatory behavior of the charge transport through ultrathin Pb films,*
- [40] K. Takase, I. Matsuda, M. D'angelo, T. Hirahara, S. Hasegawa: *Metal-insulator transition of Si(111)7 × 7 by Na adsorption.*
- [41] S. Yamazaki, Y. Hosomura, I. Matsuda, R. Hobarra, and S. Hasegawa: *Metallic transport and metal-insulator transition on Si(111)- $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In surface superstructure.*
- [42] N.Nagamura, I.Matsuda, T.Uchihashi, N.Miyata, T.Hirahara, S.Hasegawa: *Quasi one dimensional quantized states of ultra-thin Ag films on one dimensional structure Si(111)4 × 1-In.*
- [43] Y. Nakayama, I. Matsuda, S. Yamazaki, S. Hasegawa, M. Ichikawa: *Electric conductivity of Ge nanodot array on an oxidized Si surface.*
- **The Seventh Russia-Japan Seminar on Semiconductor Surfaces (RJSSS-7)**, 2006年9月19-21日 (Vladivostok, Russia)
- [44] S. Hasegawa, N. Nagamura, I. Matsuda, T. Uchihashi, T. Hirahara, N. Miyata, C. Ohbuchi: *Anisotropic quantum well states in ultra-thin Ag films prepared on one- dimensional atomic array.*
- [45] I. Matsuda, K. Kubo, S. Yamazaki, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *Electronic structure and electron transport of the Hume-Rothery-type phase on a semiconductor surface.*
- [46] S. Yamazaki, I. Matsuda, S. Hasegawa: *Increase of surface electrical conduction by In deposition on Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Au surface.*
- **The 13th International Conference on Solid Films and Surfaces (ICSFS-13)** 2006年11月6-10日 (San Carlos de Bariloche, Patagonia, Argentina)
- [47] T. Hirahara, T. Nagao, I. Matsuda, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, Yu. M. Koroteev, P. M. Echenique, M. Sato, and S. Hasegawa: *Role of spin-orbit coupling and hybridization effects in the electronic structure of ultrathin Bi films.*
- [48] S. Yamazaki, Y. Hosomura, I. Matsuda, R. Hobarra, and S. Hasegawa: *Electrical resistances of In/Si(111) surfaces: metallic transport on Si(111)- $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In surface.*
- [49] H. Okino, I. Matsuda, S. Yamazaki, R. Hobarra, and S. Hasegawa: *Temperature dependence of surface-state conductivity of Si(553)-Au.*
- [50] K. Takase, I. Matsuda, R. Hobarra, and S. Hasegawa: *STM observation of Mn adatoms on Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag.*
- [51] K. Kubo, I. Matsuda, S. Yamazaki, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *Atomic/electronic structures and phase transition of the Hume-Rothery-type phase on a silicon surface.*
- (国内会議)
- 招待講演
- [52] 長谷川修司: 多探針顕微鏡で見るナノの世界, 第44回茅コンファレンス、2006年9月10日 (福島).
- [53] 長谷川修司: 国際物理オリンピックに初参加, 平成18年度 日本物理学会新潟支部 第35回例会、2006年12月2日 (長岡科技大, 新潟).
- [54] 保原麗, 長谷川修司: 低温型4探針STMの開発, 日本表面科学会 第54回表面科学研究会「最先端STM装置開発の現状と将来」, 2007年3月6日 (東京大学).
- 一般講演
- [55] 長谷川修司: Making non-magnetic surface states magnetic, 東北大学通研プロジェクト研究会「ナノ半導体物理の構築とその作製・計測技術の開拓」2006年11月17日 (仙台) .

