

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

Development of Green's Function STM and Application to Study
Of Nano Electronic Transport Dynamics

長谷川 修司 (HASEGAWA Shuji)

東京大学・大学院理学系研究科・准教授



研究の概要

我々が今まで開発・発展させてきた「4 探針 STM (走査トンネル顕微鏡) 法」をさらに高度化した「グリーン関数 STM 法」を開発し、それをさまざまなナノメータスケール構造体の測定に適用して、その有用性を実証する。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 ・ 薄膜・表面界面物性

キーワード：走査プローブ顕微鏡、マルチプローブ、表面電気伝導、表面・界面物性

1. 研究開始当初の背景・動機

本研究開始までに、我々は4 探針型 STM (走査トンネル顕微鏡) 装置を開発し、それによって、結晶表面の最上原子層やナノ構造体の電気伝導特性を測定して、その有用性を示してきた。しかし、その装置は、室温でしか稼動できず温度を変えることができない、原子分解能を得るのが困難、4 探針のナノメータレベルでの位置制御が困難など、いくつかの改良点が残っていた。そのため、真のナノメータスケールでの電子輸送特性の計測研究には第2号機を建設する必要があった。

2. 研究の目的

本研究では、さらに高度化した4 探針型 STM 装置を建設する。つまり、極低温で稼動して原子分解能が得られる、探針間隔を数十ナノメータまで縮められる、4 本の探針を有機的に駆動・制御できる統合型コントローラを持つ装置とする。次に、それを用いて、ナノメータスケールでの電子輸送特性はもちろんのこと、キャリア電子の波動関数の非局所性を利用してグリーン関数の実空間観測を目指す。

3. 研究の方法

4 探針型 STM 装置本体および4 探針統合型コントローラは(株)ユニソクと共同で開発・建設した。また、金属被覆型導電性カーボンナノチューブ探針を大阪大学片山光浩教授と共同で開発した。

4. 研究の主な成果

(1) 装置の建設：図1に示すような極低温4 探針型 STM 装置を完成させ、超高真空中で7 K を20 時間維持でき、原子分解能が得られた。このような装置は世界的にみても類例が無い。

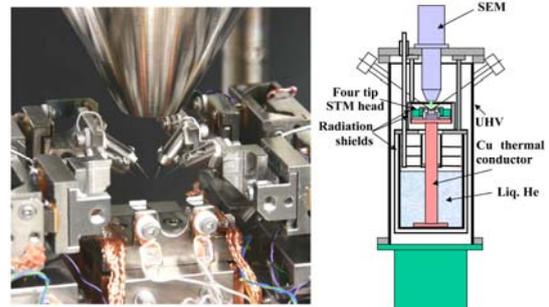


図1. 4 探針装置本体の概略図 (右図) および、試料まわりの写真 (左図)

4 本の探針の有機的な駆動・制御のために、1 台の PC で制御できる統合型コントローラを開発した。また、図2に示すように、SEM (走査電子顕微鏡) 像観察時に各探針で測定される吸収電流像を得ることにより、各探針の位置を PC が自動認識し、さらに4 本の探針を自動配置する方法を考案した (特許出願中、特願 2007-039718)。

(2) カーボンナノチューブ探針の開発：通常の電界研磨した金属探針では、その先端のアスペクト比が小さいため、複数本の探針を数十 nm まで近づけることができない。そのため、本研究では、直径 10 nm 程度の多層カーボンナノチューブ (CNT) を

金属探針の先端に接続して、それ全体を金属被覆した導電性探針を開発することに成功した。図3は、PtIr 薄膜で被覆した CNT 探針4本を用いて CoSi₂ ナノワイヤの電気伝導度を測定しているときの SEM 像である。このような CNT 探針の採用によって、探針間隔を最小で 20 nm 程度まで小さくすることが可能となった。

