

平成 22 年 6 月 11 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19740184

研究課題名(和文) 強い電子相関をもつ表面超構造の電子状態の研究

研究課題名(英文) Electronic structures of surface superstructures
having strong electron correlation

研究代表者

武田 さくら (TAKEDA SAKURA)

奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・助教

研究者番号：30314537

研究成果の概要(和文)：強い電子相関を持つと言われている Si(111)7×7 構造に金属を吸着することでキャリアをドーブし、表面電気伝導度、構造の変化を調べた。その結果、K, Mg などいくつかの金属が 7×7 単位胞に数個吸着したときに電気伝導度の増加が観測された。同時に測定した高速電子線回折の結果から、吸着によって 7×7 周期は変化しないものの、電気伝導度の増加が起こるときに、単位胞内の構造が特徴的な形状となることが分かった。

研究成果の概要(英文)：Changes of electrical conductance and atomic structure of Si(111)7x7 surface upon adsorption of various metals were investigated. At initial adsorption stages of some metals such as K and Mg, increase of the surface conductance was observed. This increase was found to coincident to a formation of a specific arrangement of adsorbed atoms within unit cells.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,400,000	0	2,400,000
2008 年度	300,000	90,000	390,000
2009 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	240,000	3,440,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 I

キーワード：表面・界面，電子物性

1. 研究開始当初の背景

半導体清浄表面には内部のダイヤモンド構造とは異なる様々な超構造が形成される。その電子状態も特異的で、一部は金属的である。シリコンの(111)清浄表面の 7×7DAS(Dimer-Adatom-Stacking fault)構造は金属的な表面電子状態の典型例である。金属

製は最外層のアドアトムに存在する不對電子が形成するフェルミ準位近傍のバンドに起因する。

近年、この DAS 構造の金属性の由来が注目されている。発端は Flores ら理論グループの「DAS 構造は強相関電子系物質である」という報告である。彼らは、7×7DAS 構

造とそれに相似の 5×5 DAS 構造の電子状態を調べ、以下の2点の特徴を予測した。

(1) 7×7 DAS 構造は室温では金属絶縁体転移近傍の金属であり、低温で絶縁層へ Mott 転移する。

(2) 5×5 DAS 構造では電子相関のため室温でも Mott 絶縁体である。

この報告後、様々なグループが実験的に予測(1)の相転移の有無を調べたが、現在まで確認されておらず真偽の程が不明である。また予測(2)については実験的な検証がまだ行われていない。

2. 研究の目的

7×7 DAS 構造及び 5×5 DAS 構造の表面電子状態の強相関電子物質としての性質を知るために、それらの表面上に微量金属を吸着させたときのフェルミ準位近傍の電子状態について、電気伝導度及び分散構造の観点から明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

表面電子状態の情報を得るために2つの方法を用いた。まずアルカリ金属吸着過程での電子状態の動的変化を調べるために、蒸着中の電気伝導度の変化を4端子法にて測定した。同時に蒸着中の高速電子線回折(RHEED)パターンを CCD を用いて測定し、各スポットの強度変化を調べた。これより、吸着構造についての詳細な知見を得た。また第2の方法として、フェルミ準位近傍の電子状態の分散構造を、高分解能角度分解光電子分光 (ARPES) を用いて詳細に測定した。光源には He ガス励起光 (HeI 21.2 eV) を用い、表面敏感な条件で測定を行った。実験は全て超高真空中で行い、Si (111) 清浄表面を通電加熱法で清浄化を行った。

4. 研究成果

(1). 金属 (Li, Na, K, Mg, Bi) 吸着 Si (111) 表面の電気伝導度と構造の変化

金属吸着時の電気伝導と構造の変化を基板温度を変えて調べた。その結果、いくつかの金属の吸着過程において、電気伝導度の一時的な上昇が観測された。

図 1. に Mg を室温及び昇温した Si (111) 清浄表面に吸着させたときの RHEED スポットの強度変化と電気伝導度変化を示す。室温 (図 1 (a)) 及び昇温 (図 1 (b)) 基板上に Mg を吸着させると、構造は $\alpha 7 \times 7$ 構造、 $\delta 7 \times 7$ 構造、 2×2 構造へと変化することがわかる。室温では更に吸着させると、繊維構造となる。このときの電気伝導度変化をみると、室温では吸着初期過程では電気伝導度に変化は現れず、遷移構造が形成されるにつれて、電気伝導度が増加することがわかる。この増加は、Mg の膜と膜が繋がりパーコレーションパスがで

