

研究課題別評価

1 研究課題名:

ナノサイズ一次元構造の電子物性評価

2 研究者氏名: 長谷川 幸雄

ポスドク研究員: 安 東秀 (研究期間 H.15.4~H.18.3)

技術補佐員: 秋山 琴音 (研究期間 H.16.4~H.18.3)

3 研究のねらい:

微細デバイスへの究極としてのナノサイズ一次元構造の電子輸送現象の本質を解明すべく、走査プローブ顕微鏡(SPM)を駆使した2つの研究戦略を提案した。ひとつは、走査トンネル顕微鏡(STM)により、表面二次元電子系に形成された一次元パターンの電子状態を実空間で観察するもので、例えば、一次元リング構造におけるアハラノフ・ボーム効果に絡む波動関数の実空間観察を目標とする。もう一つは、原子間力顕微鏡(AFM)による絶縁体表面上でのナノサイズ一次元構造作成とその電気抵抗・磁気抵抗の測定であり、STMなど他の手法では得られないダイレクトな電気伝導特性評価を目指す。ナノスケール構造の物性評価には原子スケールでの構造評価が不可欠との信念から、SPMの高分解能化にも主眼を置いて研究を進めている。

4 研究成果:

(1) AB効果実空間観察の試み

表面には、その表面電子状態が金属的な振る舞いを示し、二次元的な電子系を持つものが知られている。こうした表面準位をステップなどを障壁としてリング形状に閉じ込め、磁場を印加することにより現れるアハラノフ・ボーム効果(AB効果)をSTMによる電子状態分布測定を通じて、実空間観察することを試みた。

計画当初は二次元電子系を持つCu(111)表面を用いて測定することを予定しており実際に測定を試みたが、表面電子状態とバルクの電子状態とのカップリングが高く、ステップによる閉じ込め準位のエネルギー幅が広くなり、磁場による微細な電子状態の変化の検出が困難であることが判明した。そこで、基板のバンドギャップ内に表面準位があり、そのため閉じ込め準位のエネルギー幅の小さいことが期待されるSi(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ Ag構造(以下、 $\sqrt{3}$ Ag構造)を用いて研究を進めることとした。

図1のSTM像は、Si基板の上にSiとAgを適当な条件で蒸着することによって作成された $\sqrt{3}$ Ag表面によるアイランド構造を示す。2層目の部分に表面電子状態がリング状に閉じ込められた構造が作成されている。図2は同表面での低温でのSTMおよび走査トンネル分光(STS)観察例で、アイランド構造(リング構造は作成されていない)で閉じ込められた電子定在波が観察さ

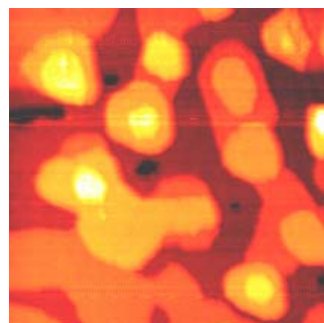


図1 Si(111)- $\sqrt{3}$ Ag 構造のSTM像(室温)。サイズ

れており、また準位のエネルギー幅も十分に狭いことが確認されている。

このように $\sqrt{3}Ag$ 構造はAB効果観察に要する条件を満たしていることを示すことができた。現在、低温でのリング構造作成を進め、磁場中での電子定在波観察を行うことにより、AB効果観察を試みている。

(2) STSによる表面での静電ポテンシャル分布測定

上記のAB効果観察を試みる際に、ある点でのトンネル分光測定やある特定電圧での微分トンネル電流像などこれまでの部分的なSTS測定では詳細な解析が困難であると判断し、全ての領域において一度にトンネル分光測定が行えるようSTSシステムの高精度化を進めた。その結果、 $\sqrt{3}Ag$ 構造上における微小な($<10\text{meV}$)静電ポテンシャルの変化を表面準位のエネルギー値の変化として捕らえることができることを見出した(図3、PRL 96, 016801, '06)。

エネルギー値のシフト量から求められたポテンシャル分布は、この表面に存在する二次元電子系(図2参照)により遮蔽されたポテンシャルとして説明され(図4)、さらに遮蔽効果によるポテンシャルの振動構造、いわゆるフリーデル振動を初めて実空間観察することにも成功している(図5)。これまで、図2に観察される電子定在波が誤ってフリーデル振動と呼ばれることがしばしばあったが、今回、両者を直接比較することにより、その形状・位相などの差異を指摘することができた。

