

1.1 長谷川研究室

4月から修士課程1年生として北岡佑介と新沼優人が新しくメンバーに加わった。3月には、吉本真也が博士課程を修了して物性研究所助教として就職し、芝崎剛豪は修士課程修了後、企業に就職した。

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、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

Si表面上のモット絶縁体相での表面状態伝導

錫(Sn)をSi(111)表面上に1/3原子層蒸着してできる $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 表面超構造は、第一原理計算によるとモット絶縁体であり、実験的にもその兆候が報告されている。他方、低温でも金属のままであるという報告もあり、その相転移の有無が盛んに議論されている。そこで本研究では、マイクロ4端子プローブ法によって、この表面の表面状態電気伝導を測定した。その結果、室温から15 Kまで一貫して半導体的な温度依存性を示した。走査トンネル分光法の結果によると室温から70 Kまではフェルミ準位での状態密度が徐々に減少していき、70 Kで完全にギャップが開くので、電気伝導の結果は確かにモット絶縁相の描像に矛盾しない。電気伝導から得られたエネルギーギャップの大きさは5 meVと非常に小さかった。今後この表面にキャリアドーピングをしてバンド構造や電気伝導特性がどう変化するか調べる。

Si(557)-Pb表面の電気伝導

微傾斜面のSi(557)表面上にPb原子を2原子層程度蒸着して640 Kで加熱すると、原子鎖の列が形成される。この表面は78 Kで相転移を起こし、原子鎖平行方向の電気伝導が半導体的から金属的な振る舞いに変化し、かつ異方性が大幅に増加するという興味深い報告がなされているが、それを否定する意見もあり、議論が分かれている。この系について表面敏感な手法であるマイクロ4端子プローブ法を用いて室温から10 Kまで測定を行ったところ、120 K付近で金属絶縁体転移が見られるとともに、70 K付近でも電気伝導の変化が見られた。70 K付近の電気伝導の変化が前述の相転移だと考えられるが詳細は現在検討中である。今後は温度可変型4端子STM装置を用いて、Pb原子鎖に沿う方向の伝導度と鎖間

伝導度を別々に測定するとともに、STMや光電子分光などの結果と合わせて相転移の機構を解明していく。(韓国延世大学との共同研究)

カーボンナノチューブ探針による電気伝導測定

Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag表面に対して金属被覆カーボンナノチューブ探針を用いて、探針間隔を200 nmから100 μm の範囲で変化させた直線4探針法によって電気抵抗を測定した。その結果、探針間隔を縮小すると基板結晶の抵抗値が増大する3次元的な電気伝導から、抵抗値が探針間隔に依存しない2次元伝導に遷移する領域が現れることが分かった。この領域では表面状態と空間電荷層の電気伝導度のみ測定することが可能である。また、10 μm 以下程度の探針間隔では走査電子顕微鏡の電子線照射による損傷のため抵抗値が変化することもわかった。一方、擬1次元金属的なSi(111)-4 \times 1-In表面の電子線照射による損傷の影響を調べた結果、電気伝導度はIn鎖方向のみが減少し、鎖に垂直方向の電気伝導度は全く変化しなかった。これは、電子線損傷によって減少するのは表面状態の電気伝導度のみであり、空間電荷層は変化しないためである。電子線照射によって残留水素の解離吸着が起こることが原因と考えられる。

1.1.2 表面ナノ構造

Bi超薄膜のスピン角度分解光電子分光測定

昨年度に引き続いてSi(111)表面上のBi超薄膜に関して、広島大学放射光科学研究センターにおいてスピン角度分解光電子分光測定を行った。その結果、従来からRashba効果によりスピン分裂していると言われていた表面状態バンドのスピン偏極に関して明確な波数依存性が存在することが明らかになった。これは第一原理計算との比較の結果、バルクバンドギャップ中では確かにRashba効果が効いているが、バルク射影と表面状態バンドが交わる領域においてはパリティの影響によって新たな分裂(偶奇分裂)が起きていると解釈できた。このように二つの性質の違う分裂が滑らかに接合しているという新たな物理現象を実験的に捉えることに成功した。(広島大学、物材機構、ドイツユーリヒ研、スペインDIPCとの共同研究)