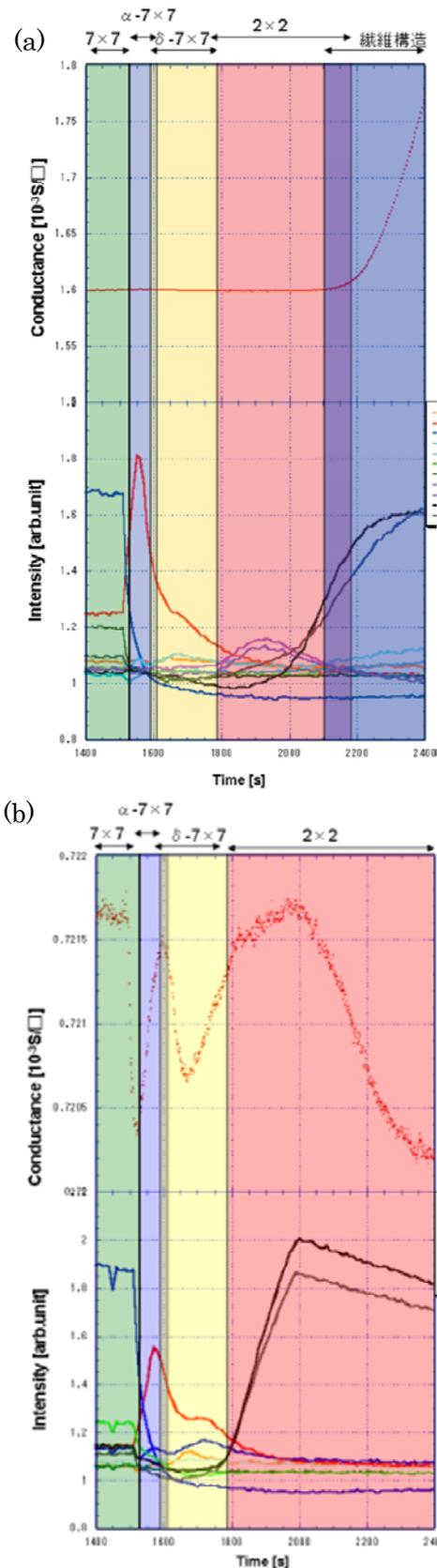


図 1. 室温 (a) 及び昇温 (b) した Si (111) 清浄表面への Mg 吸着過程における RHEED スポット強度 (下) と電気伝導度の変化 (上)。

きるための増加であると考えられる。一方、昇温下サンプル上では、蒸着開始直後に $\alpha 7 \times 7$ 構造が形成され対応する RHEED スポット強度が一時的に上昇するのに合わせて電気伝導度が一時的に上昇した。また、 2×2 構造の形成に対応した電気伝導度の上昇も見られた。これらの電気伝導度の上昇の原因として、表面電荷層のキャリア数増加、表面電子状態中のキャリア数増加等が考えられる。

(2). フェルミ準位近傍の電子状態の ARPES 測定

まず、Si(111) 7×7 構造の表面電子状態の精密測定を行った。これまでの報告により、Si(111) 7×7 の表面電子状態には、フェルミ準位近傍から S1、S2、S3 電子状態があることが知られている。本実験結果より、フェルミ準位近傍に位置する S1 電子状態のエネルギー位置がサンプルによって変化することが明らかになった。これまでの報告によれば S1 電子状態は状態密度が大きいため、フェルミ準位に強くピニングしているとされており、本実験で得られた結果は、これまでの報告と矛盾する。この原因として、光電子分光測定における光起電力効果が考えられる。本実験では高い不純物濃度のウエハを用いており、光起電力効果の影響を受けるとは考えづらいが、表面清浄化のための高温処理時に、表面近傍において不純物濃度が減少する可能性を否定できない。そこで、金属吸着により表面下に急峻な反転層を作製し、反転層中に形成される量子化電子状態のエネルギー間隔を調べることで、基板中の不純物濃度を見積もることを試みた。その結果、Ga などいくつかの金属で反転層を作製した場合において、表面下で一応な不純物イオン分布が存在しないと考えられる結果が得られた。また、同様の結果は、Si(001)面でも観測された。これらの結果は、吸着金属が表面下に拡散し、不純物イオンとして働くことで、総不純物イオンの空間分布を一様でないものに変えたことによると考えられる。表面の電子状態を精密に測定するときには、吸着金属の半導体内部への拡散や不純物イオンとしての働きを十分に調べる必要があることが明らかになった。

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 3 件:)

1. “Hole Subband Dispersion in Space Charge Layers under Pb/Si(001) Surfaces Measured by Angle-Resolved Photoelectron Spectroscopy”, Y. Tanigawa, S. N. Takeda, M. Morita, T.