- [56] 毛塚博史, 北原和夫, 二宮正夫, 有山正孝, 並木雅俊, 長谷川修司, 江尻有郷: 物理チャレンジ 2006 および第 37 回国際物理オリンピック開催報告, 応用物理学会 2007 年春季 第 54 回 学術講演会, 2007 年 3 月 29 日 (青山学院大).
- 第 44 回茅コンファレンス  
2006 年 9 月 9-10 日 (福島).
- [57] 平原徹, 長尾忠昭, 松田巖, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, Yu. M. Koroteev, P. M. Echenique, 齋藤峯雄, 長谷川修司: Bi 超薄膜の電子状態におけるスピン軌道相互作用と混成効果.
- [58] 山崎詩郎, 細村嘉一, 松田巖, 保原麗, 長谷川修司: 温度可変型  $\mu$  4 端子法による In 単原子金属層の電気伝導測定.
- [59] 高瀬恵子, 松田巖, Marie D'angelo, 平原徹, 長谷川修司: Na 吸着による Si(111)  $7 \times 7$  表面の金属絶縁体変化.
- 2006 年秋季 第 67 回応用物理学会学術講演会  
2006 年 8 月 29-9 月 1 日 (立命館大学).
- [60] 中山泰生, 松田 巖, 山崎詩郎, 長谷川修司, 市川昌和: 極薄 Si 酸化膜上 Ge ナノドットの閉じ込めポテンシャル高さに依存した電気伝導特性,
- [61] 本好謙司, 岸田 優, 小西博文, 村田祐也, 富田一裕, 木村雄彦, 岡本一将, 松井良憲, 田川精一, 吉本真也, 久保敬祐, 保原 麗, 松田 巖, 長谷川修司, 本多信一, 片山光浩: カーボンナノチューブ探針による高アスペクト比構造の STM 観察.
- [62] 村田祐也, 岸田 優, 小西博文, 本好謙司, 富田一裕, 木村雄彦, 吉本真也, 久保敬祐, 保原 麗, 松田 巖, 長谷川修司, 本多信一, 片山光浩: 金属被膜カーボンナノチューブ探針による CoSi<sub>2</sub> ナノワイヤの電気伝導計測.
- [63] 保原 麗, 永村直佳, 吉本真也, 松田 巖, 長谷川修司: 4 探針 STM による表面電気伝導の異方性測定とその温度依存性.
- [64] 毛塚博史, 北原和夫, 二宮正夫, 有山正孝, 並木雅俊, 長谷川修司: 物理チャレンジ 2006 と第 37 回国際物理オリンピック派遣状況.
- 日本物理学会 2007 春季大会  
2007 年 3 月 18-21 日 (鹿児島大学).
- [65] 高瀬恵子, 松田巖, 保原麗, 宮田伸弘, 長谷川修司: Mn 吸着した Si(111)  $3 \times 3$ -Ag 表面の STM および光電子分光測定.
- [66] 平原徹, 宮本幸治, 松田巖, 門野利治, 木村昭夫, 長尾忠昭, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, 喬山, 島田賢也, 生天目博文, 谷口雅樹, 長谷川修司: ビスマス表面状態のスピン角度分解光電子分光.
- [67] 宮田伸弘, 松田巖, 堀越孝太郎, 平原徹, 長谷川修司: Pb 超薄膜の電子輸送の振動現象
- [68] 中山泰生, 山崎詩郎, 吉本信也, 保原麗, 沖野泰之, 平原徹, 松田巖, 長谷川修司, 市川昌和: 極薄 Si 酸化膜上 Ge ナノドットの伝導機構の研究
- [69] 山崎詩郎, 松田巖, 平原徹, W. H. Choi, H. W. Yeom, 沖野泰之, 守川春雲, 長谷川修司: Si(111) 表面上の Au 膜の内殻光電子分光および電気伝導測定
- [70] 沖野泰之, 松田巖, 山崎詩郎, 保原麗, 長谷川修司: 金属蒸着したシリコン表面上の電気伝導度異方性.
- [71] 坂本克好, 河野勝泰, 名取晃子, 長谷川修司: In 被覆 Au 探針を用いたエレクトロマイグレーションの観察.
- [72] 角田治哉, 平原徹, 松田巖, 長尾忠昭, 長谷川修司, 上野信雄, 坂本一之: ペンタセン超薄膜の電子構造
- [73] 原田勲, 長谷川修司, 杉山忠男, 毛塚博史, 江尻有郷, 田中忠芳, 鈴木亨, 山田達之輔: 物理チャレンジ・オリンピック日本委員会報告 II. 国際物理オリンピック 2007 代表候補者教育訓練.
- [74] 江尻有郷, 原田勲, 長谷川修司, 杉山忠男, 毛塚博史, 田中忠芳, 鈴木亨, 山田達之輔: 物理チャレンジ・オリンピック日本委員会報告 III 国際物理オリンピック 2007 代表候補者訓練冬合宿・春合宿.
- 日本物理学会 2006 年秋季大会  
2006 年 9 月 22-25 日 (千葉大学).
- [75] 平原徹, 松田巖, 山崎詩郎, 宮田伸弘, 長尾忠昭 A, 長谷川修司: Si(111) 表面上 Bi(001) 超薄膜の表面状態電気伝導.
- [76] 山崎詩郎, 細村嘉一, 松田巖, 保原麗, 長谷川修司: In/Si(111)-  $7 \times 3$  表面超構造の金属伝導と絶縁体転移.
- [77] 高瀬恵子, 松田巖, Marie D'angelo, 平原徹, 長谷川修司: Si(111)  $7 \times 7$  表面上 Na 吸着に伴う金属 - 絶縁体転移とその電気伝導変化.
- [78] 江尻有郷, 長谷川修司, 鈴木亨, 毛塚博史, 杉山忠男, 田中忠芳, 北原和夫, 並木雅俊: 国際物理オリンピック (IPhO) と物理チャレンジ I - IPhO 選手派遣に至るまで - .
- [79] 鈴木亨, 長谷川修司, 杉山忠男, 江尻有郷, 毛塚博史, 山田達之輔, 北原和夫, 並木雅俊: 国際物理オリンピック (IPhO) と物理チャレンジ II. IPhO2006 日本選手の活躍日本物理学会 2006 年秋季大会, 2006 年 9 月 2 4 日、千葉大.
- 日本表面科学会 第 26 回表面科学講演大会  
2006 年 11 月 7-9 日 (大阪大学).
- [80] 宮田伸弘, 松田 巖, 堀越 孝太郎, 平原 徹, 長谷川 修司: Pb 超薄膜の電子輸送の振動現象.
- [81] 松田 巖, 小林 功佳, 平原 徹, 宮田 伸弘, 長谷川 修司: 表面 Hume-Rothery 相の研究.
- [82] 中山 泰生, 松田 巖, 山崎 詩郎, 長谷川 修司, 市川 昌和: 極薄 Si 酸化膜上の Ge ナノドットの電気伝導特性.