Ag超薄膜の表面合金化

Si(111)表面上に原子レベルで平坦な表面をもつAg超薄膜が成長することは従来から知られていたが、本年度はこのように作成した超薄膜の表面にさらにBi、Pb、Sbなどの元素を吸着させて表面を合金化させることにより、表面電子バンドにどのような変化が生じるか調べた。その結果、膜厚方向への閉じ込め効果によって生じる量子井戸状態のエネルギー

準位がフェルミ準位に近づく方向に系統的に変化することが分かった。さらにこれらの量子井戸状態が膜全体ではなく表面にのみ存在する周期性 ($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$) に従うことが明らかになった。またこの合金化により表面状態バンドが Rashba 効果で大きくスピン分裂することが分かっていたが、表面状態と量子井戸状態との相互作用の結果、量子井戸状態もスピン偏極を示す可能性が示された。今後、スピン角度分解光電子分光法で、この予想を確かめる予定である。(東大物性研、ドイツユーリヒ研との共同研究)

Bi 超薄膜上の単原子層ペンタセン膜の電子状態

Si(111) 表面上に作成した Bi 超薄膜の上に、結晶性の良いペンタセン (Pn) が単原子層から層状に成長することが報告されたが、今回、角度分解光電子分光法により、この電子状態を調べた。その結果、従来から言われていたように基板 Bi と Pn 分子層の相互作用が非常に小さいこと、また有機薄膜としては非常に大きな 300 meV 程度のバンド分散を HOMO バンドが示すことが分かった。これは理論計算から期待されるよりも隣接する Pn 分子同士のバンドの重なりが大きいことを示しており、Pn 薄膜においてバンドに由来する移動度の高い電子輸送が起きていることが明らかになった。今後は基板の構造を変えて Pn と基板の相互作用がバンド分散にどう影響するか調べる予定である。(千葉大学、物材機構との共同研究)

擬 1 次元金属表面での相転移と欠陥の影響

Si(111) 表面上に In 原子を 1 原子層吸着させて形成される擬一次元金属構造の 4×1 -In 表面は 120 K 程度で金属絶縁体転移 (パイエルズ転位) を起こすことが知られている。今回、この表面に意図的に欠陥を導入したとき、この相転移がどのような影響を受けるのか調べた。水素と酸素の吸着によってできる点欠陥を作成し、その量も系統的に変えて実験を行った。その結果、欠陥導入とともに相転移温度が上昇することが観測された。また欠陥の量が多すぎるとそもそも相転移自体が起きず、室温から絶縁体的な温度依存性を示すことが分かった。これは欠陥によって電荷密度波のゆらぎがピン止めされる結果、転移温度が上昇したものと解釈できる。今後、電気伝導度のみ転移温度と電子回折のみ相転移温度の関係性を明らかにする予定である。(韓国 Inha 大学との共同研究)

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 1 原子層の Ag を加熱蒸着して得られる Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面は、自由電子的な放物線バンドをもつ金属的で理想的な二次元自由電子系として知られている。前年度、磁性不純物 Mn を導入した場合、この表面上に Mn が単原子と

して点在し、放物線的な表面バンドが分裂し、フェルミ波数が大きくなることが観測された。今年度は、この表面の磁性について知見を得るため、高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所放射光科学研究施設において、150 K、0.2 T で磁気円二色性の測定が可能な装置を立ち上げた。現在は予備測定の段階である。また、Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面と同様に理想的な金属的二次元自由電子系として知られる Si(111)- $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 表面に Co を 0.05 原子層ほど導入し、電気抵抗の温度依存性を測定した。その結果、15 K 付近で電気抵抗の急激な増大を観測した。これは近藤効果と関連する現象であると考えられ、今後 Co の導入量依存性など系統的な測定を行い、物理機構について明らかにする予定である。