Ohsugi, Y. Kato, H. Daimon, M. Yoshimaru and T. Imamura, e Journal of Surface Science and Nanotechnology 7(2009) 641-648 March 13(2009) (査読有)

2. “Observation of Multi-Step Ordering of Bi Adsorbed on the Si(111) 7×7 Structure by RHEED and STM”, Yohei Ohnishi, Sakura N. Takeda, Masaaki Yoshikawa, Hiroshi Daimon and Chikako Sakai, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology 6(2008)291-295(査読有)
3. “ARPES measurements on Si(1 1 1) hole subband induced by Pb and Ga adsorption”, M. Morita, S. N. Takeda, M. Yoshikawa, A. Kuwakoa, Y. Kato and H. Daimon, Applied Surface Science 254 7872-7876 (2008) (査読有).

[学会発表] (計 36 件)

1. 武田 さくら, 谷川洋平, 田畑裕貴, 小池潤一郎, 山中佑一郎, 森田誠, 大門寛, 吉丸正樹, 今村健” “Si(001)ホールサブバンド分散の角度分解光電子分光測定” 日本物理学会第 66 回年次大会 (2010 年 3 月 20 日 岡山大学) (口頭)
2. 山中佑一郎, 武田さくら, 森田誠, 小池潤一郎, 中野晃太郎, 大門寛, 吉丸正樹, 今村健, ” 角度分解光電子分光法による Pb/Si(110)表面の価電子帯バンド分散測定”, 応用物理学会 薄膜・表面物理分科会・シリコンテクノロジー分科会共催特別研究会「ゲートスタック研究会 —材料・プロセス・評価の物理—」(第 15 回研究会) (2010 年 1 月 22 日 静岡県三島市東レ研修センター) (口頭)
3. 小池潤一郎, 武田さくら, 森田 誠, 山中佑一郎, 松岡弘憲, 大井秀夫, 服部賢, 大門寛, 吉丸正樹, 今村健 “角度分解光電子分光測定による GaSb(001)のホールサブバンド分散” 応用物理学会 薄膜・表面物理 分科会・シリコンテクノロジー分科会共催特別研究会「ゲートスタック研究会 —材料・プロセス・評価の物理—」(第 15 回 研究会) (2010 年 1 月 22 日 静岡県三島市東レ研修センター) (ポスター)
4. Sakura N. TAKEDA ” Electronic structure of two dimensional hole gases in Si inversion layers”, SSNS' 10(2010 年 1 月 16 日 Shizukuishi Prince Hotel, Japan) (口頭)
5. Junichiro Koike, Sakura Nishino Takeda, Makoto Morita, Yuichiro Yamanaka, Hideo Oi, Ken Hattori, Hiroshi Daimon, Masaki Yoshimaru, Takeshi Imamura ” Investigation on Electronic Structures of GaSb(001) by High-Resolution Angle-Resolved Photoelectron Spectroscopy” ICES-11