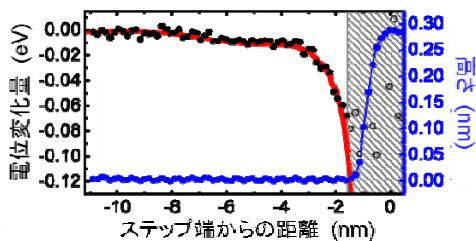


図4 $\sqrt{3}Ag$ 構造のステップ近傍での静電ポテンシャル分布。黒点が実測値で、赤線は理論から求められた遮蔽されたポテンシャル分布。青線はトポグラフを表し、ステップ形状を示している。

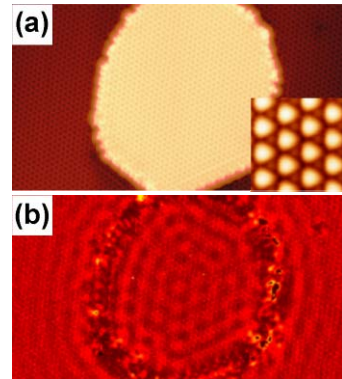


図2 $\sqrt{3}Ag$ 構造のSTM像(a)とその電子定在波(b)。観察領域は $23\text{nm} \times 40\text{nm}$ 。低温(5K)での観察

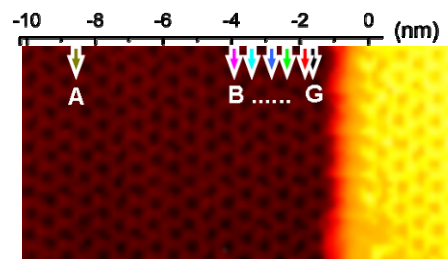
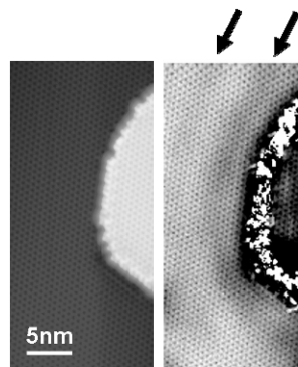


図3 $\sqrt{3}Ag$ 表面のステップ近傍で測定されたトンネル分光スペクトル。ステップに近づくにつれて、ピーク値がシフトしている様子が見てとれる。



(a) STM像 (b) 電位分布像

図5 $\sqrt{3}Ag$ 構造のステップ近傍でのSTM像とポテンシャル分布像。(b)のポテンシャル分布像にフリーデル振動が観察される(矢印)

(3) 低温AFMの立ち上げ

絶縁体表面上での一次元導体の電気伝導測定を目指して、超高真空低温磁場中で稼動する AFM 装置の開発を行った。低温磁場下でのスペースが限られていることから、通常の光によるカンチレバー変位検出の方法を採らず、自己検出型の長辺型水晶振動子を用いて試料表面からの力を検出して像を得ることとした。

図6はその水晶振動子の写真である。中央部のロッドが縦に 1MHz の共振周波数で伸び縮みし、それに対応する電気信号がロッド表面の電極から検出される。ロッドの先に取り付けたタングステン探針を表面に近づけて力を感じると共振周波数が変化するので、それを一定に保ちながら走査することによって像が得られる。ちなみに図6(d)の像で共振周波数の変化を -0.37Hz に設定して撮っている(APL, 87, 133114, '05)。

このセンサーの特長は、光学系の調整が不要なことに加え、共振周波数が高いことから変調法によるポテンシャル測定などが行いやすく、またその直線形状から探針先端形状の電界イオン顕微鏡(FIM)像観察が可能で先端形状の評価や酸化膜除去に活用できる点などがある(図7)。探針先端形状を原子スケールで評価可能なFIMを装備したAFMは、本研究により初めて実現することができたものである。

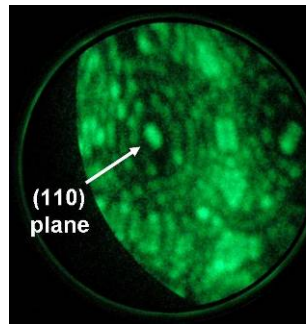


図7: 水晶長辺振動型振動子に取り付けられた探針先端のFIM像

同センサーを低温装置に組み込むことにより、図8に示すような Si 表面の原子像を撮ることができた。室温での観測に比べドリフトなどが極めて少なく、フォースカーブや散逸などの測定が安定に行えることが確認できており、今後の計測に十分活用する計画である。

(4) 金属探針カンチレバーの作成

AFMの高空間分解能化やAFMリソグラフィーによる絶縁体表面での電極作成、さらにはケルビンプローブ法における高精度化などを目的として、金属探針を持つシリコンカンチレバーを作成することに成功した(図9、RSI 76, 033705 '05)。

直径 $5\mu\text{m}$ のタングステンワイヤをカンチレバー先端に銀ペーストで取り付けした後、集束イオンビーム(FIB)を用いて先端を尖らせており、既存のシリコン探針に比べ明らかに鋭い先端を持つ。