In / Si(111) 金属表面超構造への Gd 吸着

半導体表面上には金属的な表面超構造が形成され、バルクとは独立した電子状態を持つことが知られている。しかし、それら表面状態と磁性不純物との相互作用についての研究はほとんどない。そこで、In を Si(111) 表面に蒸着して得られる擬一次元金属である 4×1 、自由電子的二次元金属である $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ 構造に Gd を蒸着して RHEED・STM 観察、マクロ 4 端子電気伝導測定を行った。その結果、 4×1 -In 表面の場合は Gd 蒸着とともに電気伝導度が下がり、RHEED において新しい超構造スポットが観測された。それに対して、 $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 表面の場合は、 $\sqrt{7} \times \sqrt{7}$ に相転移し、これに対応して電気伝導度の増大が観測された。これは Gd が自由電子的なバンドに電子を供給していることを示していると思われる。今後は現在立ち上げ中である超高真空極低温表面磁気光学カー効果測定装置を用い、磁性的な性質及び、スピン角度分解光電子分光法を用いて Gd 蒸着前後のバンドの変化について調べる予定である。

1.1.3 新しい装置・手法の開発

超高真空極低温表面磁気光学カー効果測定装置の開発

二次元自由電子的な表面状態に磁性不純物をドーピングしたときの磁気的性質を調べるために上記装置の開発を行った。この装置は超高真空中で表面の清浄化と金属蒸着によるサンプル作成が可能で、さらにその場で 20 K まで冷却、0.2 T の磁場をサンプル面内、面直両方に印加した状態で、HeNe レーザー光を照射してカー効果を測定できる装置である。本年度は冷却テスト、到達真空度テストを行い、その後、真空中で鉄膜を蒸着し、実際にカー効果を測定することに成功し、所期性能を達成した。引き続き表面二次元自由電子系の磁性不純物効果を調べ、「希薄磁性表面状態」の実現を目指す。

グリーン関数 STM 装置の改良

約 6 K までの極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 STM」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。本年度は主に、Si(111)-4×1-In 表面上に成長させた Ag 薄膜の電気伝導測定に特化してセットアップを進めてきた。基板表面も Ag 薄膜も擬 1 次元金属的な電子状態を持つことが知られており、電気伝導の温度依存性や探針間隔依存性、異方性、膜厚依存性を測ることで、フェルミ面のトポロジカル相転移、表面パイエルス転移、局在現象等の解明に役立つことが期待される。まず、RHEED でその場観察しながら幅広い温度領域 (45 K-1500 K) で試料が作成できるように試料準備室の改良を行った。RHEED の強度振動を測れる仕様にして、Si(111)-4×1-In 上に酸素と水素を曝露した際の超構造相転移温度の変化を観測した。最近予備実験として、界面超構造として利用する Si(111)-4×1-In の室温測定で異方性を確認することができた。来年度は、カーボンナノチューブを用いた機能性探針を導入して、様々な表面超構造、その上に作成した量子薄膜、ナノワイヤー等の電気伝導度を μm から nm オーダーの 4 端子法で測定し、遅延グリーン関数の実空間マッピングも試みる予定である。

磁気抵抗測定装置の開発

超高真空、極低温 (液体 He 温度)、強磁場 (~ 7 T) 環境下で動作するマルチプローブシステムの開発を行っている。プローブユニットには STM 探針やマイクロ 4 端子プローブなど様々なプローブを自由に着脱することができ、ピエゾ駆動により試料表面にアプローチし、STM 測定や表面敏感な電気伝導測定を可能にする。これにより、これまでほとんど研究されてこなかった固体表面の金属低次元系の電子輸送特性の磁場依存性を調べることが可能となる。現在、8 K で超伝導マグネットに磁場を印加した状態で、プローブをピエゾ駆動させて試料にアプローチできることを確認できた。