(セミナー)

- [83] 長谷川修司: 表面の物理: ミクロとマクロをつなぐ舞台, 東北大学大学院理学研究科物理教室談話会「物理科学の最前線」2006年6月23日(東北大学, 仙台).
- [84] 長谷川修司: 家庭教育から世界にはばたく, 宇都宮市P連Bブロック研修会講演会, 2006年9月22日(宇都宮).
- [85] S. Hasegawa: *Four-Tip Scanning Tunneling Microscope and Its Application to Transport Measurements at Nanometer Scale*, Forschungszentrum Juelich GmbH, 2006年9月29日(Juelich, Germany).
- [86] 長谷川修司: 表面・ナノ物理の現状と将来, 応用物理学会関西支部セミナー, 2006年11月24日(大阪大学, 吹田).

(講義等)

- [87] 長谷川修司: 表面科学、兵庫県立大学理学部, 集中講義 2006年8月16-18日.
- [88] 長谷川修司: 原子をみる、電子をみる、表面をみる -ナノワールドへの挑戦-, 成蹊大学 国際教養科目「現代を生きる -最先端科学の挑戦~医療からナノまで-」, 2006年12月8日、12月15日、12月22日.
- [89] 長谷川修司、松田巖、永村直佳(TA): 物理学実験 I (3年生) 電子回折、2006年度冬学期(本郷).
- [90] 長谷川修司: 固体物理学 II (学部4年生講義) 2006年度冬学期(本郷).
- [91] 長谷川修司: 物理学ゼミナール(学部3年生) 2006年度冬学期(本郷).

# 1 Hasegawa Group

**Research Subject: Experimental Surface/Nano Physics**

**Members: Shuji HASEGAWA, Iwao MATSUDA, and Toru HIRAHARA**

Topics in our research group are (1) electronic/mass transports, (2) atomic/electronic structures, (3) phase transitions, (4) electronic excitations, and (5) epitaxial growths of coherent atomic/molecular layers 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 diffractions, scanning electron microscopy, scanning tunneling micro/spectroscopy (STM/S), photoemission spectroscopy, and *in-situ* 4-point-probe conductivity measurements with four-tip STM and monolithic micro-4-point probes. Main results in this year are as follows.

**(1) Surface electronic transport:** Metal-insulator transitions, hopping conduction, and Hall effect in surface states. Quantitative evaluation of surface-state conductivity from Fermi surface mapping. Conductance of individual Cobalt silicide nanowires and metal-coated carbon nanotube tips.

**(2) Surface phases, ultra-thin films, and phase transitions:** Order-disorder phase transition and charge-density-wave transition on various metal-induced surface superstructures of Si and Ge. Quantum-well state in ultra-thin Pb, Bi, and Ag films. Ge nanodots layer.

**(3) Construction of new apparatuses:** Green's-function STM (low-temperature four-tip STM). Metal-coated carbon nanotube STM tips.