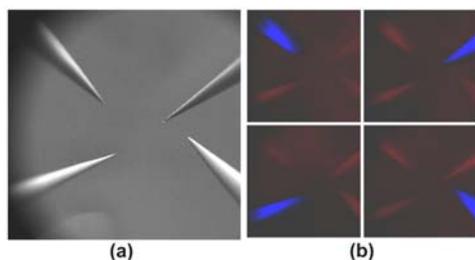


図2. (a) 4探針のSEM像。(b) 各探針の電流測定回路による吸収電流像。それぞれの探針の位置と形状を自動で認識(色分け)できる。

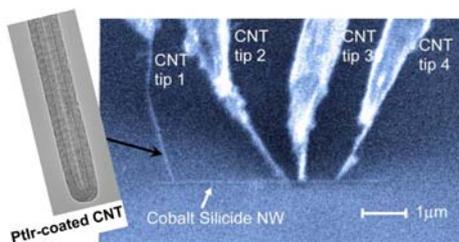


図3. PtIr被覆したCNT探針(左図はそのTEM像)4本を使ってCoSi₂ナノワイヤの電気伝導度を測定しているときのSEM像。

(3) 応用計測：図4は、直径40 nm程度のCoSi₂ ナノワイヤの電気抵抗を、探針間隔を変えながら測定した結果である。探針間隔が20~30 nmまで直線的に抵抗値が変化していることから、20 nmでさえ拡散伝導であることがわかる。このように、真にナノメートルスケールでの電気伝導計測が可能となった。最終目標のグリーン関数の計測はまだ実現していないが、極低温でのキャリアのコヒーレンス長以下の探針間隔が実現したので、まもなく最終目標を達成できると考えている。

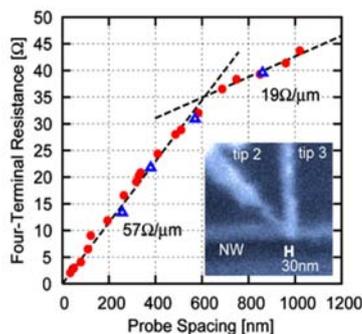


図4. PtIr被覆したCNT探針によって測定したCoSi₂ナノワイヤの電気抵抗の探針間隔依存性。

5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

2003年から2008年現在までに私が行った招待講演は、国際会議で29件、国内会議で13件に上る。それに刺激され、本研究の開始当初、多探針型STMの研究者はほとんどいなかったが、現在では、10以上の研究グループが国内外で研究を始めており、新しい研究の潮流を作ったと言える。

6. 主な発表論文

(研究代表者は太字、研究分担者には下線)

- "Four-Point Probe Resistance Measurements Using PtIr-Coated Carbon Nanotube Tips", 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**, Nano Letters **7**, 956 (2007).
- "Variable-Temperature Independently-Driven Four-Tip Scanning Tunneling Microscope", R. Hobara, N. Nagamura, **S. Hasegawa**, I. Matsuda, Y. Yamamoto, K. Ishikawa, and T. Nagamura, Review of Scientific Instruments **78**, 053705 (2007).
- "Electron-phonon interaction and localization of surface-state carriers in a metallic monolayer", I. Matsuda, C. Liu, T. Hirahara, M. Ueno, T. Tanikawa, T. Kanagawa, R. Hobara, S. Yamazaki, and **S. Hasegawa**, Physical Review Letters **99**, 146805 (2007).
- "Large surface-state conductivity in ultrathin Bi films", T. Hirahara, I. Matsuda, S. Yamazaki, N. Miyata, T. Nagao, and **S. Hasegawa**, Applied Physics Letters **91**, 202106 (2007).
- "Multi-Probe Scanning Tunneling Microscopy" (Chap. II.7. in Vol. 1), **S. Hasegawa**, in Scanning Probe Microscopy -Electrical and Electro-mechanical Phenomena at the Nanoscale-, Eds. S. Kalinin and A. Gruverman (Springer, 2007).
- "Electrical Characterization of Metal-Coated Carbon-Nanotube Tips", S. Yoshimoto, Y. Murata, R. Hobara, I. Matsuda, M. Kishida, H. Konishi, T. Ikuno, D. Maeda, T. Yasuda, S. Honda, H. Okado, K. Oura, M. Katayama, and **S. Hasegawa**, Japanese Journal of Applied Physics **44**, L1563 (2005).
- "Electrical Resistance of a Monatomic Step on a Crystal Surface", I. Matsuda, M. Ueno, T. Hirahara, R. Hobara, H. Morikawa, and **S. Hasegawa**, Physical Review Letters **93**, 236801 (2004).

ホームページ:

<http://www-surface.phys.s.u-tokyo.ac.jp/>