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 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 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] 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 (Oct 2007).
- [2] H. Kakuta, T. Hirahara, I. Matsuda, T. Nagao, S. Hasegawa, N. Ueno, and K. Sakamoto: *Electronic structures of the highest occupied molecular orbital bands of a pentacene ultrathin film*, Physical Review Letters **98**, 247601 (Jun 2007).
- [3] 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 (Sep 2007).
- [4] 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 (Nov 2007).
- [5] 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 (Jul 2007).
- [6] 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 (Oct 2007).
- [7] H. Okino, I. Matsuda, R. Hobara, S. Hasegawa, Y. H. Kim and G. S. Lee: *Influence of Defects on Transport in Quasi-One-Dimensional Metallic Atomic-Chain Arrays on Silicon Surfaces*, Physical Review B **76**, 195418 (Nov 2007).
- [8] H. Morikawa, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *Absence of Charge-Density Waves on the Dense Pb/Ge(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ Surface*, Physical Review B, in press (2008).
- [9] Y. Nakayama, K. Takase, T. Hirahara, S. Hasegawa, T. Okuda, A. Harasawa, I. Matsuda, Y. Nakamura, and M. Ichikawa: *Quantum-Size Effect in Uniform Ge-Sn Alloy Nanodots Observed by Photoemission Spectroscopy*, Japanese Journal of Applied Physics **46**, L1176 (Nov 2007).

(総説)

- [10] I. Matsuda and S. Hasegawa: *Fermiology and transport in metallic monatomic layers on semiconductor surfaces*, Journal of Physics: Condensed Matter **19**, 355007 (Aug 2007).
- [11] S. Hasegawa: *Surface One-Dimensional Structures*, Chinese Journal of Physics **45**, 385 (Aug 2007).

(国内雑誌)

- [12] 劉燦華, 松田巖, 長谷川修司: *Si(111)- $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Ag* 表面上における原子レベルでの金クラスターの自己組織化, *PF News* **25** (No. 3), 17 (Nov 2007).
- [13] 長谷川修司, 吉本真也, 保原麗: 4 探針 STM で何が
できるのか, *固体物理* **42** (No. 11), 757 (Nov 2007).

(その他)

- [14] S. Hasegawa, M. Namiki, and K. Kitahara: *Japan Has Joined the IPhO*, *Bulletin of The Association of Asia Pacific Physical Societies* **17** (No. 3), 23 (Jun 2007).
- [15] 長谷川修司: 「高校生よ、世界に挑もう」-国際物理オリンピックを例にして-, 下野教育、特集「大志に生きる」, No. 726, p. 17 (Nov 2007).
- [16] 長谷川修司: *e-Journal* の現状と将来 -表面科学講演大会特別講演より-, 表面科学, 印刷中 (Jul 2008).
- [17] 長谷川修司: 全国物理コンテスト「物理チャレンジ」~出でよ、物理のハンカチ王子~, 教育フォーラム 中学校数学理科保健体育、2008 春号 p. 22 (大日本図書, Apr 2008).

(学位論文)

- [18] 平原徹: *Role of Spin-Orbit Interaction and Surface States in Quantum Bismuth Films* (博士論文).
- [19] 吉本真也: 金属被覆カーボンナノチューブ探針の開発およびそれによるナノメートルスケール電気伝導計測 (博士論文).
- [20] 芝崎剛豪: 表面擬一次元金属系の相転移と欠陥 (修士論文).

< 学術講演 >

(国際会議)

招待講演

- [21] S. Hasegawa: *Transport at Atomic Wires on Silicon Surfaces*, German Physical Society Spring Meeting, 2008 年 2 月 26 日 (Tech. Univ. Berlin, Germany).
- [22] S. Hasegawa: *Making non-magnetic surfaces ferromagnetic*, Korean Vacuum Society, 2008 年 2 月 15 日 (Dankook University, Korea).
- [23] 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).
- [24] 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).