- (2009年10月8日 奈良新公会堂) (ポスター)
6. Makoto Morita, Sakura N. Takeda, Junichiro Koike, Yuichiro Yamanaka, Kotaro Nakano, Mie Hashimoto, Hiroshi Daimon, Masaki Yoshimaru, Takeshi Imamura” Structure and electronic states of Bi/Si(001)” ICESS-11(2009年10月8日 奈良新公会堂) (ポスター)
 7. Sakura N. Takeda, Yohei Tanigawa, Junichiro Koike, Yuichiro Yamanaka, Makoto Morita, Hiroshi Daimon, Masaki Yoshimaru, Takeshi Imamura “Effective masses of Si hole subbands in Si inversion layers” ICESS-11(2009年10月6日 奈良新公会堂) (ポスター)
 8. 武田さくら, 谷川洋平, 森田誠, 小池潤一郎, 山中佑一郎, 大門寛, 吉丸正樹, 今村健” Siホールサブバンドの有効質量” 日本物理学会第65回年次大会 (2009年09月27日 熊本大学) (口頭)
 9. 中野晃太郎, 武田さくら, 大西洋平, 山中祐一郎, 橋本美絵, 大門寛 (ポスター) “Pb初期吸着過程におけるSi(111)表面構造変化のリアルタイムモニタリング” 日本物理学会第65回年次大会 (2009年09月26日 熊本大学) (ポスター)
 10. 山中佑一郎, 武田さくら, 森田誠, 小池潤一郎, 中野晃太郎, 大門寛, 吉丸正樹, 今村健 (ポスター) “Si(110)表面へのPb吸着構造のRHEED観察”, 日本物理学会第65回年次大会 (2009年09月26日 熊本大学) (ポスター)
 11. 小池潤一郎, 武田さくら, 森田誠, 山中佑一郎, 大井秀夫, 服部賢, 大門寛, 吉丸正樹, 今村健, “高分解能角度分解光電子分光によるGaSb(001)表面近傍の電子状態” 日本物理学会第65回年次大会 (2009年09月26日 熊本大学) (ポスター)
 12. 森田誠, 武田さくら, 小池潤一郎, 山中祐一郎, 中野晃太郎, 橋本美絵, 大門寛, 吉丸正樹, 今村健, “Bi吸着Si(001)表面の構造と電子状態” 日本物理学会第65回年次大会(2009年09月26日 熊本大学) (ポスター)
 13. 小池潤一郎, 武田さくら, 森田誠, 山中佑一郎, 大井秀夫, 服部賢, 大門寛, 吉丸正樹, 今村健, “高分解能角度分解光電子分光によるGaSb(001)表面近傍の電子状態” 応用物理学会第70回年次大会 (2009年9月9日 富山大学) (口頭)
 14. S. N. Takeda, A. Kuwako, M. Morita, H. Daimon, M. Yoshimura, and T. Imamura, “In-plane anisotropy of hole subbands in Si p-type inversion layers” EP2DS-18(23 July 2009 Kobe International Conference Center) (ポスター)
 15. Sakura N. Takeda, Y. Tanigawa, M. Morita, T. Ohsugi, Y. Kato, H. Daimon, M. Yoshimaru, and T. Imamura, “EFFECTIVE MASSES OF QUANTIZED HOLES IN SI P-TYPE INVERSION CHANNELS” ICFSI-12(09 July 2009 Weimar, Germany) (口頭)
 16. Yohei Ohnishi, Sakura N Takeda, Masaaki Yoshikawa, Hiroshi Daimon, Chikako Sakai (ポスター) “Observation of multi-step ordering of Bi adsorbed on the Si(111)7×7 by RHEED intensity analysis”, International Symposium on Surface Science and Nanotechnology, (2008年11月09日~13日, Waseda, Tokyo) (ポスター)
 17. Yohei Tanigawa, Sakura N. Takeda, M. Morita, T. Ohsugi, Y. Kato, H. Daimon, M. Yoshimaru and T. Imamura ” Study of band dispersions on Pb/Si(100) by photoemission spectroscopy” International Symposium on Surface Science and Nanotechnology, (2008年11月09日~13日, Waseda, Tokyo) (ポスター)
 18. Sakura Nishino Takeda, “Masahiro Nishide, Hiroshi Daimon Metallicity of Si(111) 7×7 and 5×5-Ge Surfaces”, 5th International Symposium on Surface Science and Nanotechnology, 2008年11月09日~13日, Waseda, Tokyo) (口頭)
 19. 武田さくら, 松田和久, 島和也, 安井伸太郎, 酒井智香子, 桑子敦, 大門寛, “Si(111)上へのNa, Mg吸着初期過程のリアルタイムモニタリング”, 日本物理学会 2008年秋季大会(2008.09.22 岩手大学) (口頭)
 20. Sakura N Takeda, ” Measurement of Si Subband Dispersion by ARPES: Towards Experimental Determination of the Effective Mass in Strained-Si”, SISPAD 併設ワークショップ武田(2008.09.08 箱根富士屋ホテル) (口頭: 招待講演)
 21. 武田さくら, 森田誠, 大杉拓也, 谷川洋平, 大門寛, “Si反転層中のホールサブバンド分散” 応用物理学会分科会シリコンテクノロジー第101回研究集会(2008年6月9日~10日, 駒場, 東京) (口頭: 招待講演)
 22. 大西洋平, 酒井智香子, 吉川雅章, 武田さくら, 大門寛, “In-situ表面電気伝導度とRHEEDによるSi(111)表面へのBi初期吸着過程の解析” 第55回応用物理学関係連合講演会 (2008年3月27~30日, 日