- [1] N. Nagamura, I. Matsuda, N. Miyata, T. Hirahara, S. Hasegawa, and T. Uchihashi: *Quasi-quantum-wire states in an epitaxial Ag film on a one-dimensional surface superstructure*, Physical Review Letters **96**, 256801 (Jun 2006).
- [2] T. Hirahara, T. Nagao, I. Matsuda, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, Yu. M. Koroteev, P. M. Echenique, M. Saito, and S. Hasegawa: *Role of Spin-Orbit Coupling and Hybridization Effects in the Electronic Structure of Ultrathin Bi Films*, Physical Review Letters **97**, 146803 (Oct 2006).
- [3] 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 (May 2007).
- [4] Y. Nakayama, I. Matsuda, S. Hasegawa, and M. Ichikawa: *Quantum regulation of Ge nanodot state by controlling barrier of the interface layer*, Applied Physics Letters **88**, 253102 (Jun 2006).
- [5] T. Hirahara, T. Nagao, I. Matsuda, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, Yu. M. Koroteev, and S. Hasegawa: *Quantum-well states in ultrathin Bi films from angle-resolved photoemission spectroscopy and first-principles calculations study*, Physical Review B **75**, 035422 (Jan 2007).
- [6] T. Hirahara, I. Matsuda, R. Hobara, S. Yoshimoto, and S. Hasegawa: *Direct measurement of the Hall effect in a free-electron-like surface state*, Physical Review B **73**, 235332 (Jun 2006).
- [7] C. Liu, I. Matsuda, M. D'angelo, and S. Hasegawa: *Self-Assembly of Two-Dimensional Nanoclusters: From Surface Molecules to Surface Superstructure*, Physical Review B **74**, 235420 (Dec 2006).
- [8] H. Konishi, Y. Murata, W. Wongwiriyan, M. Kishida, K. Tomita, K. Motoyoshi, S. Honda, and M. Katayama, S. Yoshimoto, K. Kubo, R. Hobara, I. Matsuda, S. Hasegawa, M. Yoshimura, J.-G. Lee and H. Mori: *High-yield synthesis of conductive carbon nanotube tips for multiprobe scanning tunneling microscope*, Review of Scientific Instruments **78**, 013703 (Jan 2007).
- [9] 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 (May 2007).
- [10] R. Hobara, S. Yoshimoto, S. Hasegawa, and K. Sakamoto: *Dynamic electrochemical-etching technique for tungsten tips suitable for multi-tip scanning tunneling microscopes*, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **5**, 94 (Apr 2007).



## 第I部

# 2006年度 物理学教室全般に関する報告



# 第1章 2006年度に開講された学部講義概要

## 1.0.1 固体物理 II : 長谷川修司

### 1. 格子振動と熱的性質

1.1 格子振動; 単一原子 1 次元格子の波動、二種原子の 1 次元格子、

1.2 格子振動の量子化

1.3 フォノン分光

1.4 比熱; 実験事実、Dulong-Petit の法則、格子比熱、電子比熱、

### 2. 電子輸送現象

2.1 Ohm 則と電気伝導度

2.2 結晶内での電子の運動 (I)-電子波の波束-

2.3 結晶内での電子の運動 (II)-バンド内での電子の運動-

2.4 電子と正孔

2.5 Boltzmann 方程式

2.6 電気伝導度 - Boltzmann 描像 -

2.7 不純物散乱とフォノン散乱

2.8 熱電効果

### 3. 半導体

3.1 半導体とは

3.2 真性半導体中のキャリア濃度

3.3 半導体のドーピング

3.4 ドープされた半導体中のキャリア濃度

3.5 半導体中の伝導度

3.6 pn 接合とトランジスタ; 熱平衡における pn 接合、バイアスされた pn 接合、

3.7 ヘテロ接合と 2 次元電子ガス、量子井戸

### 4. 超伝導

4.1 超伝導の歴史

4.2 完全導体と完全反磁性 (マイスナー効果)

4.3 London 方程式

4.4 その他の実験事実; エネルギー・ギャップ、比熱、同位体効果、

4.5 超伝導の機構 - Fröhlich の理論 -

4.6 Cooper 対の形成

4.7 B C S 理論

4.8 超伝導電流と臨界電流

4.9 B C S 基底状態とマイスナー効果

4.10 磁束の量子化

### 5. 磁性

5.1 原子・イオンの常磁性・反磁性 (気体の磁性)

5.2 自由電子ガスの磁性

5.3 自由電子間の交換相互作用

5.4 強磁性体のバンドモデル

5.5 バンド強磁性体の自発磁化の温度依存性

5.6 局在電子間の強磁性結合