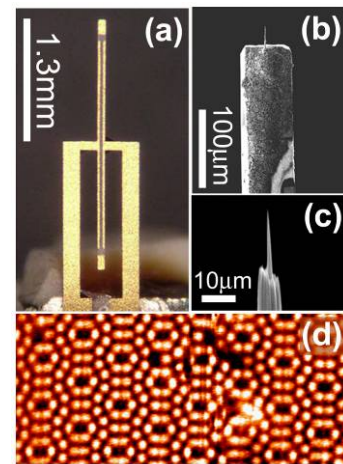


図6 長辺型水晶振動子 (b)(c)は先端に取り付けた探針、(d)は観察されたSi(111)表面での室温でのAFM像(19nm x 9nm)

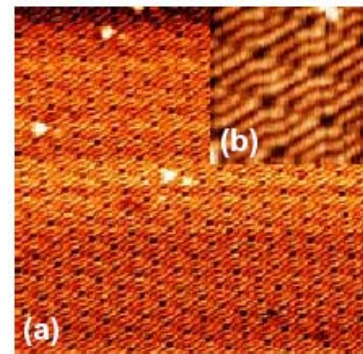


図8 水晶長辺振動型振動子によるSi(111)表面の低温でのAFM像。温度は3.6K, (a)42nm x 42nm, (b)1nm x 1nm

この探針の特長は、シリコンカンチレバーの特性(Q 値など)を保ったまま探針部のみを金属にできる点にあり、電圧印加時にも電界侵入が起こらないため、ケルビン法による静電ポテンシャル分布測定などには有利である。

また、この方法は探針に用いる材料を選ばないことから、Au や Pt などの探針作成も可能である。Au 探針を用いると、適当な電圧を印加することにより電界蒸発によって表面上に Au 原子を移すことができる。この方法により絶縁体表面上での電極作成などが可能であり、一次元構造評価に活用できると考えている。

(5) 高精度AFM観察およびケルビン法による原子分解静電ポテンシャル測定

非接触型 AFM の高精度化を行い、その評価として Ge/Si(105)表面での AFM 像観察およびケルビンプローブ法によるポテンシャル分布評価を行った。同表面での STM 像では、表面の電子状態を反映して探針バイアス電圧の極性に依存した像が得られるのに対し、AFM ではダングリ

ングボンドを持つ全ての表面原子を高分解能でイメージングすることを示すことができた(図 10、PRL, 93, 266102 '04)。また、同表面上でのダングリングボンド間の電荷移動による静電ポテンシャルを検出することによって(ケルビンプローブ法)、電荷移動を直接的に検証することができた(図 11)。

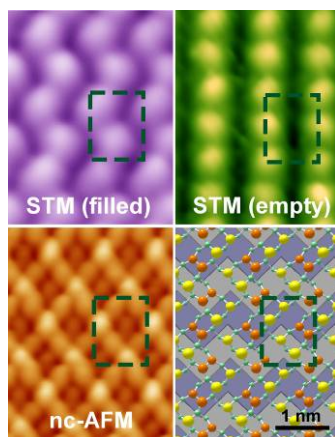


図 10 Ge/Si(105)表面での STM 像・AFM 像とその構造

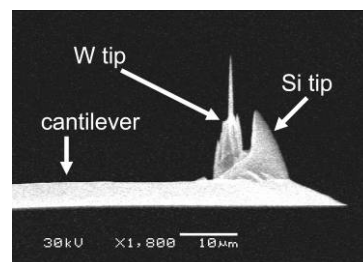


図9 金属探針シリコンカンチレ

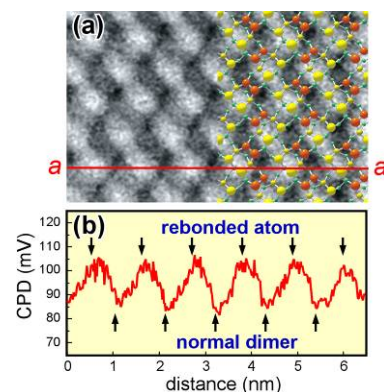


図 11 Ge/Si(105)表面でのケルビンプローブ法による静電ポテンシャル分布像とそのプロファイル

5 自己評価:

装置の開発・高精度化の過程において得られた成果(上記(2)(5))は、いずれも装置の高い性能を生かした前例の無いレベルの研究成果であり、その内容には十分に満足している。特に(2)の結果は全く予想しなかったものであり、STS の高精度化を行わなければ気付くことの無かった内容である。「ユニークな装置を開発しデータを得ればユニークな結果が得られる」ということをまさに実感させる研究であった。