- 本大学) (口頭)
23. 酒井智香子、桑子敦、吉川雅章、大
西洋平、武田さくら、大門寛 “超高真空
試料冷却電気伝導度測定機構の開発” 日
本物理学会第 63 回年次大会 (2008 年 3 月
22~26 日、近畿大学)
 24. 森田 誠、武田さくら、吉川雅章、
加藤有香子、大門 寛, ” 角度分解光電子
分光による Pb と Ga 吸着 Si(111) ホールサ
ブバンドの解析” 第 13 回ゲートスタック
研究会—材料・プロセス・評価の物理
—(2008 年 1 月 14~15 日、東レ総合研修
センター) (ポスター)
 25. 武田さくら、森田 誠、吉川雅章、
大杉拓也、谷川洋平、桑子 敦、西出昌
弘、東 直人、大門 寛 “Si p 型反転層中の
サブバンド分散の測定” 第 13 回ゲートス
タック研究会 —材料・プロセス・評価の
物理—(2008 年 1 月 14~15 日、東レ総合
研修センター) (口頭)
 26. 武田さくら、東直人、西出昌弘、大
門寛、東口光晴、三浦雄一、飛田尚寿、
崔小宇、島田賢也、相浦義弘、生天目博文、
谷口雅樹 “シリコン 2 次元ホールサブバ
ンドの角度分解光電子分光: 磁気量子数と
光エネルギー依存性” 第 21 回日本放射
光学会年会放射光科学合同シンポジウム
(2008 年 1 月 12~14 日、立命館大学) (ポ
スター)
 27. 森田 誠、武田さくら、吉川 雅章、
桑子 敦、加藤 有香子、大門 寛” Ga 吸着
による Si(111) ホールサブバンドの ARPES
測定” 表面・界面スペクトロスコーピー
(2007 年 12 月 14~15 日、東北大学電気
通信研究所、ホテルクレセント) (口頭)
 28. 森田 誠、武田さくら、吉川雅章、大門
寛” Ga および Pb 吸着 Si(111) ホールサ
ブバンドのエネルギー準位の解析” 関西
薄膜・表面物理セミナー (2007 年 11 月
30~12 月 1 日、グリーンビレッジ交野) (口
頭)
 29. S. Yasui, S. N. Takeda, K. Matsuda, K.
Shima, C. Sakai, H. Daimon,
“Conductance and structure changes at
the very initial stage of K adsorption
on Si(111)” 9th International
Conference on Atomically Controlled
Surfaces, Interfaces and
Nanostructures (Nov. 11-15, 2007, Tokyo,
Japan)
 30. M. Morita, S. N. Takeda, M.
Yoshikawa, A. Kuwako, Y. Kato, H. Daimon,
“ARPES measurements on Si(111) hole
subband induced by Ga adsorption”
ACSIN-9 (Nov. 11-15, 2007, Tokyo, Japan)
(ポスター)
 31. M. Yoshikawa, S. N. Takeda, M.
Morita, A. Kuwako, Y. Kato, H. Daimon,
“Subband dispersion in Si(111)
inversion layer induced by
Si(111)4x1-In measured by ARPES”,
ACSIN-9 (Nov. 11-15, 2007, Tokyo, Japan)
(口頭)
 32. S. N. Takeda, M. Morita, M.
Yoshikawa, Y. Kato, H. Daimon,
“Probing the surface potential of Si
inversion layers through quantum
levels” ACSIN-9, (Nov. 11-15, 2007,
Tokyo, Japan) (口頭)
 33. 武田さくら, “磁気量子数の異なる
Si 価電子サブバンドの放射光エネルギー
依存性”, 第 27 回表面科学講演大会
(2007 年 11 月 1 日-3 日、東京大学生産技
術研究所) (口頭: 招待講演)
 34. 吉川雅章、森田誠、武田さくら、大
門寛, ” Pb 吸着 Si(111)4x1-In 表 面 での
ホールサブバンドの ARPES 測定”, 日本物
理学会第 62 回年次大会 (2007 年 9 月 21-24
日、北海道大学札幌キャンパス)
 35. 武田さくら、桑子敦、森田誠、吉
川雅章、大門寛, “角度分解光電子分光
による Si サブバンド分散: 入射光方位依存
性”, 日本物理学会第 62 回年次大会
(2007 年 9 月 21-24 日、北海道大学札幌
キャンパス) (ポスター)
 36. 森田誠、武田さくら、加藤有香子、
吉川雅章、大門寛, “角度分解光電子分
光による Si(111) $3\sqrt{3}\times 3\sqrt{3}$ -PbGa ホール
サブバンド解析”, 日本物理学会第 62 回
年次大会 (2007 年 9 月 21-24 日、北海道
大学札幌キャンパス) (口頭: 招待講演)
- ## 6. 研究組織
- (1) 研究代表者
武田 さくら (TAKEDA SAKURA)
奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科
学研究科・助教
研究者番号: 30314537