- [25] 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).

一般講演

- [26] N. Nagamura, N. Nagamura and S. Hasegawa: *Quasi-One-dimensional Metal Film Prepared on One-dimensional Surface Superstructure ~ARPES and 4-tip STM measurement~*, JSPS 1st HOPE Meeting on Nanoscience and Nanotechnology, 2008 年 2 月 26 日 (筑波)
- [27] S. Hasegawa: *Making non-magnetic surfaces ferromagnetic*, Symposium on Surface and Nano Science 2008, 2008 年 1 月 25 日 (安比).
- [28] N. Nagamura, I. Matsuda, T. Uchihashi, N. Miyata, T. Hirahara, K. Takase, Y. Kitaoka, Y. Niinuma and S. Hasegawa: *Electric and Transport Properties of Quasi-one-dimensional Quantized States of Ultra-thin Ag Films on Si(111)4x1-In*, JSPS-NSFC-KOSEF A3 Foresight Program Sub-10nm Wires; New Physics and Chemistry, 2007 年 11 月 16 日 (草津).
- [29] 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).
- [30] 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).
- [31] 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).
- [32] 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).

- [33] T. Shibusaki, H. Okino, Y. H. Kim, G. S. Lee, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *Influence of impurities on electrical properties of atomic wire self-assembled on silicon surface*, The 9th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-9), 2007年11月12日(東京大).
- [34] S. Yamazaki, Y. Hosomura, I. Matsuda, R. Hobar, and S. Hasegawa, *Metallic Transport on In/Si(111) Atomic Layer*, The 9th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-9), 2007年11月12日(東京大).
- [35] T. Hirahara and S. Hasegawa, *Spin-split surface bands of Bi quantum films*, The First Yonsei-Todai Joint Workshop on Physics, 2007年8月31日(東京大).
- [36] 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).
- [37] 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, *Momentum-dependent spin-polarized surface states in ultrathin Bi films*, 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).
- [38] T. Hirahara, *Spin-orbit coupling effects in quantum Bi films*, 3rd Japan-Korea Symposium on Surface Nanostructures, 2007年6月20日(松島).
- (国内会議)
- 招待講演
- [39] 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).
- [40] 長谷川修司: 得意技で世界へはばたけ -物理オリンピックを例にして-, つくば市立竹園東中学校教育講演会, 2007年11月8日(つくば).
- [41] 長谷川修司: e-Journal の現状と将来, 日本表面科学会第 27 回講演大会, 2007年11月2日(東大生産研, 駒場).
- [42] 長谷川修司: 得意技で世界へはばたけ -物理オリンピックを例にして-, 宇都宮市立瑞穂野中学校創立 60 周年記念講演会, 2007年9月15日(宇都宮).
- [43] 長谷川修司: 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, 2007 分析展 科学技術振興機構シンポジウム, 2007年8月30日(幕張メッセ).
- 一般講演
- [44] 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).
- [45] 何珂, 平原徹, 奥田太一, 長谷川修司, 柿崎明人, 松田巖: *Dependence of the hybridization gaps of Bi/Ag- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ grown on Ag (111) quantum-well films on the film thickness and quantum number*, 日本物理学会第 63 回年次大会, 2008年3月24日(近畿大学).
- [46] 芝崎剛豪, 沖野泰之, 山崎詩郎, Y. K. Kim, 永村直佳, 平原徹, 松田巖, G. S. Lee, 長谷川修司: Si(111)4 \times 1-In 表面の相転移と欠陥の効果, 日本物理学会第 63 回年次大会, 2008年3月24日(近畿大学).
- [47] 宮田伸弘, 成田尚司, 平原徹, 長谷川修司, 松田巖: 超高真空・極低温・強磁場印加型独立駆動マルチプローブシステムの開発, 物性研究所短期研究会, 2007年11月21日(物性研究所, 柏).
- [48] 長谷川修司: 真のナノメートル・スケールでの電気伝導計測, 平成 19 年度東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会「ナノスケール半導体の物理とそのナノテクノロジーへの展開」, 2007年10月26日(松島).
- [49] 原田勲, 長谷川修司, 杉山忠男, 田中忠芳, 鈴木亨, 北原和夫: 第 38 回国際物理オリンピック (IPhO) 報告, 日本物理学会第 62 回年次大会, 2007年9月21日(北海道大).
- [50] 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).
- [51] 宮田伸弘, 成田尚司, 平原徹, 長谷川修司, 松田巖: 極低温・強磁場印加型独立駆動マルチプローブシステムの開発, 日本物理学会第 62 回年次大会, 2007年9月22日(北海道大学).
- [52] 平原徹, 小森田拓, 佐藤礼奈, 長谷川修司: Pb 吸着 Ag 超薄膜の量子井戸状態の研究, 日本物理学会第 62 回年次大会, 2007年9月24日(北海道大学).
- [53] 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).
- [54] 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).
- [55] 吉本真也, 北岡佑介, 保原麗, 平原徹, 長谷川修司: PtIr 被覆カーボンナノチューブ探針を用いた Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面の電気伝導測定, 日本物理学会第 62 回年次大会, 2007年9月24日(北海道大学).