また(4)の研究は、これまで研究者が進めてきた研究スタイルとは異なるものであり、今回のような機会が無ければ行わなかったであろう研究対象である。ポスドク研究員あるいは技術員といった人的支援を得て余裕ができたことから多少の遊び心を持って取り組んだところ、ことのほか上手く行き一定の成果を得ることができた。また開発した方法は、他の研究、例えば(3)の水晶振動子先端の探針取り付け・加工にも応用することができ、メインのプロジェクト

ト推進にも大いに役立つ結果となっている。

一方で、プロジェクト本来のテーマである一次元構造に関しては、STM・AFM いずれにおいても十分な成果を得ることができず、課題が残った。STM による AB 効果に関しては試料選定の問題、AFM に関しては装置立ち上げの見通しの甘さ、さらには全体的にテーマが散漫になったなどがその原因として挙げられるであろう。今後のプロジェクト策定における反省点としたい。

6 研究総括の見解:

一次元構造の電気抵抗・磁気抵抗の測定と表面におけるアハロノフ・ボーム効果の観測という2つの興味あるテーマを掲げて研究を進めたが、両テーマとも目標を達成しなかった。当初の目標達成に集中するよう領域総括としてアドバイスしたが、他の実験にエネルギーを取られて、本来の目標が十分達成できなかったのは残念である。低温動作の STM と AFM の活用という2つのかなり難しい技術を追ったのには無理があった。しかし表面二次元電子系におけるフリーデル振動を実空間観察するなど、物理的に興味ある結果を得たことは評価できる。

7 主な論文等:

論文: 16 件(内、国内 3 件)、招待講演: 17 件(内、国際学会 8 件)

主な論文:

1. Toyoaki Eguchi and Y. Hasegawa
"High resolution atomic force microscopic imaging of the Si(111)-7x7 surface: Contribution of short range force to the images", Phys. Rev. Lett., 89, 266105 (2002).
2. T. Eguchi, Y. Fujikawa, K. Akiyama, T. An, M. Ono, T. Hashimoto, Y. Morikawa, K. Terakura, T. Sakurai, M.G. Lagally, and Y. Hasegawa,
"Imaging of all dangling bonds and their potential on the Ge/Si(105) surface by noncontact atomic force microscopy", Phys. Rev. Lett., 93, 266102 (2004)
3. Kotone Akiyama, T. Eguchi, T. An, Y. Fujikawa, Y. Yamada-Takamura, T. Sakurai, and Y. Hasegawa, "Development of a metal tip cantilever for non-contact atomic force microscopy", Rev. Sci. Instrum. 76, 033705 (2005).
4. Toshu An, Toyoaki Eguchi, Kotone Akiyama and Yukio Hasegawa
"Atomically-resolved imaging by frequency-modulation atomic force microscopy using a quartz length-extension resonator", Appl. Phys. Lett., 87, 133114 (2005)
5. Masanori Ono, Y. Nishigata, T. Nishio, T. Eguchi, and Y. Hasegawa
"Electrostatic potential screened by a two-dimensional electron system:: A real-space observation by scanning tunneling spectroscopy", Phys. Rev. Lett. 96, 016801 (2006)

主な招待講演:

1. Yukio Hasegawa and Toyoaki Eguchi
"High Resolution Atomic Force Microscopy by Probing a Single Chemical Bonding",
8th IUMRS International Conference on Advanced Materials (IUMRS-ICAM2003), Yokohama,
Japan, October, 2003
2. Yukio Hasegawa, T. Eguchi, K. Akiyama, M. Ono, and T. Sakurai
"Highly resolved surface imaging by atomic force microscope"
FSISE2004, the 2004 joint conference of the 7th international conference on Advanced
Surface Engineering (ASE 2004) and the 2nd international conference on Surface and
Interface Science and Engineering (SISE 2004), May 2004, Guangzhou, China
3. Y. Hasegawa, T. Eguchi, K. Akiyama, Y. Fujikawa and T. Sakurai,
"STM and AFM; Which is Better for Surface Structural Analysis? Non-contact AFM Studies
on Ge/Si(105) Surface"
13th International Conference on Scanning Tunneling Microscopy /Spectroscopy and
Related Techniques (STM'05), July, 2005, Sapporo, Japan
4. 長谷川幸雄「非接触 AFM による表面原子・電荷移動の観察」(シンポジウム講演)
日本物理学会 2005 年秋季大会、2005 年 9 月、京田辺、京都
5. Yukio Hasegawa and Toyoaki Eguchi,
"Sensing Charge Transfer Among Surface Atoms by Kelvin Probe Force Microscopy",
43rd IUVESTA Workshop on "Chemical Sensitivity in Scanning Probe Microscopy" Zakopane,
Poland, Nov.-Dec. 2005