(セミナー)

- [56] 平原徹, *Role of Spin-Orbit Interaction and Surface States in Quantum Bismuth Films*, 東大物性研ナノスケール部門セミナー, 2007年12月20日(東大物性研).
- [57] 長谷川修司: 表面ナノ構造の電子状態、電子輸送、スピン状態奈良先端大学院大学物質創成科学研究科講演会, 2007年11月19日(奈良先端大).
- [58] T. Hirahara: *Spin-orbit coupling effects in quantum Bi films*, Yonsei University, 2007年6月8日(Seoul, Korea).
- [59] 長谷川修司: Making non-magnetic surfaces magnetic, 東京大学物理教室物性セミナー 2007年4月16日(東京大).

(講義等)

- [60] 長谷川修司: 奈良先端大学院大学集中講義「物質科学特論 I」 2007年11月19-21日.
- [61] 長谷川修司: 兵庫県立大学理学部集中講義「表面科学」2007年9月18-20日.
- [62] 長谷川修司: 横浜市立大学基盤科学序説「ナノサイエンス・ナノテクノロジー 半導体表面ナノ構造とデバイス」, 2007年10月22日.
- [63] 長谷川修司、平原徹、北岡佑介(TA): 物理学実験 I (3年生) 電子回折、2007年度冬学期(本郷).
- [64] 長谷川修司: 現代物理実験学 I (学部3年生講義) 2007年度夏学期(本郷).
- [65] 長谷川修司: 固体物理学 II (学部4年生講義) 2007年度冬学期(本郷).
- [66] 長谷川修司: 物理学ゼミナール(学部3年生) 2007年度冬学期(本郷).
- [67] 長谷川修司: 現代物理学入門「表面・ナノスケールの物理」, 2007年4月16日(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, 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 diffraction, scanning electron microscopy, scanning tunneling microscopy/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 a Mott insulator 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, charge-density-wave transition, Mott 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. Rashba effect in surface state and hybridization with quantum-well states.

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

- [1] 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 (Oct 2007).
- [2] H. Kakuta, T. Hirahara, I. Matsuda, T. Nagao, S. Hasegawa, N. Ueno, and K. Sakamoto: *Electronic structures of the highest occupied molecular orbital bands of a pentacene ultrathin film*, Physical Review Letters **98**, 247601 (Jun 2007).
- [3] 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 (Sep 2007).
- [4] 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 (Nov 2007).
- [5] 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 (Jul 2007).
- [6] 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 (Oct 2007).
- [7] H. Okino, I. Matsuda, R. Hobara, S. Hasegawa, Y. H. Kim and G. S. Lee: *Influence of Defects on Transport in Quasi-One-Dimensional Metallic Atomic-Chain Arrays on Silicon Surfaces*, Physical Review B **76**, 195418 (Nov 2007).
- [8] H. Morikawa, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *Absence of Charge-Density Waves on the Dense Pb/Ge(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ Surface*, Physical Review B, in press (2008).
- [9] Y. Nakayama, K. Takase, T. Hirahara, S. Hasegawa, T. Okuda, A. Harasawa, I. Matsuda, Y. Nakamura, and M. Ichikawa: *Quantum-Size Effect in Uniform Ge-Sn Alloy Nanodots Observed by Photoemission Spectroscopy*, Japanese Journal of Applied Physics **46**, L1176 (Nov 2007).
- [10] I. Matsuda and S. Hasegawa: *Fermiology and transport in metallic monatomic layers on semiconductor surfaces*, Journal of Physics: Condensed Matter **19**, 355007 (Aug 2007).
- [11] S. Hasegawa: *Surface One-Dimensional Structures*, Chinese Journal of Physics **45**, 385 (Aug 2007).
- [12] S. Hasegawa, M. Namiki, and K. Kitahara: *Japan Has Joined the IPhO*, Bulletin of The Association of Asia Pacific Physical Societies **17** (No. 3), 23 (Jun 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 物性物理学特論 (大学院「表面物理学」共通) : 常行真司、小森文夫、長谷川修司

- | | |
|--------------------------|----------------------------|
| 1. 概論 「表面」であることの意味 | 6.4 動的過程 |
| 2. 表面電子状態 | 7. 表面電子状態の解析 |
| 3. 密度汎関数理論 | 7.1 表面電子状態 |
| 4. 第一原理分子動力学法と表面構造研究への応用 | 7.2 (逆)光電子分光法 |
| 5. 走査プローブ顕微鏡 | 7.3 トンネル分光法 |
| 5.1 走査トンネル顕微鏡の原理 | 7.4 光電子分光によるバンド分散・原子結合状態測定 |
| 5.2 表面原子構造観察 | 7.5 時間分解測定 |
| 5.3 局所電子状態測定 | 8. 表面電子輸送 |
| 5.4 表面バンドの観測 | 8.1 表面空間電荷層の2次元電子系 |
| 5.5 表面電子定在波 | 8.2 表面電子バンドの2、1次元電子系 |
| 6. 表面超構造と原子配列の解析 | 8.3 原子マニピュレーション |
| 6.1 表面超構造と相転移 | 9. 表面超薄膜磁性 |
| 6.2 回折法 | 9.1 磁気モーメントと相転移 |
| 6.3 顕微鏡法 | 9.2 強磁性超薄膜 |
| | 9.3 表面ナノ強磁性体 |

1.0.2 現代実験物理学 I : 長谷川修司, 溝川貴司

- | | |
|-------------------------------|-----------------|
| 1. X線 | 3.3 伝導 |
| 1.1 X線の発見、 | 4. 磁場を利用する実験技術 |
| 1.2 特性X線と連続X線、Moseleyの法則、 | 4.1 磁場の発生 |
| 1.3 Thomson散乱とCompton散乱、 | 4.2 SQUIDとMEG |
| 1.4 X線回折 | 4.3 NMRとMRI |
| 1.5 X線研究の拡がり; CT, リソグラフィ、宇宙X線 | 5. 電磁波を利用する実験技術 |
| 2. 電子 | 5.1 光源技術 |
| 2.1 粒子性と波動性 | 5.2 ポンプ・プローブ分光 |
| 2.2 電子回折と顕微鏡 | 5.3 X線散乱 |
| 2.3 Aharonov-Bohm効果 | 6. 粒子線を利用する実験技術 |
| 2.4 トンネル効果とSTM | 6.1 電子線散乱 |
| 3. 多様な実験手法 | 6.2 光電子分光 |
| 3.1 顕微鏡 | 6.3 中性子散乱 |
| 3.2 分光法 | 6.4 μ SR |